

Wurzeleinwuchs in Abwasserleitungen und Kanäle

– Kurzbericht –



Wissenschaftliche Leitung

Prof. Dr. Thomas Stützel

Dr.-Ing. Bert Bosseler

Projektleitung und Bearbeitung

Dipl.-Ing. Christoph Bennerscheidt

Dipl.-Biol. Heiko Schmiedener

Bearbeitung:

Ruhr-Universität Bochum

Lehrstuhl für Spezielle Botanik und Botanischer Garten

Prof. Dr. Thomas Stützel

Universitätsstraße 150

44780 Bochum

IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur

Exterbruch1

45886 Gelsenkirchen

www.ikt.de

Auftraggeber:



Ministerium für Umwelt, Naturschutz,
Landwirtschaft und Verbraucherschutz des
Landes Nordrhein-Westfalen

Gelsenkirchen, Juli 2004

Wir danken allen projektbeteiligten Netzbetreibern für die weitreichende Unterstützung im Rahmen der zahlreichen Baumaßnahmen:

Dipl.-Ing. F. Großklags	Tiefbauamt der Stadt Bochum
Herr K. Kroymann	Wirtschaftsbetriebe Duisburg
Dipl.-Ing. B. Burger	Stadtentwässerung Göttingen
Herr V. Ritzmann	Tiefbauamt der Stadt Langenfeld
Dr.-Ing. R. Lunkenheimer	Wasser und Abwasser Fürstenberger Seengebiet
Dipl.-Ing. C.Kornmaier	Tiefbauamt der Stadt Herten
Dipl.-Ing. C. Focke Dipl.-Ing. G. Gottscholl	Stadtwerke Essen AG
Dipl.-Ing U. Reisch	Stadtwerke Quickborn
Dipl.-Ing. J. Hammermeister	Stadt Rehbürg-Loctum
Dipl.-Ing. H. TheiBing	Tiefbauamt der Stadt Münster
Dipl.-Ing. J.- S. Kleinkauf	Tiefbauamt der Stadt Wuppertal

Ein besonderer Dank für die wissenschaftliche Unterstützung bei der Beschreibung und Analyse von Bodeneigenschaften gilt:

Prof. Dr. W. Burghardt	Lehrstuhl für Angewandte Bodenkunde, Universität Duisburg-Essen
------------------------	--

1	VERANLASSUNG, PROBLEM UND ZIELSTELLUNG.....	1
2	NATURWISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHER HINTERGRUND.....	3
3	AUFGRABUNGEN AN 16 SCHADENSFÄLLEN.....	7
4	PFLANZVERSUCHE UND WURZELDRUCK.....	15
5	ROHRVERBINDUNGEN UND ANPRESSDRUCK	23
6	WURZELFESTIGKEIT	29
7	ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	31
8	FAZIT UND AUSBLICK.....	36
9	LITERATUR	41

1 Veranlassung, Problem und Zielstellung

Die ATV-Schadensklassifizierung [1] beschreibt Schäden durch Wurzeln von Stadtbäumen als einen der hauptsächlich auftretenden Schadensfälle. 5,68 % aller auftretenden Schäden entstehen aus Verwurzelungen [2] und werden überwiegend im städtischen Verdichtungsraum - wie er auch für NRW als bevölkerungsreichstes Bundesland typisch ist - beobachtet [3]. Das Entfernen der einwachsenden Wurzeln bzw. Sanieren der entsprechenden Haltungen verursacht bei den Betreibern von Entwässerungsleitungen und -kanälen hohe wiederkehrende Kosten, mit bis zu 2.500,- € pro Kilometer Kanalstrecke [4].

Das Auftreten von Wurzeleinwuchs wird ingenieurtechnisch häufig auf einen zu geringen Anpressdruck des Dichtungsmittels in der Rohrverbindung zurückgeführt. Biologische Aspekte werden bei der Ursachenfindung nicht berücksichtigt, so dass auch zum Nachweis der Wurzelfestigkeit von Rohrverbindungen nur stark idealisierte mechanische Verfahren eingesetzt werden [5]. Diese vernachlässigen i.d.R. die besonderen Versagensmechanismen aus der Interaktion zwischen Rohrleitung und Wurzeln (vergl. [6], [7]), so dass auch die Netzbetreiber den bestehenden Prüfverfahren nur ein geringes Vertrauen entgegenbringen. Wiederholt auftretende Einwuchsschäden verstärken diese Verunsicherung der Netzbetreiber bei der Auswahl zuverlässiger Rohrwerkstoffe und -verbindungen. Darüber hinaus fehlen auch den Rohrherstellern zur Entwicklung wurzelfester Rohrverbindungen geeignete Hinweise und Prüfergebnisse.

Hintergrund ist, dass die Wurzel-Rohr-Interaktion nicht nur durch die mechanische Beanspruchung, z.B. aus Windlasten, beeinflusst wird, sondern auch die Umweltbedingungen eine maßgebliche Rolle spielen. Zu diesen sind neben den Bodenverhältnissen auch die Eigenschaften der Leitungen, deren Verbindungen und die Eigenschaften der eingesetzten Verfüllmaterialien zu zählen [7], [8]. Auch die auf das Rohr und die Verbindung wirkenden Lastarten und Lastgrößen sowie die damit verbundenen Versagensmechanismen sind bisher nicht bekannt. Im Einzelnen lassen sich die folgenden Kernaussagen treffen:

- Die bisher vermuteten **Ursachen für Wurzeleinwuchs**, wie Flüssigkeitsmangel oder zu geringe Anpressdrücke des Dichtmittels, sind wissenschaftlich nicht belegt. In der Folge stützen sich die angewandten **Prüfverfahren** (z.B. DIN 4060 [5]) auf äußerst grobe Last- und Beanspruchungsmodelle und berücksichtigen nicht die mechanischen und biologischen Vorgänge bei Ablauf der Interaktion zwischen Wurzel und Leitung.

- Die Mechanismen bei Eindringen einer Wurzel in die Leitung sowie der Einfluss der Rohrverbindungseigenschaften auf das Wurzelwachstum, d.h. insbesondere die dem Eindringen entgegenstehenden oder dieses begünstigenden Faktoren, sind wissenschaftlich nicht belegt.
- In der Folge orientieren sich die angebotenen Produkte nur an den bisher verbreiteten Dicht-Prinzipien. Die Netzbetreiber sind, trotz Einsatz zertifizierter Rohrwerkstoffe und –verbindungen, weiterhin mit dem Auftreten von Wurzelschäden konfrontiert [2], [3], [6].

Ziel des Vorhabens ist es daher,

- die Ursachen für Wurzeleinwuchs in Leitungen wissenschaftlich zu belegen,
- die Mechanismen bei Eindringen einer Wurzel in die Leitung sowie die Wechselwirkung zwischen Wurzeleinwuchs und Rohreigenschaften zu beschreiben,
- Vorschläge für Prüfverfahren zu entwickeln, die die mechanischen und biologischen Vorgänge bei Wurzeleinwuchs realitätsnah abbilden,
- die bisherigen Rohrverbindungstechniken hinsichtlich ihrer Beständigkeit gegen Wurzeleinwuchs zu bewerten und Hinweise zur künftigen Vermeidung von Wurzeleinwuchs zu geben.

2 Naturwissenschaftlich-Technischer Hintergrund

Abwasserleitungen und deren Umgebung, der Leitungsgraben sowie der gewachsene Boden, bieten Lebensraum für die Wurzeln von Bäumen. Die Ursachen für den Wurzeleinwuchs in Leitungen hängen eng mit diesen örtlichen Randbedingungen zusammen. In der Folge lassen sich die Vorgänge beim Einwuchs von Wurzeln nur beschreiben, wenn das Gesamtsystem aus Baum, Boden, Ver- und Entsorgungsleitungen unter besonderer Berücksichtigung der jeweiligen Fachdisziplinen betrachtet wird (vgl. Abb. 1).

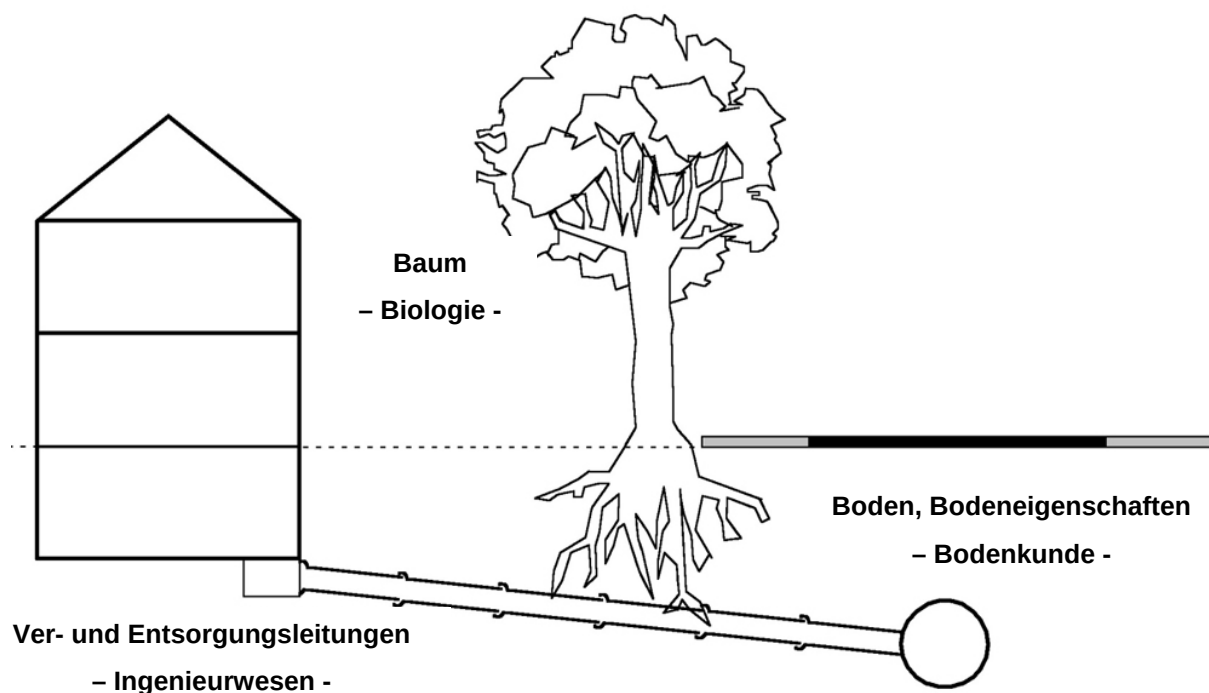


Abb. 1: Einflussbereiche zum Thema Wurzeleinwuchs und beteiligte Fachdisziplinen.

Die wesentlichen Fragestellungen zum Verständnis der Interaktion zwischen Wurzeln und Rohrverbindungen werden im vorliegenden Projekt entsprechend von den beteiligten Kooperationspartnern, dem Lehrstuhl für Spezielle Botanik an der Ruhr-Universität-Bochum (Biologie) und dem IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur (Ingenieurwesen), behandelt. Um aber auch den Weg der Wurzeln zur Rohrleitung im städtisch geprägten Untergrund besser verstehen zu können, wurde zur Beantwortung bodenkundlicher Fragen das besondere Fachwissen des Lehrstuhls für Angewandte Bodenkunde an der Universität Duisburg-Essen herangezogen.

Wurzeln dienen der Aufnahme von Nährstoffen und Wasser aus dem Boden. Damit der wachsende Organismus seinen Bedarf an Nährstoffen und Wasser über seine gesamte Lebensdauer hinweg decken kann, wächst auch das Wurzelsystem weiter und erschließt sich stetig neuen Bodenraum. Neben diesem mechanischen Anspruch der Wurzeln an den Boden, benötigen Wurzeln darüber hinaus einen ausreichenden Gehalt an Sauerstoff, der sich in den Bodenporen befindet [3], [7]. Die Wurzeln füllen die Bodenporen aus, vergrößern durch Wachstum ihr Volumen und komprimieren dabei den Boden. Damit sich die Pflanze im Boden verankern kann, müssen die Bodenpartikel den Wurzeln ausweichen können und so Räume freigeben, die von Wurzeln eingenommen werden.

Der Bodenkörper in Stadtböden wird für Bauwerke der unterirdischen Infrastruktur genutzt und ist dadurch in seiner Struktur stark verändert. Zum einen werden üblicherweise Versorgungsleitungen in Tiefen bis zu 1,60 m verlegt (vgl. [9]). Zum anderen befinden sich dort Bauwerke der Ortsentwässerung wie Abwasserkanäle, Hausanschlussleitungen und Straßeneinläufe. Einen Eindruck der Nutzung und Verwurzelung des Bodenkörpers von Stadtböden gibt Abb. 2.

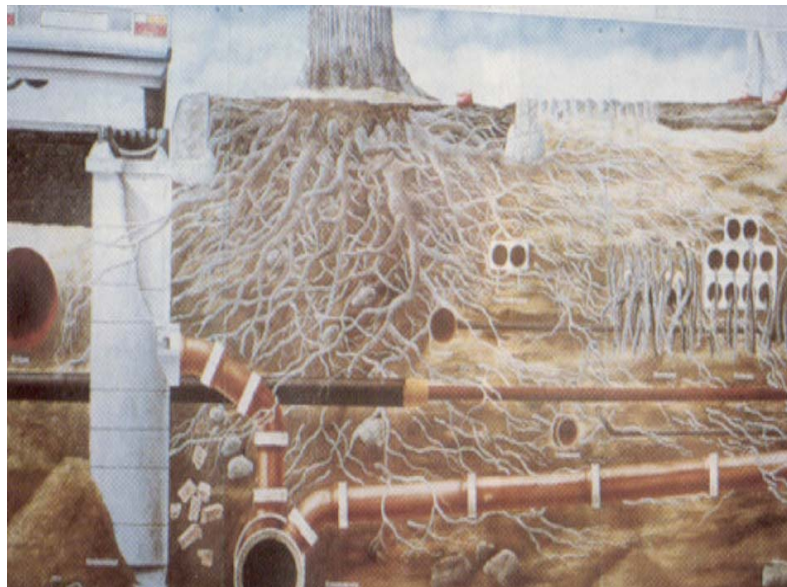


Abb. 2: Schematische Wiedergabe des städtischen Wurzelraumes, aus [7].

Insbesondere die Herstellung von Kanalisationen in der offenen Bauweise stellt einen starken Eingriff in den Bodenkörper dar. Sie erfolgt durch Ausheben eines Grabens, Verlegen der Leitung im Schutze einer Böschung oder eines Verbaus und anschließendes lagenweises Verfüllen des Grabens und sorgfältiges Verdichten des eingefüllten Materials (vgl. DIN EN 1610 [10]). Die entscheidenden Problemzonen bei der Verdichtung des Leitungsgrabens

stellen die schwer zugänglichen Zwickel dar. Besonders in schmalen Rohrleitungsgräben sind die Zwickel schlecht erreichbar, so dass dort Bereiche geringer Verdichtung auftreten können.

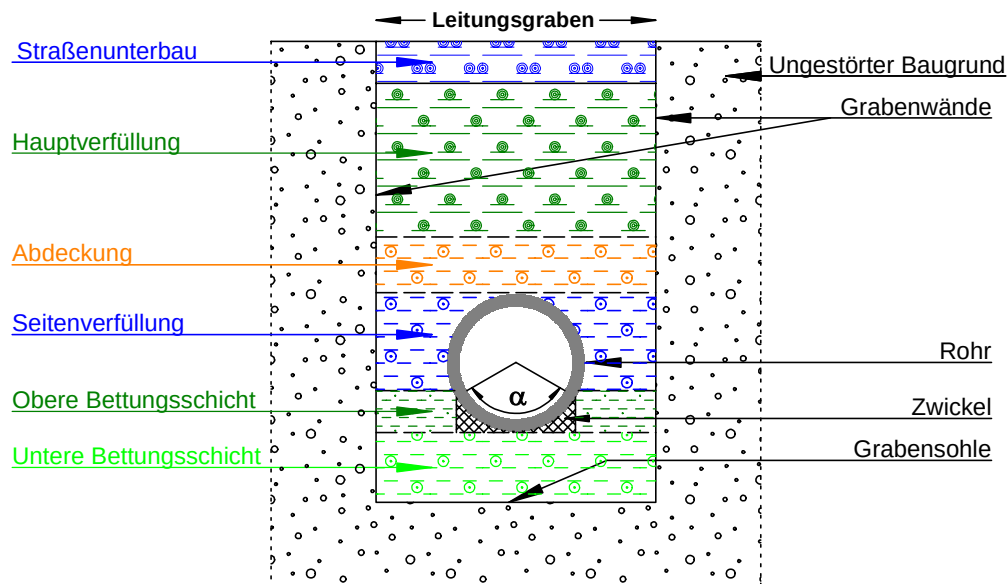


Abb. 3: Baugrundzonen nach DIN EN 1610 [10].

Auch mit Blick auf die Beständigkeit von Abwasserleitungen und deren Verbindungen gegenüber **Wurzeleinwuchs** werden weltweit unterschiedliche **Prüfverfahren** zur Erfassung der Dichtwirkung in Rohrverbindungen diskutiert. Die tatsächlichen Ursachen für Wurzeleinwuchs bleiben dabei in der Regel unberücksichtigt. So wird nach DIN 4060 [5] die Wurzelfestigkeit durch eine Dichtheitsprüfung bei Innenwasserdruck unter Scherlastbeanspruchung nachgewiesen. Hintergrund scheint die Annahme zu sein, dass Wasseraustritt infolge einer Undichtigkeit einen wesentlichen Reize für Wurzeleinwuchs darstellt. In Australien [11] wurden Rohrverbindungen mit unterschiedlichen Dichtsystemen unter in-situ-ähnlichen Bedingungen in einem bepflanzten Versuchsstand eingebaut, nach Ablauf von einem Monat mit flüssigem Düngemedium gefüllt und nach 32 Monaten hinsichtlich der Wurzelentwicklung untersucht. Einwuchsfälle traten deutlich häufiger in Rohrverbindungen auf, die den australischen Anforderungen für den Anpressdruck (0,4 Mpa = 4 bar) nicht genügten. Bei Absenkung des Anpressdruckes wurde allerdings nicht zwangsläufig ein Wurzeleinwuchs beobachtet. Grundsätzlich lässt sich jedoch vermuten, dass insbesondere die Höhe des Anpressdruckes einer Dichtung deren Wurzelfestigkeit beeinflusst. Entsprechend liegt hier auch der Schwerpunkt der in Tabelle 1 dargestellten Prüfverfahren.

Tabelle 1: Prüfverfahren zur Bestimmung der Dichtwirkung von Rohrverbindungen.

Prüfung nach	Prüfkriterium	Versuchsaufbau	Beschreibung
DIN 4060 [5]	Dichtheit unter Scherlast		Die Wurzelfestigkeit von Rohrverbindungen gilt nach DIN 4060 als nachgewiesen, wenn die Rohrverbindung unter Scherlast eine Dichtheitsprüfung bei Über- bzw. Unterdruck besteht.
Entwurf TC 155 [12]	Anpressdruck		Auf europäischer Ebene wird derzeit ein Entwurf der WG 13 des TC 155 (WI 00155540) zur Messung des Anpressdrucks diskutiert. Bei der Prüfung wird Gas mit einer definierten Flussrate durch einen dünnen Plastikschauch (Wandstärke < 0,1 mm) geleitet, der zwischen Spitzende und Elastomerdichtung eingebaut ist. Bei Einstellen einer konstanten Flußrate des eingeleiteten Gases kann der zum Versagen führende Druck auf die Dichtung bestimmt werden. Als Mindestanforderung wird ein Druck von 0,15 MPa (Langzeittest) gefordert.
CSIRO [11]	Wurzeleinwuchs und Anpressdruck	Figure 1. Root intrusion test set-up.	Durch das CSIRO, Australien [11] wurden Rohrverbindungen mit unterschiedlichen Dichtsystemen unter in-situ-ähnlichen Bedingungen in einem Versuchsstand eingebaut, nach Ablauf von einem Monat mit flüssigem Düngemedium gefüllt und nach 32 Monaten hinsichtlich der Wurzelentwicklung untersucht. Die Bepflanzung erfolgte mit <i>Melaleuca armillaris</i> (Teebaum), der über ein aggressives Wurzelsystem verfügt. Das Einwuchsverhalten der Wurzeln wurde an den verschiedenen Rohrverbindungen beobachtet und dokumentiert. Der Einfluss eines zu geringen Anpressdruckes der Dichtung auf das Einwuchsrisiko wurde nach [11] auch durch Versuche an Rohrverbindungen mit variabel ausgeführten Muffen erfasst.
AS 1260 [13]	Anpressdruck	Der Nachweis der kurzzeitigen Widerstandsfähigkeit von Rohrverbindungen gegenüber Wurzeleinwuchs erfolgt hier über die Messung des Anpressdruck der eingebauten Dichtmittel. Gefordert wird ein vergleichsweise hoher Druck von 0,55 Mpa bzw. 0,4 MPa [13].	
TÜV Südwest [14]	Gasdichtheit		Nach [14] besteht zwischen der Gasdurchlässigkeit (Permeation) einer Dichtung und deren Undichtheit gegenüber Flüssigkeiten (Leakage) eine direkte Beziehung, so dass das Versagen eines eingebauten Dichtmittels mit Vorwarnzeit vorausgesagt werden kann. Für industrielle Anwendungen hat der TÜV Südwest daher ein Verfahren entwickelt, um die Gasdurchlässigkeit (Permeation) von Dichtmitteln über die Zeit zu erfassen.
FLL-Verfahren [15]	Wurzelein- bzw. -durchdringung		Abdichtungen von Dächern, die begrünt werden sollen, müssen wurzelfest ausgebildet werden. Dies kann durch die Verwendung von wasserundurchlässigem Beton und geschweißten Metallwannen oder durch den Einsatz von Abdichtungsbahnen bzw. ganzflächigen Beschichtungen erfolgen. Der Nachweis der Durchwurzelfestigkeit von Bahnen und Beschichtungen ist nach dem Verfahren zur Untersuchung der Wurzelfestigkeit von Dachbegrünungen, FLL 1999, zu führen.

3 Aufgrabungen an 16 Schadensfällen

Zur Untersuchung von Wurzelschäden wurde im Rahmen von Baumaßnahmen jeweils der Schadensverlauf an 7 privaten Hausanschlussleitungen, 7 öffentlichen Kanälen sowie an zwei Straßeneinläufen dokumentiert. Vor Ort wurden u.a. die Lage der geschädigten Rohrverbindung, der Baumstandort und die Baumarten aufgenommen. Es wurden jeweils geschädigte Rohrverbindungen entnommen und sorgfältig geöffnet um den Verlauf des Wurzeleinwuchses durch die Rohrverbindung zu beschreiben (Tabelle 2). Darüber hinaus wurden Bodenuntersuchungen durchgeführt, um eine mögliche Interaktion zwischen Wurzelwuchs und Bodenstruktur zu erkennen.

Tabelle 2: Übersicht der begleiteten Baumaßnahmen und entnommenen Leitungsproben.

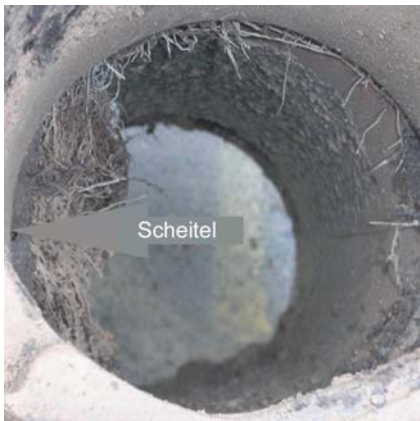
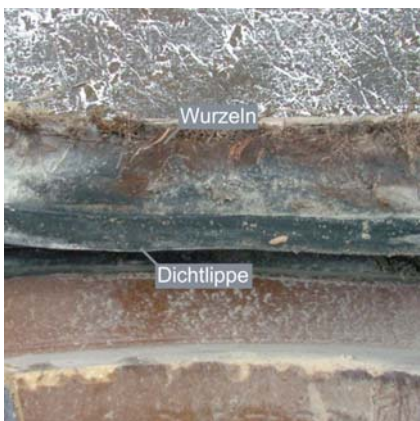
Abkürzungen für die Art der Leitung:

HA-MW = Hausanschlussleitung (Mischwasser), **HA-RW** = Hausanschlussleitung (Regenwasser)

HA-SW = Hausanschlussleitung (Schmutzwasser), **St.k.-MW** = Straßenkanal (Mischwasser)

AL-RE = Anschlussleitung Regeneinlauf; **RE-HA-MW** = Regeneinlauf / Hausanschlussleitung (Mischwasser)

Ort der Baumaßnahme	Baustellensituation	Leitungsprobe	Art der Leitung
Bochum			HA-MW
Duisburg, Ortslage I			HA-MW

Ort der Baumaßnahme	Baustellensituation	Leitungsprobe	Art der Leitung
Göttingen, Ortslage I			HA-RW
Göttingen, Ortslage II			HA-SW
Göttingen, Ortslage III			HA-SW
Göttingen, Ortslage IV			HA-SW

Ort der Baumaßnahme	Baustellensituation	Leitungsprobe	Art der Leitung
Langenfeld			HA-MW, St.k.-MW
Fürstenberg, Ortslage I			St.k.-MW
Fürstenberg, Ortslage II			St.k.-MW
Herten			St.k.-MW

Ort der Baumaßnahme	Baustellensituation	Leitungsprobe	Art der Leitung
Essen			St.k.-MW
Quickborn			St.k.-MW
Rehburg – Loccum			St.k.-MW
Münster			St.k.-MW

Ort der Baumaßnahme	Baustellensituation	Leitungsprobe	Art der Leitung
Duisburg, Ortslage II			AL-RE
Wuppertal			RE-HA-MW

Bei den Aufgrabungen war durchweg zu beobachten, dass die Umgebung von Leitungen, d.h. insbesondere der Leitungsgraben, für Wurzeln attraktiv ist. So spiegelt das Wachstum von Wurzeln und das entstehende Wurzelbild oftmals die Schichtgrenzen im Boden bzw. des Bettungsmaterials von Ver- bzw. Entsorgungsleitungen wider (vgl. Abb. 4 A und B). Teilweise waren die Wurzeln parallel zu den Leitungen bzw. entlang der äußeren Rohroberfläche sowohl von Ent- (vgl. Abb. 4 A) als auch von Versorgungsleitungen (vgl. Abb. 4 B) gewachsen.

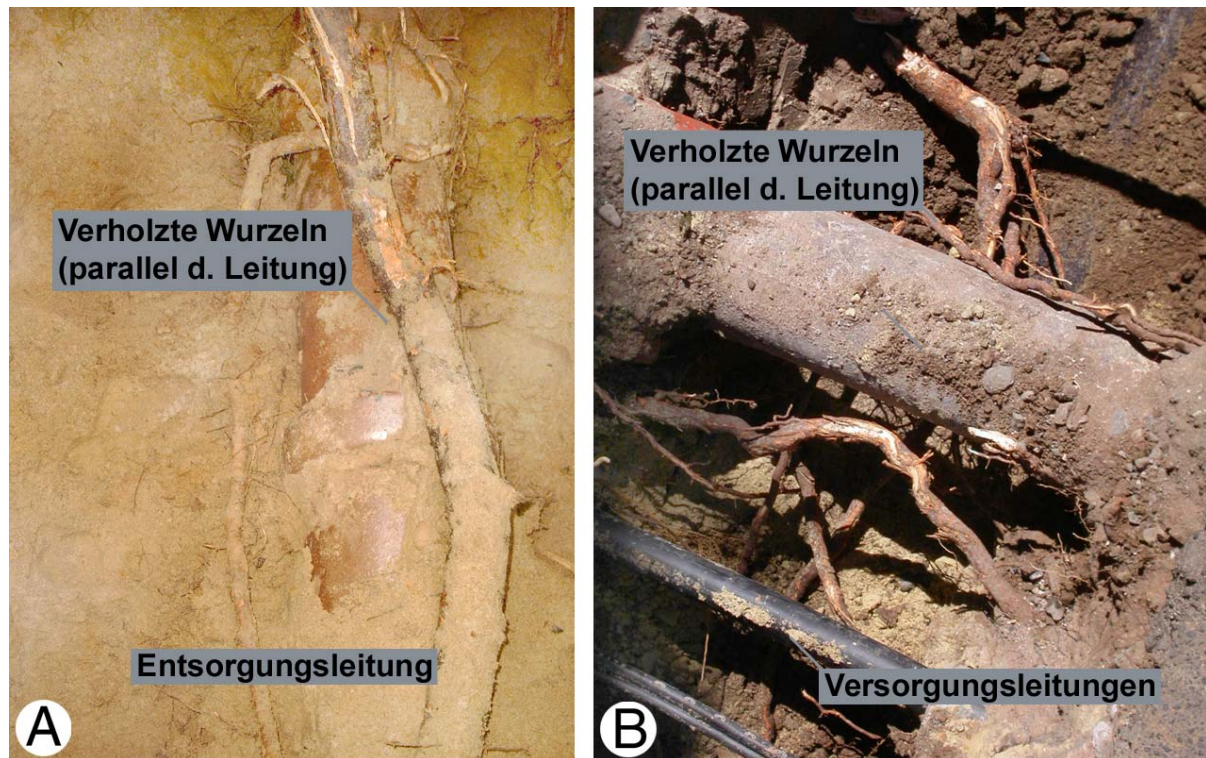


Abb. 4 Die Ausbreitung von Wurzeln im Bettungsmaterial einer Leitung ist unabhängig von der Art der Leitung. **A** Im Bettungsmaterial einer Mischwasserleitung sind verholzte Wurzeln parallel zur Leitung gewachsen. **B** Verholzte Wurzeln breiten sich ebenfalls im Bettungsmaterial von Versorgungsleitungen aus.

Bei Abwasserleitungen wurden verholzte Wurzeln freigegeben, die entlang der Rohrleitung im sogenannten Zwickelbereich von Rohrverbindung zu Rohrverbindung gewachsen waren. Die Räume (Ringraum) und Spalten (Ringspalt) vor dem Dichtmittel der Rohrverbindungen wurden in der Regel durch ein dichtes Wurzelpolster ausgefüllt. Die Wurzeln wachsen über mehrere Jahre in diesen Räumen, bis diese komplett ausgefüllt sind. In der Folge durchdringen die Wurzeln das Dichtelelement und wachsen in den Querschnitt der Leitung ein. Dort bilden Sie in Abhängigkeit vom Leitungsmedium in ihrer Größe und Position unterschiedlich ausgeprägte Abflusshindernisse aus (Abb. 5 A und B). Der Einwuchs erfolgt hier oberhalb des durchschnittlichen Füllstandes und nicht im Sohlenbereich (Abb. 5 A). Das primäre Ziel scheint also nicht der Kontakt mit dem Abwasser zu sein.

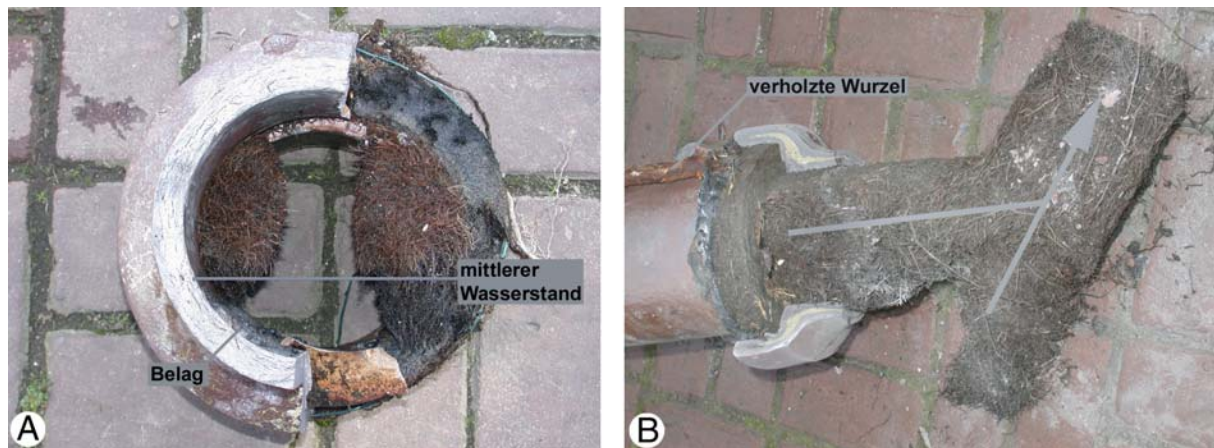


Abb. 5 Die Ausbreitung von Wurzeln in einer Leitung variiert mit der Art des Leitungsmediums. **A** In Mischwasser- bzw. Schmutzwasserleitungen wachsen Wurzelpolster hauptsächlich in Bereichen, die nicht oder nur selten mit Abwasser in Kontakt kommen (oberhalb des mittleren Wasserstandes). **B** In Regenwasserleitungen breiten sich die Wurzeln auch in wasserführenden Bereichen (Sohle der Leitung) aus.

Ergänzend ist anzumerken, dass Nährstoffe bzw. eine nährstoffreiche Umgebung nicht als treibende Kraft für das Einwachsen von Wurzeln in Abwasserleitungen anzusehen sind. Wurzeln folgten bei den untersuchten 16 Schadensfällen nicht oder nicht primär einem Tropismus, der vom Leitungsinhalt ausgeht und sie dazu veranlasst in eine Leitung einzuwachsen. In diesem Fall wären die Wurzeln an einer Stelle eingewachsen, an der das Leitungsmedium austritt, der Rohrsohle. Die Wurzeln sind allerdings bei den beobachteten Schadensfällen in der Regel nicht durch die Kanalsohle in die Leitung eingewachsen. Wurzeln in der Nähe von Leitungen wachsen vielmehr in Bodenbereichen, die gering verdichtet sind und dadurch ausreichende **Porenräume** aufweisen. Wurzeln wachsen nicht aus solchen Bereichen heraus, sondern folgen dem Verlauf von Leitungen. Wachstum von Wurzeln tritt darüber hinaus meist neben Leitungen im **Zwickelbereich** auf. In diesem Leitungsbereich liegt bei Einbau der Leitung in offener Bauweise in der Regel die geringste Verdichtung des Bodens vor.

Dies bestätigen auch Bodenuntersuchungen, die begleitend zu den Baumaßnahmen durchgeführt wurden. Ziel dieser Untersuchungen war es, den Einfluss der Bodenparameter und mögliche Einflüsse auf den Weg der Wurzeln zum Rohr und am Rohr entlang zu erkennen. Dabei wurde auch die Durchwurzelung anderer Bodenbereiche wie z.B. unterhalb der Gehwege in die Betrachtung einbezogen. Da sich die Untersuchungen im Wesentlichen auf zwei Standorte beschränkten, können allgemeingültige Aussagen nur ansatzweise wie folgt abgeleitet werden: Die Bodenarten bei den beiden untersuchten Baumaßnahmen unterschieden sich deutlich. Zum einen waren es lehmige Sande, zum anderen Sande und

schluffige Sande. Die Durchwurzelung erfolgte bevorzugt in reinen Sanden. Ansteigende Schluff- und Tongehalte verringerten die Durchwurzelung. An beiden Standorten waren die Füllböden sehr locker. Besonders ausgeprägt war dies im Nahbereich der Rohre. Dadurch wurde besonders der Anteil sehr grober Poren erhöht. Dies führte zu einem starken Wurzelwachstum. Ein möglicher Ansatzpunkte für eine Begrenzung des Wurzelwachstums in Füllböden von Rohrleitungsgräben wäre somit die stärkere Verdichtung der Füllböden in Rohrnähe oder die Verwendung von Materialien, die von sich aus über ein geringes Porenvolumen verfügen.

Bei den hier untersuchten Schadensfällen wurden alle Beschädigungen durch bedecktsamige Bäume (Laubbäume) verursacht. Der Einwuchs von Wurzeln nacktsamiger Bäume (Nadelbäume) konnte in keinem Fall festgestellt werden. Die Ursachen für das andere Verhalten von Nadelgehölzen sind bisher unklar.

4 Pflanzversuche und Wurzeldruck

Die bei den Aufgrabungen gewonnenen Erkenntnisse lassen darauf schließen, dass die Struktur des Bettungsmaterials einen Einfluss auf die Ausbreitung von Wurzeln haben kann. Zur Überprüfung dieser Hypothese wurden **Kulturversuche** mit Wurzeln in unterschiedlichen **Wuchssubstraten** durchgeführt (Kapitel 4.1). Bei diesen Versuchen wurde die Reaktion von Wurzeln bei Wachstum an den Grenzen zweier unterschiedlicher Böden untersucht.

Daneben kommen Wurzeln bei Wachstum in Leitungen mehr oder weniger stark mit dem Leitungsinhalt in Kontakt. Grundsätzlich wird angenommen, dass das Wachstum von Wurzeln durch Abwasser angeregt bzw. die Wuchsrichtung der Wurzeln beeinflusst wird. Zur Untersuchung dieser Annahmen wurden **Kulturversuche** mit Wurzeln in simuliertem **Abwasser** und im **Frischwasser** unter reproduzierbaren Bedingungen durchgeführt (Kapitel 4.2). Die Wurzeln der kultivierten Pflanzen wurden mikroskopisch auf Schäden und Veränderungen untersucht und mit Hilfe einer Luft- bzw. Sauerstoffquelle im Kulturmedium der Einfluss von Sauerstoff auf die Ausrichtung des Wurzelwachstums beobachtet.

Als Versuchspflanzen wurden in allen Fällen Weiden (*Salix sachalinensis*) verwendet, da sie ein schnellwachsendes und ausdauerndes Wurzelsystem besitzen und problemlos aus Stecklingen herangezogen werden können.

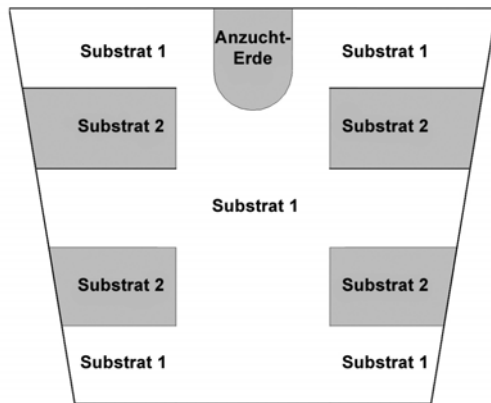
Um Hohlräume im Boden für weiteres Wachstum zu erschließen, können Wurzeln diese auch aktiv erweitern. Die hierfür notwendigen Kräfte bzw. Spannungen entstehen während des Dickenwachstums. Da diese Wachstumsprozesse auch auf Rohrverbindungen wirken können, wurden die durch Wurzelwachstum entstehenden Spannungen bzw. Kräfte anhand von **Druckmessungen an Primärwurzeln** (Kapitel 4.3) erfasst.

4.1 Verhalten von Wurzeln in unterschiedlichen Substraten

Für diese Kulturversuche wurde eine künstliche Schichtung von zwei Substraten mit unterschiedlichen Porenräumen in Pflanzgefäßen angelegt. Als Substrat mit hohem Porenanteil und guter Durchwurzelbarkeit wurde Komposterde ausgewählt. Für die Herstellung von Bodenbereichen mit geringem Porenanteil wurde Bentonit eingesetzt, einem Tonmineral mit einer mittleren Partikelgröße von 0,063 mm und einer Korndichte von $2,65 \text{ g/cm}^3$. Im eingebauten Zustand kann die Dichte zwischen $0,8 \text{ g/cm}^3$ (Schüttdichte) und $2,39 \text{ g/cm}^3$ (Dichte im Anlieferungszustand) variieren [16]. Die geringe Partikelgröße hat zur Folge, dass die für das Wachstum von Wurzeln notwendigen Porenräume mit einer Größe ab

100 μm nicht auftreten [17]. In das Material aufgenommenes Wasser kann aufgrund der hohen Saugspannung des Bentonits nicht von den Wurzeln aufgenommen werden.

Die Substrate wurden in horizontalen Schichten wechselweise um eine zentrale Säule aus einem der Substrate eingebracht (Abb. 6 A).



A



B

Abb. 6: Schichtung der Wuchssubstrate. **A** Schematischer Längsschnitt durch ein Pflanzgefäß. **B** Seitlich geöffnetes Pflanzgefäß. In den Schichten aus Bentonit sind keine Wurzeln zu erkennen.

Gemäß der Annahme, dass der Porenraum eines Substrates das Wurzelwachstum beeinflusst, sollten die Bentonit-Bereiche frei von Wurzeln bleiben.

Nach dem Öffnen der Kulturgefäße befanden sich die Wurzeln wie erwartet nur in den Schichten aus Komposterde. In den Schichten aus Bentonit waren keine Wurzeln zu erkennen (Abb. 6 B und Abb. 7). Die Feuchtigkeit der Bentonitschichten war im Gegensatz zur Komposterde hoch. Die obere Bodenschicht war stark durchwurzelt, hier traten hauptsächlich feine Wurzeln bis 1,5 mm Durchmesser auf. Im zentralen Bereich aus Bentonit durchziehen mehrere deutlich verholzte Wurzeln (Durchmesser über 1,5 mm) das Pflanzgefäß in Längsrichtung.



Abb. 7: Geöffnetes Pflanzgefäß, Wurzeln mit Wasser freigespült. Die Wurzeln sind nicht in das Bentonit gewachsen.

Insbesondere die untere Bodenschicht des Gefäßes war stark durchwurzelt (Abb. 8). Die verholzten Wurzeln auf dem Boden des Pflanzgefäßes sind vom Zentrum aus zum Rand gewachsen. Die Wurzeln haben sich entlang der Gefäßwände bzw. des -bodens ausgebreitet. Bei einigen Wurzeln waren die Spitzen bzw. der Bereich 2-3 cm in Richtung der Wurzelbasis stark verdickt (Abb. 8). Derartig ausgebildete Wurzelspitzen traten vornehmlich an Stellen auf, an denen die Wurzeln bei Wachstum Kontakt mit der Wand oder dem Boden des Gefäßes hatten. Die Kontaktfläche zwischen Boden und Kulturgefäß scheint einen besonderen Einfluss auf das Wurzelwachstum zu haben.



Abb. 8: Seitlich geöffnetes Pflanzgefäß von unten. Am Boden des Pflanzgefäßes sind verholzte Wurzeln zu erkennen.

4.2 Verhalten in simuliertem Abwasser und im Frischwasser

Die Wurzeln der Versuchspflanzen wurden in diesem Versuch in Schmutzwasser mit unterschiedlicher Zusammensetzung bzw. in sauberem Wasser kultiviert.

Zur Simulation einer **starken organischen Verschmutzung**, die eine stark Sauerstoff zehrende Umgebung zur Folge hat, wurde verdünnter **Schwemmist** aus der landwirtschaftlichen Schweinehaltung als Wachstumsmedium eingesetzt. Die Weiden wurden in Reagenzgläsern kultiviert. Ein Teil der Pflanzen wurde mit Hilfe von Pressluft belüftet. Zur Simulation einer **starken Verunreinigung mit anorganischen bzw. chemischen Bestandteilen** wurde verdünntes **Restwasser aus einer häuslichen Hebeanlage** benutzt. Darüber hinaus wurden gleichartige Pflanzen in **belüftetem und unbelüftetem Leitungswasser** kultiviert.

Bei Querschnitten von Wurzeln, die in Wasser gewachsen sind, umschließt das Abschlussgewebe das Organ als durchgehende Schicht (Abb. 9). Der Bereich der Rinde besteht aus regelmäßig angeordneten Zellen. Schädigungen durch die Kultur im Wasser ohne Belüftung werden nicht deutlich. Die starke Rotfärbung im Vergleich zu den folgenden Abbildungen kann mit einer zu großen Dauer der Safraninfärbung bei diesem Objekt begründet werden. Die Querschnitte von Wurzeln, die in Wasser gewachsen sind und belüftet wurden, zeigen, dass die Gewebe und Zellen regelmäßig angeordnet sind (Abb. 10). Abschluss- und Leitgewebe sind intakt und vorhanden. Es treten keine nachweisbaren Schädigungen auf.

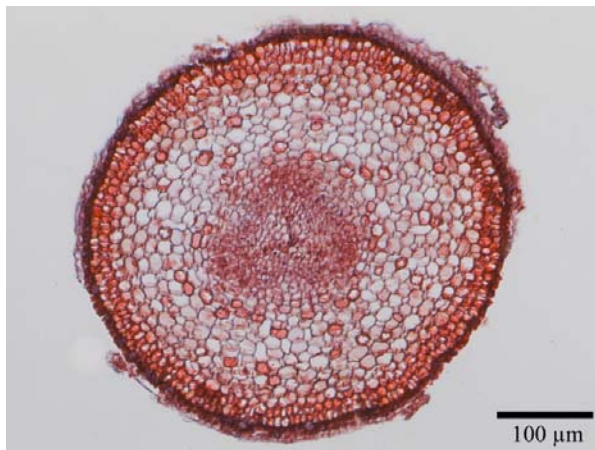


Abb. 9: Querschnitt einer Wurzel, nach Kultur in Wasser, ohne Luft.

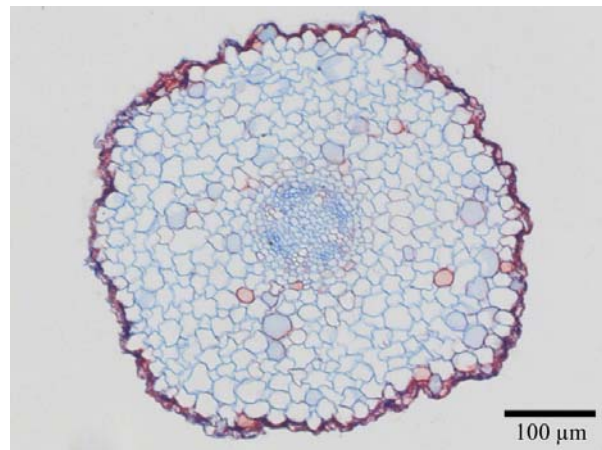


Abb. 10: Querschnitt einer Wurzel, Kultur mit Luft, in Wasser.

Bei Querschnitten von Wurzeln, die ohne Belüftung in Schwemmmist kultiviert wurden, haben die Zellen der Rinde teilweise den Kontakt zum Abschlussgewebe verloren (Abb. 11). In der Wurzel befanden sich daher zusammenhängende Hohlräume, die das Organ in Längsrichtung durchzogen haben. Die Struktur der Wurzeln, die ohne Belüftung in Schwemmmist kultiviert und belüftet wurden, war verändert. Der Querschnitt von Versuchspflanzen, die in einem stark Sauerstoff zehrenden Kulturmedium bei gleichzeitiger Belüftung kultiviert wurden (Abb. 12), zeigt eine regelmäßige Anordnung von intakten Geweben und Zellen. Sowohl Abschluss- als auch Leitgewebe waren vollständig erhalten. Die Wurzeln ließen kein Anzeichen einer Schädigung erkennen.

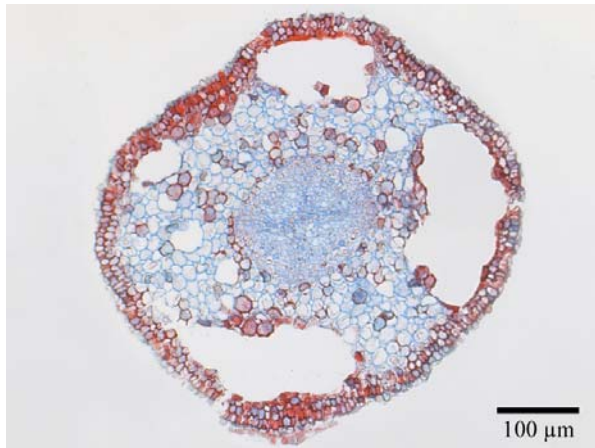


Abb. 11: Querschnitt einer Wurzel, Kultur ohne Luft, in Schwemmist 1: 10 verdünnt.

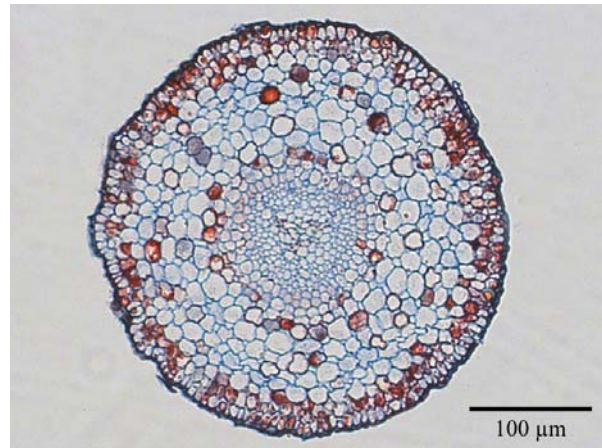


Abb. 12: Querschnitt einer Wurzel einer Versuchspflanze, die in Schwemmist 1:10 verdünnt (belüftet) kultiviert wurde.

Wurzeln, die in simuliertem Abwasser mit hoher chemischer Verunreinigung kultiviert wurden, zeigen deutlichere Schädigungen als die Wurzeln, der in den anderen Medien kultivierten Pflanzen. Im Querschnitt ist zu erkennen, dass hier die Zellen unregelmäßiger angeordnet sind (Abb. 13). Diese Wurzel ist im Umfang weniger rund als die, die in den anderen Medien gewachsen sind. Die einzelnen Zellen sind zum Teil kollabiert. Ihre Zellwände wirken aufgelöst. Die Zellwände der Wurzeln, die ohne Belüftung im Waschmaschinenabwasser kultiviert wurden, sind nur gering verholzt. Pflanzen, die in Waschmaschinenabwasser bei Belüftung kultiviert wurden zeigen einen regelmäßigen Gewebeaufbau (Abb. 14). Das Abschlussgewebe umgibt die Wurzel als zusammenhängende Zellschicht. Die Zellen der Rinde haben eine regelmäßige Form, sie sind im Querschnitt annähernd kreisförmig. Die Endodermis ist nicht als zusammenhängender Ring von Zellen zu erkennen. Die zentralen Leitelemente sind im Querschnitt nicht regelmäßig angeordnet. Die Zellen sind gegeneinander verschoben.

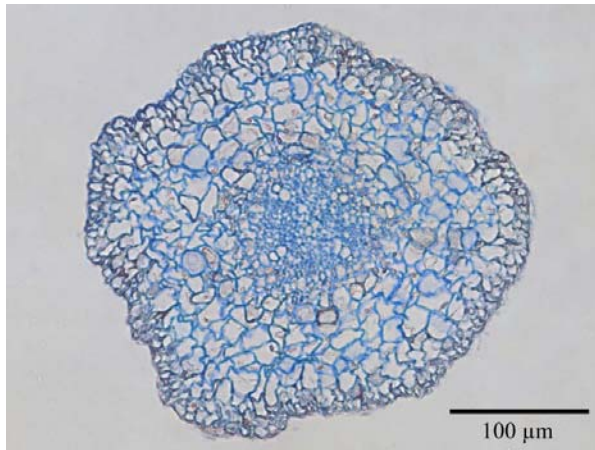


Abb. 13: Querschnitt einer Wurzel, die in Abwasser aus einer privaten Hebeanlage 1:10 verdünnt ohne Zufuhr von Luft kultiviert wurde.

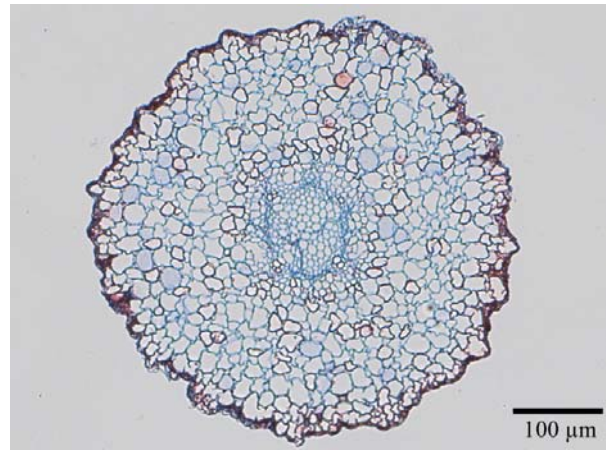


Abb. 14: Querschnitt einer Wurzel, die in Abwasser aus einer privaten Hebeanlage 1:10 verdünnt mit Zufuhr von Luft kultiviert wurde.

Zusammenfassend kann gefolgert werden, dass Abwasser die Wurzeln schädigt und den Wurzelwuchs einschränkt. Sauerstoff im Wasser bzw. Abwasser konnte nicht als Reiz für gerichtetes Wurzelwachstum erkannt werden. Die Wurzeln haben sich in allen Kulturmedien ungerichtet in den Gefäßen ausgebreitet.

4.3 Messung des von Wurzeln erzeugten Druckes

Wurzeln können aktiv Hohlräume im Boden erweitern. Die hierfür notwendigen Kräfte bzw. Spannungen entstehen während ihres Dickenwachstums. Um die durch Wurzelwachstum im Boden entstehenden Spannungen bzw. Kräfte zu erfassen, wurden Druckmessungen an Primärwurzeln von Erbsen (*Pisum sativum*) durchgeführt. Die Wurzeln wachsen im Versuch in konisch zulaufenden Aussparungen einer Gipsplatte und können mit fortschreitendem Dickenwachstum Druck gegen eine Druckmessfolie [18] aufbauen (Abb. 15 A). Die entstehenden Spannungen werden dabei zeitlich und über die Angriffsfläche verteilt erfasst. Abb. 16 zeigt die Druckverteilung zu fünf Zeitpunkten während der Messung.

Grundsätzlich konnte festgestellt werden, dass durch das Wachstum von Wurzeln mechanische Druckspannungen in radialer Richtung wirken können. Im hier untersuchten Fall (*Pisum sativum*, Erbsen) konnten an einzelnen Stellen über wenige Stunden bis zu 5,9 bar gemessen werden. Über längere Zeiträume wurde ein Maximaldruck von ca. 5 bar beobachtet.

Die untersuchten Wurzeln stellen Primärwurzeln dar, diese enthalten nur geringe Anteile verholzten Gewebes. Es ist denkbar, dass bei einer vergleichbaren Messung an verholzten, mehrjährigen Wurzeln im Falle einer Quellung höhere Messwerte aufgenommen werden.

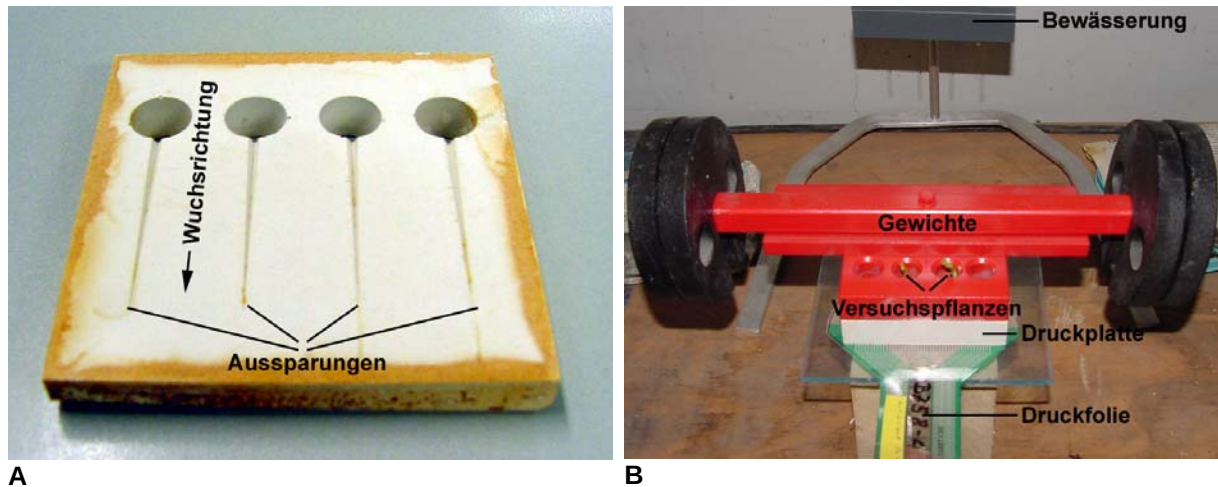
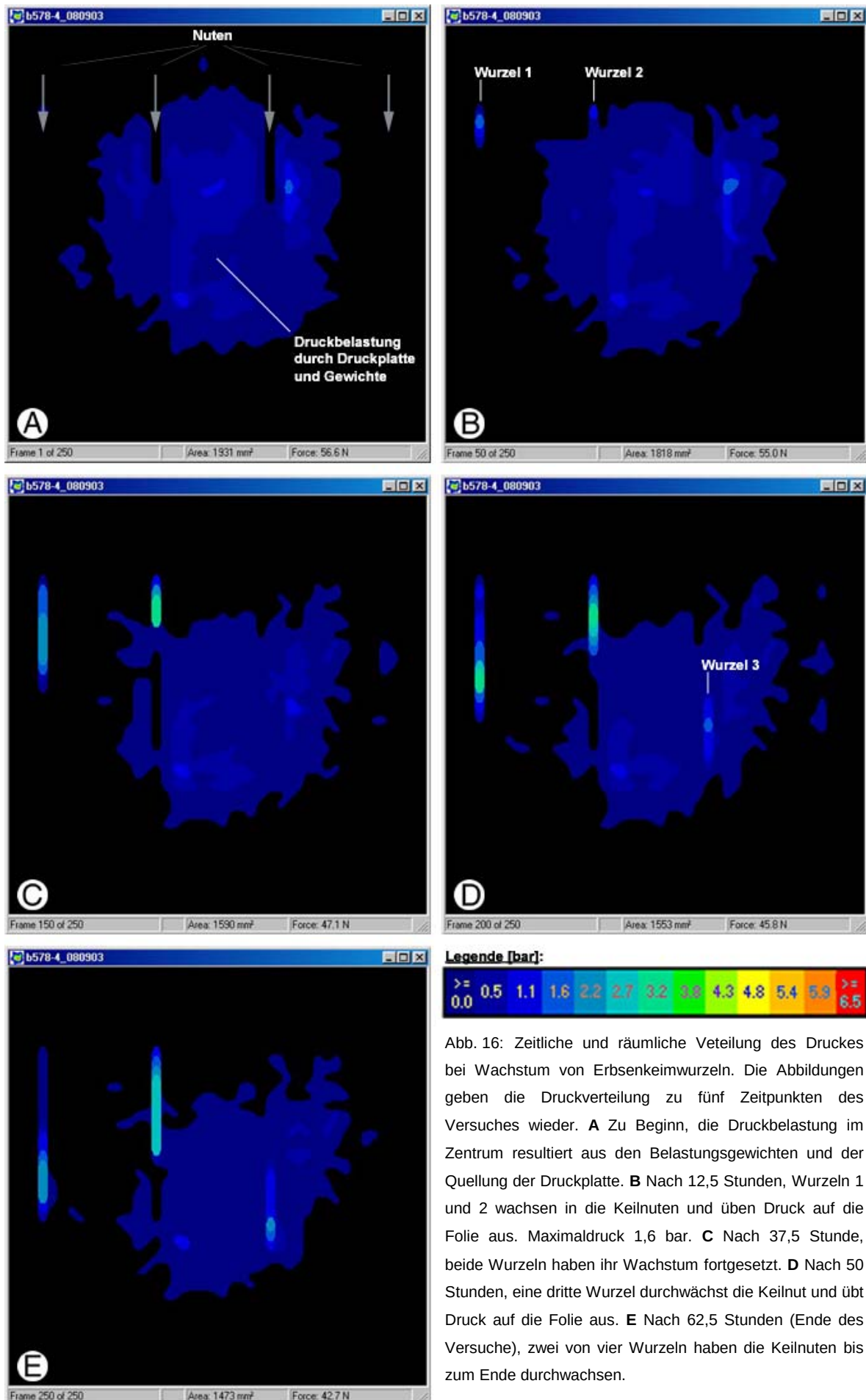


Abb. 15: Versuchsaufbau für Druckmessungen an Wurzeln. **A** Druckplatte aus Gips. Die braune Färbung wird durch Oxidation der Gussform ausgelöst, die als äußere Begrenzung bei Herstellung der Platten eingesetzt wurde. Sie hat keine Auswirkungen auf den Verlauf der Versuche. **B** Versuchsaufbau zur Messung des Wurzeldruckes. Es sind zwei Versuchspflanzen erkennbar.



5 Rohrverbindungen und Anpressdruck

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden 11 Rohrverbindungen ausgewählt, um ihren geometrischen Aufbau und die aktivierbaren Anpressdrücke näher zu untersuchen. Die Betrachtung beschränkte sich grundsätzlich auf Rohre, die vorwiegend im Bereich der Grundstücksentwässerung eingesetzt werden (ca. DN 150). Rohre kleiner Nennweite verstopfen bei Wurzeleinwuchs vergleichsweise schnell und stellen daher einen Problemschwerpunkt dar. Darüber hinaus existieren hier zahlreiche unterschiedliche Verbindungssysteme, die mit einem ähnlichen Versuchsaufbau untersucht werden können.

In der Regel wurden die Rohrverbindungen aufgeschnitten, um den Verbindungsquerschnitt sichtbar zu machen und so die Funktionsweise beschreiben zu können. Fünf unterschiedliche Rohrverbindungen wurden weitergehend untersucht. Zum einen wurde mit Hilfe drucksensitiver Folien (Druckfolien) die Anpressdruckverteilung der eingebauten Elastomerdichtungen bestimmt. Zum anderen wurden die Anpressflächen aus Querschnittsbildern ermittelt. Die betrachteten Rohrverbindungssysteme und die durchgeführten Untersuchungen sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Untersuchungen an Rohrverbindungen, Art und Umfang

Rohrverbindung	Hersteller	Geometrie	Anpressdruckverteilung
<i>Keramik- / Steinzeugrohre</i>			
Cerafix, Steckmuffe L	Deutsche Steinzeug GmbH	X	x
Eurotrad, Steckmuffe L	Euroceramic GmbH	X	x
Eurotop, Überschiebkuppl.	Euroceramic GmbH	X	x
Benor, Steckmuffe L	Benor (belgische Herstellung)	X	
<i>Rohre aus PVC</i>			
KG-Rohr, Lippendichtung	Pipelife GmbH & Co. KG	X	x
Connex®- Dichtsystem	Funke Kunststoffe GmbH	X	
<i>Rohre aus duktilem Gusseisen</i>			
Tyton®-Verbindung	Saint-Gobain-Gussrohr GmbH	X	x
<i>Rohre aus GfK</i>			
FWC-Kupplung	Hobas Rohre GmbH	X	
<i>Rohre aus Polyethylen</i>			
Rehau Awadukt	Rehau GmbH	X	
Friatec Schweißverbindung	Friatec GmbH	X	
<i>Rohre aus Beton</i>			
Dreikammerdichtung	DS-Dichtungstechnik	X	

In allen Fällen wurden zusammengefügte Rohrverbindungen längs aufgeschnitten. Abb. 17 zeigt die 5 Beispiele, für die auch eine Messung des Anpressdrucks durchgeführt wurde. Die Anpressflächentiefe wurde zunächst optisch abgeschätzt sowie die Größe des Ringspaltes, Ringraumes und Zwickels vor dem Dichtelement bestimmt (vgl. Abb. 18). In Einzelfällen kam es aufgrund der Schnittführung (Kreisringöffnung) auch zu nicht realistischen Verformungsbildern (vgl. Abb. 17 B).

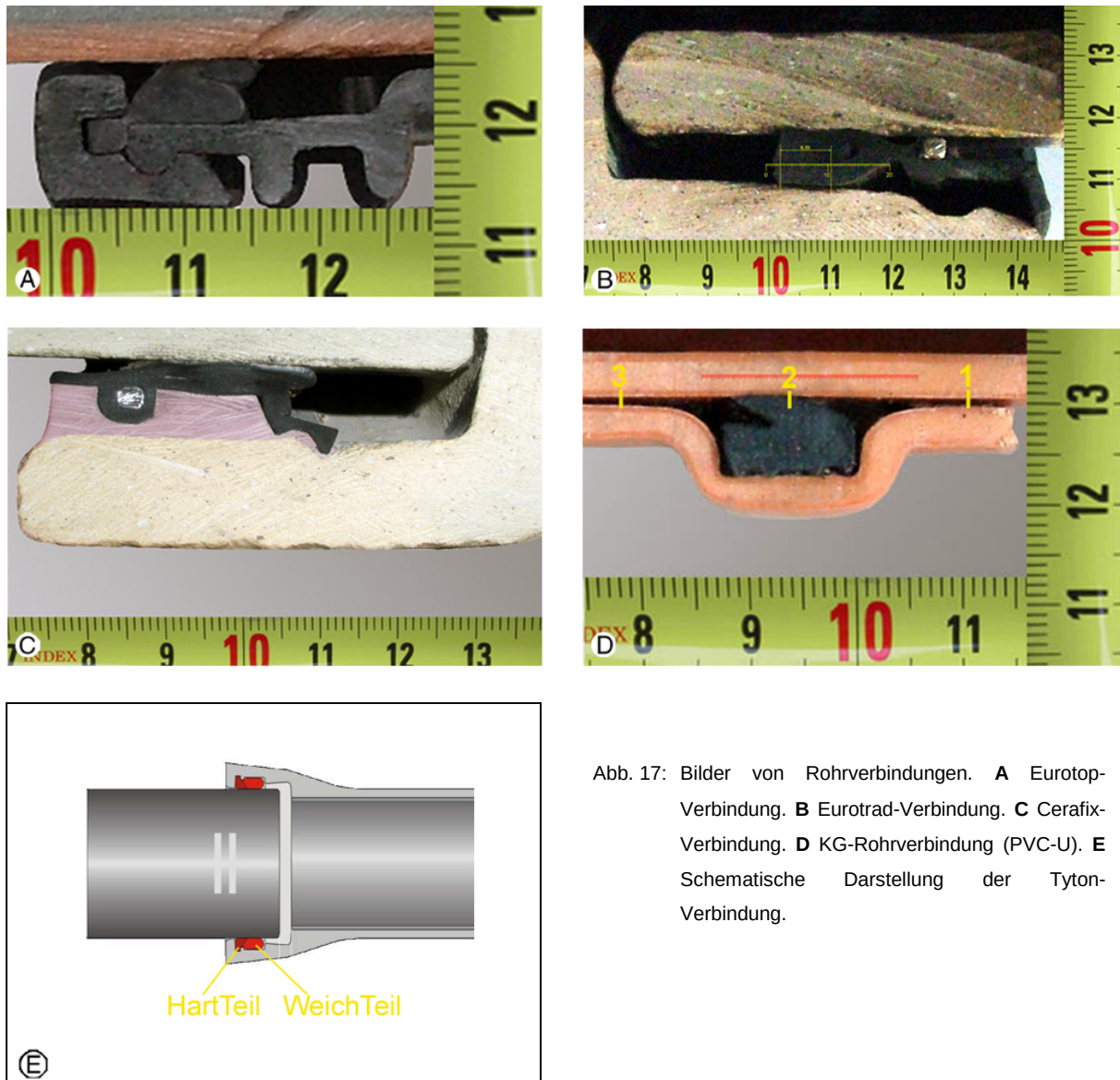


Abb. 17: Bilder von Rohrverbindungen. **A** Eurotop-Verbindung. **B** Eurotrad-Verbindung. **C** Cerafix-Verbindung. **D** KG-Rohrverbindung (PVC-U). **E** Schematische Darstellung der Tyton-Verbindung.

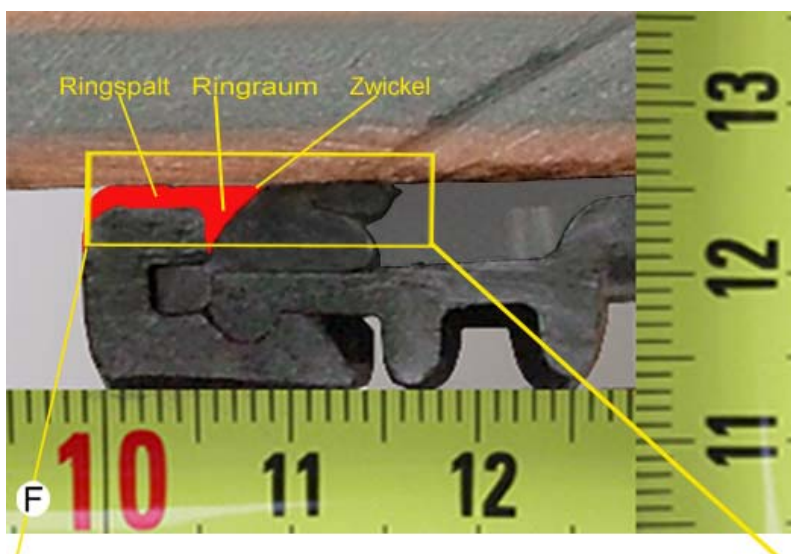


Abb. 18: Bestimmung der Dichmittelgeometrie durch optischen Vergleich [mm].

Für die Bestimmung der Anpressdrücke sowie der korrespondierenden Dichtflächen wurden die mit Druckfolien [18] bestückten Rohrverbindungen in einem für Rohrquerschnitte bis ca. DN 150 konzipierten Scherlastversuchsstand untersucht (Abb. 19 C). Die Position der Druckfolie ist in Abb. 19 A und B dargestellt. Eine in den Scherlastversuchsstand eingebaute Rohrverbindung mit Druckfolie zeigt Abb. 19 C. Die Druckfolien wurden auf dem Spitzende befestigt, in die Muffe eingeschoben und in den Scherlastversuchsstand eingebaut und nehmen ausschnittsweise die im Kreisring wirkende Anpressdruckverteilung zwischen Spitzende und Elastomerdichtung auf. Die Anpressflächentiefe wird mit einer Auflösung von $\pm 2,54$ mm gemessen und ergibt sich aus der Summe aller Messzellen, die den messbaren Schwellenwert von 0,1 bar überschreiten.

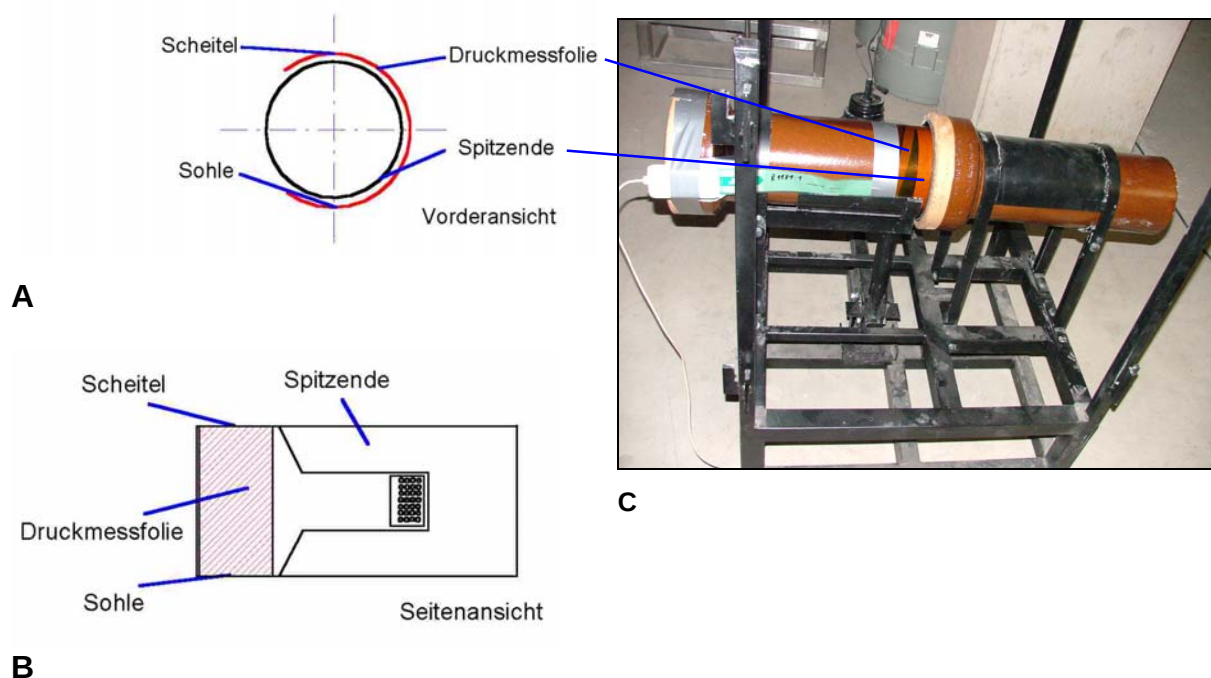


Abb. 19: Messung des Anpressdruckes bei Einwirken einer Scherlast. **A** Druckfolie auf dem Spitzende einer Rohrverbindung, Querschnitt. **B** Druckfolie auf dem Spitzende einer Rohrverbindung, Ansicht. **C** In den Scherlastversuchsstand eingebaute Rohrverbindung.

Der an einer Stelle des Rohrumfangs über die Anpressflächentiefe maximal messbare Anpressdruck wird als „maßgeblicher Anpressdruck“ definiert, da er von einer einwachsenden Wurzel an dieser Stelle des Rohrumfangs mindestens überwunden werden muss. Als kritische Bereiche der Rohrverbindung sind dann diejenigen Bereiche des Rohrumfangs zu bewerten, an denen der maßgebliche Anpressdruck vergleichsweise gering ist.

Im Versuch wurden je Verbindungstyp jeweils eine einzelne Rohrverbindung stufenweise mit Scherlasten bis zu den in den jeweiligen Rohrnormen geforderten Scherlasten F_S beaufschlagt.

Die Messdaten wurden insbesondere hinsichtlich der Anpressdruckverteilung, kritischen Verbindungsbereichen und maßgeblichen Anpressdrücke bzw. Anpressflächentiefen ausgewertet. Die Anpressdruckverteilung im scherlastfreien Zustand ist für die untersuchten Verbindungen in Abb. 20 dargestellt, die Anpressdruckverteilung unter den nach Norm geforderten maximalen Scherlasten in Abb. 21.

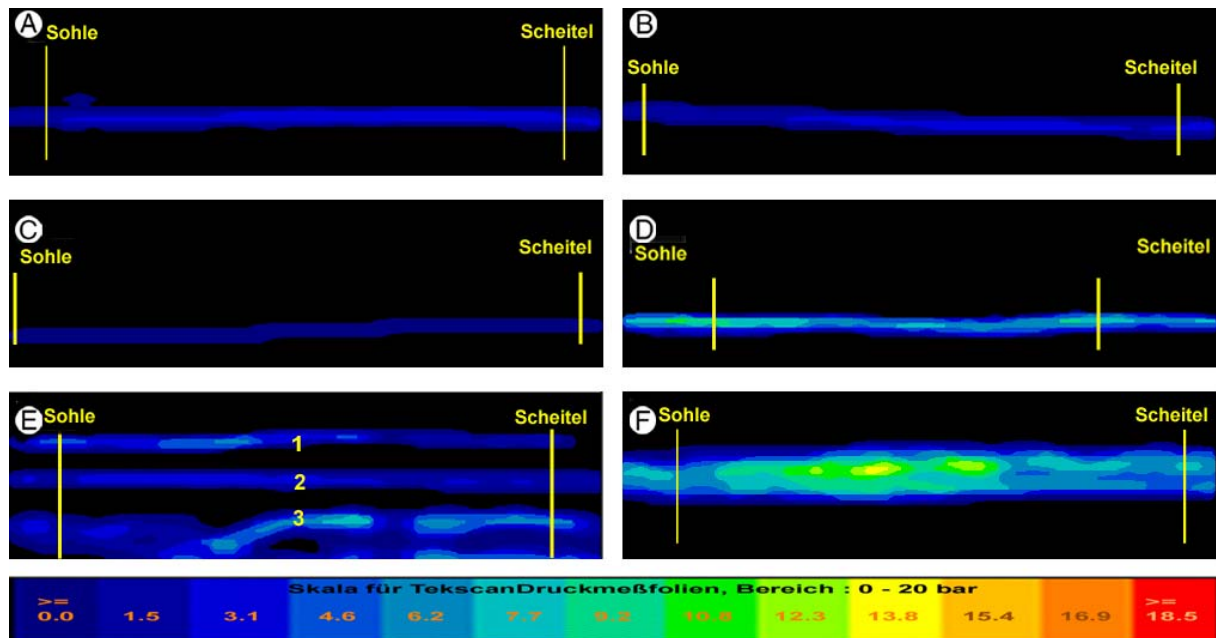


Abb. 20: Anpressdruckverteilung unterschiedlicher Rohrverbindungen ohne Scherlast. **A** Eurotop-Verbindung, Versuch ohne Scherwegbegrenzung. **B** Eurotop-Verbindung, Versuch mit Scherwegbegrenzung. **C** Eurotrad-Verbindung. **D** Cerafix-Verbindung. **E** KG-Rohrverbindung (PVC-U). **F** Tyton-Verbindung.

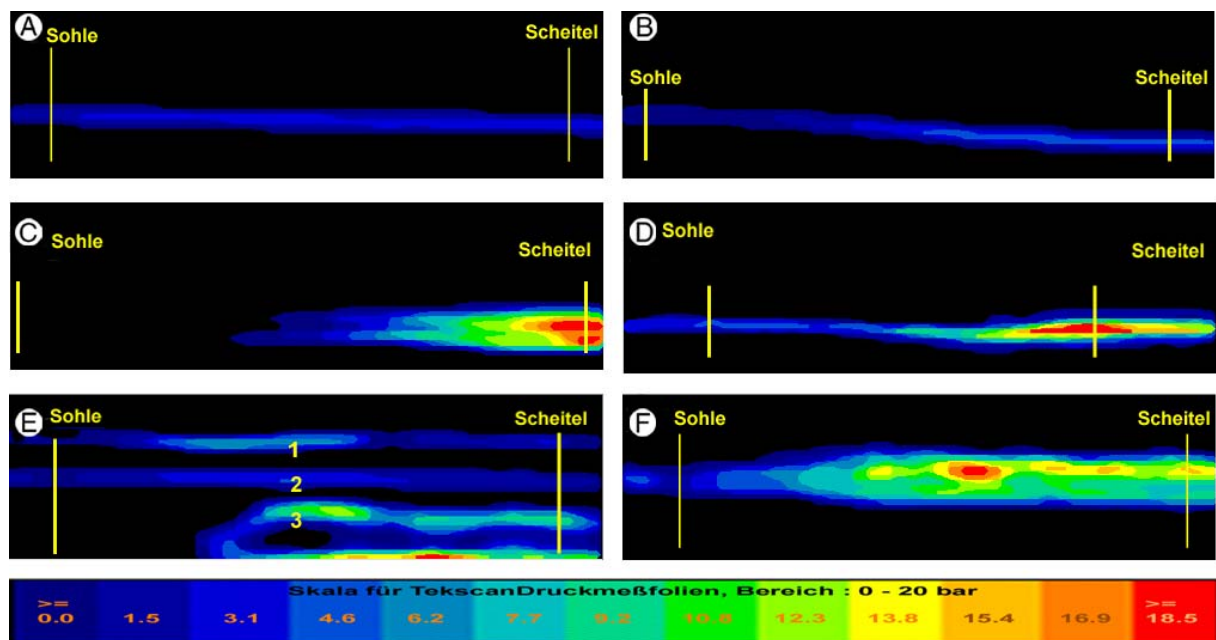


Abb. 21: Anpressdruckverteilung unterschiedlicher Rohrverbindungen unter maximaler Scherlast. **A** Eurotop-Verbindung ohne Schwerwegbegrenzung. $F_s = 3750$ N **B** Eurotop-Verbindung mit Schwerwegbegrenzung. $F_s = 3750$ N **C** Eurotrad-Verbindung. $F_s = 3750$ N **D** Cerafix-Verbindung. $F_s = 3750$ N **E** KG-Rohrverbindung (PVC-U). $F_s = 1539$ N **F** Tyton-Verbindung. $F_s = 4500$ N.

Ohne Scherlasteinfluss ist für alle geprüften Rohrverbindungen über den gesamten Rohrumfang eine messbare Anpressdruckverteilung festzustellen. Allerdings wurde nur in zwei Fällen (Cerafix- und Tyton-Verbindung) der Schwellenwert von 5 bar über den gesamten Rohrumfang nahezu erreicht oder sogar überschritten. Auffällig ist die Druckübertragung an der PVC-Rohrverbindung, bei der auch die Mantelflächen von Glocken- und Spitzende durch unmittelbaren Kontakt (Zonen 1 und 3) Druckspannungen übertragen. Unter Scherlast kommt es erwartungsgemäß in fast allen Fällen zu einer Entlastung im Sohlbereich. Lediglich in der PVC-Rohrverbindung kam es aufgrund der mehrflächigen Druckübertragung nur zu geringen Druckumlagerungen im Dichtungsbereich. Die Cerafix- und Tyton-Verbindung zeigten auch in der Rohrsohle weiterhin hohe Druckspannungen mit Werten deutlich über 1 bar.

Abschließend sei betont, dass es sich bei den dargestellten Untersuchungen zur Anpressdruckverteilung lediglich um beispielhafte Messungen an einzelnen handelsüblichen Rohren handelte. Offen bleibt, inwieweit Schankungen aus der Fertigung einen Einfluss auf die Geometrie und Werkstoffeigenschaften der Rohre und Verbindungsmittel haben können und somit auch die Anpressdruckverteilung beeinflussen. Insbesondere ist eine Wechselwirkung zwischen möglichen und z.T. auch zulässigen Geometrieabweichungen, wie z.B. Ovalisierung, und der Anpressdruckverteilung in der Praxis nicht auszuschließen.

6 Wurzelfestigkeit

Die Erfassung der Wurzelfestigkeit gewinnt eine besondere Bedeutung bei der Bewertung bestehender Verbindungssysteme, der Optimierung von Bauteilentwicklungen sowie der Auswahl und Entwicklung geeigneter Sanierungssysteme. Im Folgenden wird ein möglicher Ansatz zur Beschreibung des Phänomens Wurzelfestigkeit mit Blick auf die in Kapitel 5 und Kapitel 6 der Langfassung dargestellten Verbindungssysteme beschrieben.

Die Wuchsrichtung von Wurzeln und Ausbildung des gesamten Wurzelwerks (Wurzeldicke, Anzahl der Feinwurzeln etc.) wird von unterschiedlichen Faktoren beeinflusst, wie z.B. Bodenarten, Verdichtungsunterschiede und Sauerstoffangebot. Diese Faktoren können sich im Umfeld von Rohren und deren Verbindungen zeitlich und räumlich verändern. Vor diesem Hintergrund und auf Basis der Ergebnisse des Forschungsvorhabens sind dann drei wesentliche Eigenschaften von Rohrverbindungen zur Bewertung ihrer Wurzelfestigkeit zu unterscheiden:

I. Gegendruck:

Das am häufigsten diskutierte Mittel zur Verhinderung von Wurzeleinwüchsen ist der Einsatz mechanisch wirkender Dichtmittel, die eine hohe statische Sicherheit gegen äußere Druckbelastung bieten. Ein Nachweis gegenüber solchen Drücken ist zum einen durch direkte Belastung der Rohrverbindung durch ein von außen wirkendes Medium möglich oder durch Nachweis einer Vorspannung an der kritischen Angriffsstelle, die durch die zu erwartende Druckbelastung nicht überwunden werden kann. Im vorliegenden Fall bieten sich Außendruckprüfungen mit Dichtheitsnachweis (vgl. Abb. 22) bzw. der Nachweis einer geeigneten Anpressdruckverteilung in der Rohrverbindung mit und ohne Scherlastbeanspruchung an (vgl. Kapitel 5).

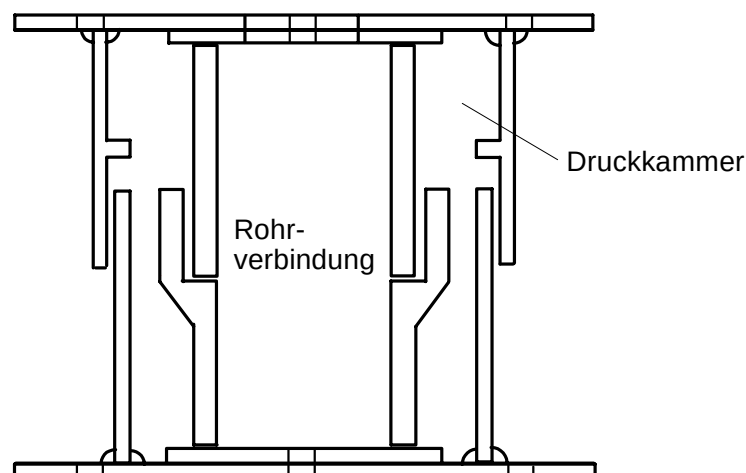


Abb. 22 : Entwurf eines Außendichtheitsprüfgerätes.

II. Abweisende Geometrie:

Die Baustellenuntersuchungen und Pflanzversuche zeigten deutlich, dass luftgefüllte Freiräume das Wachstum der Wurzeln fördern können. Entsprechend kann die Wurzelfestigkeit entscheidend durch die Geometrie der Rohrverbindung und die damit angebotenen bzw. verwehrten Wachstumswege dauerhaft beeinflusst werden. Schon geringe Spaltbildungen in Steckverbindungen können einen Einfallpunkt für feine Haarwurzeln bieten. Große Ringräume unmittelbar vor dem Dichtelement erlauben ein verstärktes Dickenwachstum der Wurzeln bei gleichzeitiger Verspannung in der Rohrverbindung, so dass in der Folge die Dichtung verdrängt und ein Zugang für Sekundärwurzeln geschaffen werden kann. Spitz zulaufende Zwickel der Lippendichtung stellen dann einen maßgeblichen Angriffspunkt dar. Weiterhin konnten bei den Aufgrabungen Unterschiede in der Ausbildung des Wurzelwerkes in Abhängigkeit der Oberflächenstruktur der Rohrwerkstoffes beobachtet werden. Haftungsabweisende Oberflächen scheinen hier ein Weg zur Reduzierung des Einwuchsisikos zu sein.

III. Gasdichtheit:

Aus den bisherigen Untersuchungen kann geschlossen werden, dass die Verfügbarkeit von Sauerstoff für das Wurzelwachstum und Überleben der Pflanze von entscheidender Bedeutung sein kann. Letztlich kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass bei extrem ungünstigen Belüftungsverhältnissen im Boden, eine Sauerstoff-Zufuhr durch gasdurchlässige Rohrverbindungen eine bessere Sauerstoffversorgung und damit einen zusätzlichen Wuchsreiz im Umfeld der Rohrverbindung schafft. Darüber hinaus kann eine Gasdurchlässigkeit der Verbindung auch weitere Undichtigkeiten ankündigen (vgl. [14]).

Betrachtet man vor diesem Hintergrund beispielhaft die im Kapitel 5 bzw. in Kapitel 5 der Langfassung dargestellten Rohrverbindungen, so wird deutlich, dass einige der zur Bewertung notwendigen Prüfungen bereits im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführt wurden. Auf dieser Grundlage konnte ein erster Ansatz zur Bewertung der Wurzelfestigkeit von Rohrverbindungen vorgeschlagen werden, der in der Langfassung des Endberichts anhand von Auswertungsbeispielen dargestellt ist. Auf eine auszugsweise Darstellung wird an dieser Stelle zur Vermeidung von Fehlinterpretationen verzichtet.

7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Das Auftreten von Wurzeleinwuchs wird ingenieurtechnisch häufig auf einen zu geringen Anpressdruck des Dichtungsmittels in der Rohrverbindung zurückgeführt. Biologische Aspekte werden bei der Ursachenfindung nicht berücksichtigt, so dass auch zum Nachweis der Wurzelfestigkeit von Rohrverbindungen nur stark idealisierte mechanische Verfahren eingesetzt werden. Diese vernachlässigen i.d.R. die besonderen Versagensmechanismen aus der Interaktion zwischen Rohrleitung und Wurzeln, so dass auch die Netzbetreiber den bestehenden Prüfverfahren nur ein geringes Vertrauen entgegenbringen. Wiederholt auftretende Einwuchsschäden verstärken diese Verunsicherung der Netzbetreiber bei der Auswahl zuverlässiger Rohrwerkstoffe und –verbindungen. Darüber hinaus fehlen auch den Rohrherstellern zur Entwicklung wurzelfester Rohrverbindungen geeignete Hinweise und Prüfergebnisse.

Vor diesem Hintergrund war es **Ziel** dieses Forschungsvorhabens, die Ursachen für Wurzeleinwuchs in Leitungen wissenschaftlich zu belegen und die Mechanismen bei Eindringen einer Wurzel in die Leitung sowie die Wechselwirkung zwischen Wurzeleinwuchs und Rohreigenschaften zu beschreiben. Darüber hinaus sollten Vorschläge für Prüfverfahren entwickelt werden, die die mechanischen und biologischen Vorgänge bei Wurzeleinwuchs realitätsnaher abbilden, und so Wege aufgezeigt werden, wie Rohrverbindungstechniken hinsichtlich ihrer Beständigkeit gegen Wurzeleinwuchs bewertet werden können. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden in **16 Baumaßnahmen** Leitungsabschnitte mit Wurzelschäden vor Ort aufgegraben, die Umgebungsbedingungen erfasst und Wurzel- bzw. Bodenproben aus den betrachteten Bereichen entnommen und labortechnisch untersucht. Auf Grundlage dieser In-situ-Erfahrungen wurden Modelle zur Beschreibung des **Einwuchsverhaltens von Wurzeln** in Leitungen entwickelt und experimentelle Ansätze zur Überprüfung der beobachteten Gesetzmäßigkeiten und der zu erwartenden **Wurzeldrücke** abgeleitet. Abschließend wurden marktgängige Rohrverbindungen durch Druckspannungsmessungen untersucht und weitergehende **Bewertungskriterien** als Grundlage für die Entwicklung künftiger wurzelfester Rohrverbindungen und Sanierungsprodukte vorgeschlagen. Nachfolgend sind die wesentlichen **Schlussfolgerungen** zusammengefasst.

Einen wesentlichen Einfluss auf das Wurzelwachstum hat der Porenraum im Boden. Wurzeln dienen der Aufnahme von Nährstoffen und Wasser aus dem Boden. Sie erfüllen

ebenfalls die Funktion, die Pflanze im Boden zu verankern. Ungehindertes Wurzelwachstum erfolgt in großen Poren. Dabei wird davon ausgegangen, dass in Poren von größerem Durchmesser als 0,2 bis 0,4 mm Wurzeln eindringen können [19], [20]. Feine Poren werden von Wurzelhaaren durchzogen. Damit der wachsende Organismus seinen Bedarf an Nährstoffen und Wasser über seine gesamte Lebensdauer hinweg decken kann, wächst auch das Wurzelsystem weiter und erschließt sich stetig neuen Bodenraum. Dabei sind Wurzeln, wie alle Pflanzenteile auf eine funktionierende Veratmung (Oxidation) kohlenhydratreicher Verbindungen zur Energieerzeugung angewiesen. Der benötigte Sauerstoff befindet sich in einem natürlichen Bodengefüge in der Bodenluft und kann dort von den Wurzeln aufgenommen werden. Geringe Sauerstoffgehalte in der Bodenluft werden als Auslöser für Wachstumsdepression beschrieben. Auch ein Absterben von Wurzeln konnte beobachtet werden [7].

Insbesondere in anthropogen beeinflussten Stadtböden lassen sich auf engem Raum unterschiedliche Böden mit unterschiedlichen Bodeneigenschaften vorfinden, die das Wurzelwachstum beeinflussen. Ein Grund ist die Nutzung des Bodenkörpers für Bauwerke der unterirdischen Infrastruktur. Das sind zum einen Versorgungsleitungen, die üblicherweise in Tiefen bis zu 1,60 m verlegt werden können (vgl. [9]). Zum anderen befinden sich dort Bauwerke der Ortsentwässerung wie Abwasserkanäle, Hausanschlussleitungen und Straßeneinläufe. Die Herstellung dieser Bauwerke in der offenen Bauweise stellt einen starken Eingriff in den Bodenkörper dar. Sie erfolgt durch Ausheben eines Grabens, Verlegen der Leitung im Schutze einer Böschung oder eines Verbaus und anschließendes lagenweises Verfüllen des Grabens und sorgfältiges Verdichten des eingefüllten Materials. Eine besondere Schwierigkeit stellt die Verdichtung des Bereichs zwischen Kämpfer und Sohle, dem sogenannten Rohrzwickel dar (vgl. Abb. 3). Die bestehenden Schwierigkeiten bei der Verdichtung des Zwickelbereichs haben in der Praxis dazu geführt, dass häufig das einzubauende Bodenmaterial bis auf Höhe des Kämpfers geschüttet und anschließend verdichtet wird. Dies geschieht in der Hoffnung, dass die Bodenverdichtung bis in den Zwickelbereich hineinreicht. Es wird deutlich, dass eine solche Verdichtungsart oftmals nicht den Forderungen des Normen- und Regelwerkes nach einem definierten **Verdichtungsgrad im Zwickelbereich** gerecht wird [21].

Nährstoffe bzw. eine nährstoffreiche Umgebung sind nicht als treibende Kraft für das Einwachsen von Wurzeln in Abwasserleitungen anzusehen. Wurzeln folgten bei den untersuchten 16 Schadensfällen nicht oder nicht primär einem Tropismus, der vom

Leitungsinhalt ausgeht, und sie dazu veranlasst in eine Leitung einzuwachsen. In diesem Fall wären die Wurzeln an einer Stelle eingewachsen, an der das Leitungsmedium austritt, der Rohrsohle. Die Wurzeln sind bei den beobachteten Schadensfällen in der Regel nicht durch die Kanalsohle in die Leitung eingewachsen. Von dieser Annahme ausgehend wurde im Rahmen des Projektes verstärkt das Wachstum der Wurzeln auf eine Leitung zu, in eine Rohrverbindung hinein und durch sie hindurch betrachtet, um so die Wachstumsvorgänge zu erklären. Um die Beobachtungen zu systematisieren wurden verschiedene **Modelle** entwickelt:

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.

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 Jahren wachsen, bevor sie letztendlich in die Leitung einwachsen. Hierfür muss der Anpressdruck des Dichtmittels überwunden werden.

Quellungsmodell:

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 zeitliche Veränderungen des zur Verfügung

stehenden Raumes im Boden kann ein Ausbreiten der Wurzeln beeinflussen. Quell- und Schwindvorgänge können wahrscheinlich auch in verholzten Wurzeln auftreten. 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 Quellungsvorgänge auf. Trifft dieses Modell zu, so tritt der Einwuchs von Wurzeln in Leitungen, die ständig unterhalb des Grundwasserstandes verlegt sind, selten auf.

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. [14]). Die Rohrverbindung und der angrenzende Boden wird dadurch möglicherweise für Wurzeln attraktiv. Wurzeln wachsen gemäß diesem Modell der Sauerstoffquelle entgegen 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.

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 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.

Zusammenfassend kann festgestellt werden: Das zur Leitung gerichtete Wurzelwachstum ist eine Reaktion auf die Umgebung der Leitung. Aus Leckagen austretendes Abwasser bzw. Nährstoffe sind von untergeordneter Bedeutung. Die Umgebungsbedingungen und Oberflächeneigenschaften des Rohres können den Einwuchs in die Leitung erheblich begünstigen. Erst im zweiten Schritt entscheiden die Rohrverbindungseigenschaften über das Einwuchsrisiko. Eine Behinderung des Wurzeleinwuchses ist dort im Wesentlichen über einen großen Gegendruck (Anpressdruck der Dichtungen) und eine wurzelabweisende Verbindungsgeometrie (geringe Ringräume und Angriffsflächen) möglich. Die Gasdichtheit der Verbindung kann Wachstumsreize weiter vermindern. Der Einwuchsvorgang lässt sich durch Kombination biologisch-technischer Modelle beschreiben.

8 Fazit und Ausblick

Auf Grundlage der Ergebnisse des Forschungsvorhabens lässt sich das nachfolgende **Fazit für die Praxis** bei Bau, Betrieb und Sanierung von Kanälen ziehen.

Mit Blick auf die **Wurzelfestigkeit von Rohrverbindungen** sind die folgenden Punkte zu beachten:

- Die Baustellenuntersuchungen und Pflanzversuche zeigten deutlich, dass luftgefüllte Freiräume das Wachstum der Wurzeln fördern können. Entsprechend kann die Wurzelfestigkeit entscheidend durch die **Geometrie der Rohrverbindung** und die damit angebotenen bzw. verwehrten Wachstumswege dauerhaft beeinflusst werden. Schon geringe **Spaltbildungen** in Steckverbindungen können einen Einfallspunkt für feine Haarwurzeln bieten. Große **Ringräume** unmittelbar vor dem Dichtelement erlauben ein verstärktes Dickenwachstum der Wurzeln bei gleichzeitiger Verspannung in der Rohrverbindung, so dass in der Folge die Dichtung verdrängt und ein Zugang für Sekundärwurzeln geschaffen werden kann. Spitz zulaufende **Zwickel der Lippendichtung** stellen dann einen maßgeblichen Angriffspunkt dar. Weiterhin konnten bei den Aufgrabungen Unterschiede in der Ausbildung des Wurzelwerkes in Abhängigkeit der Oberflächenstruktur des Rohrwerkstoffes beobachtet werden. **Haftungsabweisende Oberflächen** scheinen hier ein Weg zur Reduzierung des Einwuchsriskos zu sein.
- Aus den bisherigen Untersuchungen kann geschlossen werden, dass die Verfügbarkeit von Sauerstoff für das Wurzelwachstum und Überleben der Pflanze im vorliegenden Fall von entscheidender Bedeutung sein kann. Letztlich kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass bei extrem ungünstigen Belüftungsverhältnissen im Boden, eine Sauerstoffzufuhr durch **gasdurchlässige Rohrverbindungen** eine bessere **Sauerstoffversorgung** und damit einen zusätzlichen Wuchsreiz im Umfeld der Rohrverbindung schafft. Darüber hinaus kann eine Gasdurchlässigkeit der Verbindung auch weitere Undichtigkeiten ankündigen (vgl. [14]).
- Ein verbreitetes Mittel zur Verhinderung von Wurzeleinwüchsen ist der Einsatz mechanisch wirkender Dichtmittel, die eine hohe statische Sicherheit gegen äußere Druckbelastung bieten. Ein Nachweis dieser Sicherheit ist zum einen durch direkte Belastung der Rohrverbindung durch ein von außen wirkendes Medium möglich oder zum anderen durch Nachweis einer Vorspannung der Dichtung, die durch die zu erwartende Druckbelastung nicht überwunden werden kann. Im vorliegenden Fall wird eine

Außenwasserdruckprüfungen (vgl. Abb. 22) bzw. der Nachweis einer geeigneten **Anpressdruckverteilung des Dichtmittels** in der Rohrverbindung empfohlen (vgl. Kapitel 6).

- Eine Möglichkeit, die **Interaktion zwischen Wurzeln und Rohrverbindungen** zu untersuchen, besteht in der Durchführung von **Pflanzversuchen**. Die Beobachtungen können Grundlage für die **Optimierung von Verbindungstechniken und Sanierungsverfahren** sein, da die Rohr-Wurzel-Interaktion bereits im Leitungsgraben an der Rohroberfläche beginnt und sich über die äußere Rohrverbindung und das Dichtmittel bis in das Rohrinne fortsetzt.

Bei **Neubau bzw. Erneuerung von Leitungen** der unterirdischen Infrastruktur sollten mit Blick auf mögliche Einwuchsr Risiken die folgenden Punkte bedacht werden:

- Wurzeln in der Nähe von Leitungen wachsen vornehmlich in Bodenbereichen, die gering verdichtet sind und dadurch ausreichende **Porenräume** aufweisen. Wurzeln wachsen nicht aus solchen Bereichen heraus, sondern folgen dem Verlauf von Leitungen. Wachstum von Wurzeln tritt meist neben Leitungen im **Zwickelbereich** auf. In diesem Leitungsbereich liegt bei Einbau der Leitung in offener Bauweise oftmals die geringste Verdichtung des Bodens vor.
- Es ist denkbar, dass beim Bau von Leitungen das Risiko des Auftretens von Wurzeleinwuchs in Abwasserleitungen und –kanäle durch den Einsatz gezielt ausgewählter (schlecht durchwurzelbarer) **Bettungsmaterialien** minimiert werden kann. Bei der Verlegung von Leitungen in der Nähe von Bäumen bieten sich möglicherweise solche „Wurzelsicherheitszonen“ an.

Für den **Betrieb** von verwurzelten Abwasserleitungen können folgende Aussagen gemacht werden:

- Das Abwasser stellt grundsätzlich keine nennenswerte Nährstoff- oder Wasserquelle für die Wurzeln dar. Wurzeln in **Schmutzkanälen** sterben sogar bei Kontakt mit ihm ab.
- Wurzeln in **Regenwasserkanälen** sind nach Eindringen in die Leitung in ihrem Wachstum behindert, da sie in Trockenperioden infolge des Wassermangels absterben. Allerdings verbleiben die Wurzelreste an demselben Ort, so dass sich in Regenperioden wieder neue Wurzeln mit vergrößerter Wurzelmasse bilden können. Die Wurzelmasse vergrößert sich somit permanent.

- Die mechanische **Entfernung der Wurzeln** ist mit einem Baumschnitt vergleichbar. Aus den abgetrennten Wurzeln entwickeln sich neue Wurzeln, die den Rohrquerschnitt erneut verstopfen können.

Im Rahmen der 16 Aufgrabungen wurden in **zwei Fällen mit Injektionsverfahren** reparierte Abwasserleitungen begutachtet und das Sanierungsergebnis beurteilt. Auf dieser Grundlage können in Anlehnung an die Wachstumsmodelle für Wurzeln (s. Kapitel 7) folgende Aussagen getroffen werden:

- Bei der Sanierung von Leitungen in geschlossener Bauweise mittels Injektionsverfahren werden die Räume zwischen den Rohren bzw. in der Rohrverbindung unter Einsatz eines Spezialgerätes mit einem Injektionsmaterial von innen her ausgefüllt. Das Material wird dabei unter Druck in die Rohrverbindung injiziert. Bei Anwendung solcher Materialien in Rohrverbindungen, in die bereits Wurzeln eingewachsen sind, ist eine entsprechend **geringe Viskosität** des Injektionsmaterials erforderlich.
- Bei verwurzelten Rohrverbindungen, die mit Injektionsverfahren repariert und im Rahmen der Baumaßnahmen ausgegraben und analysiert wurden, war zu beobachten, dass erneut Wurzeln innerhalb der Rohrverbindung nachgewachsen und in den Rohrquerschnitt eingewachsen waren. Die Wurzeln bildeten Polster bzw. Geflechte in der Rohrverbindung und verhinderten die gleichmäßige Ausbreitung des Injektionsmaterials.
- Grundsätzlich müssten die Wurzelpolster bei der Sanierung von dem Injektionsmaterial durchdrungen werden. Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Sanierung mit Injektionsmaterial wäre ein Verfüllen der Hohlräume zwischen den Wurzeln und Versiegeln der Sanierungsoberfläche mit hohem Verspannungsdruck des ausgehärteten Injektionsmaterials. Mit den gegenwärtig am Markt angebotenen Injektionsverfahren und –mitteln ist mit der o.a. Vorgehensweise eine Wurzelfestigkeit der reparierten Rohrverbindung voraussichtlich nicht zu erreichen.
- Bei der Weiterentwicklung von Injektionsmaterialien könnten auch wurzelfeindliche Inhaltsstoffe einen weiteren Ansatzpunkt bieten. Allerdings dürfte es schwierig sein, solche Stoffe zu entwickeln, die nicht zugleich grundwassergefährdend sind.

Aus den entwickelten Modellen zum Wurzelwuchs leiten sich folgende Hinweise zur Optimierung der **Konstruktion von Leitungselementen** ab:

- Die Dichtheit von Steckverbindungen, die üblicherweise für Abwasserleitungen eingesetzt werden, wird maßgeblich durch den Anpressdruck bestimmt, den die Dichtung erzeugt.

Allerdings ist eine Erhöhung des Anpressdruckes bautechnisch durch Handhabbarkeitsanforderungen beim Zusammenführen der Rohre sowie die Rohr- bzw. Rohrwerkstoffeigenschaften (Zugfestigkeit, Stabilität) begrenzt.

- Der tatsächliche Druck des Dichtelements kann von Wurzeln überwunden werden, wenn er kleiner ist als der Wurzeldruck. Voraussetzung für den Angriff des Wurzeldruckes ist ein Widerlager, an dem sich die Wurzel verspannen kann. Auch die **Verbindungsgeometrie** entscheidet somit über das Einwuchsverhalten und muss daher mit Blick auf die Wurzelfestigkeit ausgelegt werden.
- Bei der Konstruktion von Steckmuffen sollte der durchwurzelbare, umlaufende Spalt gering sein. Allerdings sollte gleichzeitig eine Ringraumbildung zwischen Muffenspalt und Dichtelement verhindert werden, da ansonsten ein Dichtefalleneffekt zu befürchten ist.

Im Rahmen des Projektes wurden die wesentlichen Ursachen für den Schadensfall Wurzeleinwuchs erkannt und Empfehlungen für Bau, Betrieb und Sanierung von Abwasserkanälen sowie die Konstruktion von Leitungselementen mit Blick auf die Wurzelfestigkeit gegeben. Dennoch konnten nicht alle Fragen abschließend gelöst werden. Als Ansatzpunkte für künftige Untersuchungen bieten sich im Sinne eines **Ausblicks** an:

- **Weitergehende Untersuchungen an Rohrverbindungen:**

Hierzu gehört die Bestimmung der Geometrie sowie die Messung des Anpressdruckes für weitere gängige Rohrverbindungen und die Prüfung von Rohrverbindungen unter Außenwasserdruck-Belastung.

- **Eignung von Verfahren zur Entfernung von Wurzeln aus Rohrleitungen:**

Mit Blick auf die Prozesse beim Wurzelwachstum bietet sich zur Erhöhung der Betriebssicherheit auch eine Bewertung der am Markt angebotenen Verfahren zur Wurzelentfernung an.

- **Weitergehende Versuche zur Verifizierung der Modellvorstellungen:**

Bei den bisherigen Untersuchungen stand die Betrachtung der Ringraum- bzw. Ringspaltgeometrie und Vertiefung des Dichtefallenmodells im Vordergrund. Offen bleibt eine detaillierte Beschreibung des Oberflächeneinflusses auf den Wurzelwuchs entlang von Grenzflächen, insbesondere entlang von Rohren. Ähnliches gilt für das Sauerstoff-Modell und die Prüfung der Gasdichtheit von Rohrverbindungen. Darüber hinaus empfiehlt sich die Untersuchung anatomischer Unterschiede zwischen Primär- und

Sekundärwurzeln verschiedener Baumarten, z.B. Laub- und Nadelbäume, sowie die Wirkung alternativer Bettungsmittel zur Behinderung des Wurzelwachstums in Leitungsgräben.

- **Untersuchungen zur Prüfung der Wurzelfestigkeit von Sanierungsverfahren:**

Vor dem Hintergrund der zahlreichen Schäden aus Wurzeleinwuchs gewinnt neben der Entwicklung wurzelfester Neurohrverbindungen auch die Prüfung von Sanierungsverfahren an Bedeutung. Hier steht insbesondere die Eignung von Sanierungsverfahren in geschlossener Bauweise zur Diskussion.

Die o.a. Ansatzpunkte machen deutlich, dass das Thema Wurzeleinwuchs auch weiterhin eine interdisziplinäre Betrachtung erfordert. Ganzheitliche Modellvorstellungen und Lösungsansätze, die naturwissenschaftliches und ingenieurtechnisches Wissen vereinen, können so zu wirklich neuen Erkenntnissen bei vergleichsweise alten Fragestellungen führen.

9 Literatur

- [1] ATV-M 143, Teil 1: Grundlagen der Inspektion, Instandsetzung, Sanierung und Erneuerung von Abwasserkanälen und –leitungen, Dezember 1989
- [2] STEIN, D; KAUFMANN, O.: Schadensanalyse an Abwasserkanälen aus Beton- und Steinzeugrohren der Bundesrepublik Deutschland - West, Korrespondenz Abwasser 02 / 93
- [3] MEYER, F.H.: Bäume in der Stadt, Ulmer Verlag Stuttgart, 1982
- [4] IKT - Fax- und Online-Umfrage bei den Netzbetreibern im Bundesgebiet zum Schadensaufkommen durch Wurzeleinwuchs in Kanalisationsanlagen: IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, 08/2001, (unveröffentlicht)
- [5] DIN 4060: Rohrverbindungen von Abwasserkanälen und –leitungen mit Elastomerdichtungen (02.98)
- [6] BOSSELER, B.; BENNERSCHIEDT, C.: Ökologische Auswirkungen von Wurzeleinwuchs in Abwasserkanäle und –leitungen und ökonomische Maßnahmen zur Schadensvermeidung und Sanierung - Projektendbericht, Institut für Unterirdische Infrastruktur im Auftrag des MUNLV, 2001
- [7] BALDER, H.: Die Wurzeln der Stadtbäume, Parey Verlag Berlin 1998
- [8] NICOTRA, A.B.; BABICKA, N. ; WESTOBY, M.: Seedling root anatomy and morphology: an examination of ecological differentiation with rainfall using phylogenetically independent contrasts; Springer-Verlag 2001
- [9] DIN 1998: Unterbringung von Leitungen und Anlagen in öffentlichen Flächen, Richtlinien für die Planung; Mai 1978
- [10] DIN EN 1610: Verlegung und Prüfung von Abwasserleitungen und –kanälen, Deutsche Fassung EN 1610 – Juli 1997
- [11] 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
- [12] SCHARWÄCHTER, D.: Long Term tightness of sealing joints in non-pressure plastic pipe systems. Plastic Pipes XI, München, 2001
- [13] AS 1260-1999: Unplasticized PVC (UPVC), Pipes and Fittings for Drain Waste and Vent Applications, 1999, Standards Australia, Sydney
- [14] THOMA, W.: Entwicklung von Untersuchungs- und Prüfverfahren zur Klärung des Zusammenhangs zwischen Alterung und Undichtigkeit bei Dichtungswerkstoffen und –systemen in industriellen und öffentlichen Abwasserleitungen. Forschungsvorhaben des TÜV Südwest, BMBF 02-WK 9175/0, Abschlußbericht 1996

- [15] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT LANDSCHAFTSENTWICKLUNG LANDSCHAFTSBAU E.V. – FLL: Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen – Dachbegrünungsrichtlinie. Bonn, Ausgabe Januar 2002
- [16] IKO MINERALS GMBH: Datenblatt Bentonit HX, Aktiv-Bentonit IBECO HT-X, 10/2001.
- [17] KUNTZE, H.; ROESCHMANN G. ;SCHWERTFEGER G.: Bodenkunde. -5. Aufl., Thieme, Stuttgart 1994
- [18] FIRMENINFORMATIONEN DER FA. TEKSCAN: Druckfolien zum Erfassung des Druckes in räumlicher Auflösung, Stand 2004 ; www.tekscan.com
- [19] WIERSUM, L.K.: The relationship of the size and structural rigidity of pores to their penetration by roots. Plant and Soil IX: S. 75-85, 1957
- [20] BOHNE, H.; HARTGE, K.H.: Auswirkungen der Gefügegeometrie auf den Wuchs von Getreidekeimlingen. Mitt. Dt. Bodenk. Ges. 34: S. 141-144, 1982
- [21] STEIN, D.: Entwicklung neuartiger Konzeptionen für Rohre aus Beton, Schlussbericht, Bundesminister für Forschung und Technologie, 1992