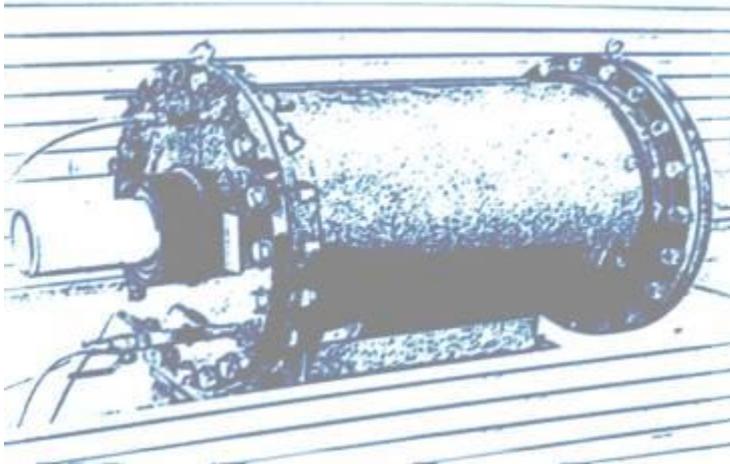


Wurzeleinwuchs in Abwasserleitungen und Kanäle „Ergänzungsvorhaben“



Wissenschaftliche Leitung

Prof. Dr. Thomas Stützel

Dr.-Ing. Bert Bosseler

Projektleitung und Bearbeitung

Dipl.-Ing. Christoph Bennerscheidt

Dipl.-Biol. Heiko Schmiedener

Dipl.-Biol. Markus Streckenbach

Bearbeitung:



Ruhr-Universität Bochum

Lehrstuhl für Spezielle Botanik und Botanischer Garten

Prof. Dr. Thomas Stützel

Universitätsstraße 150

44780 Bochum



IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH

Exterbruch 1

45886 Gelsenkirchen

www.ikt.de

Auftraggeber:



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

Endbericht zum Forschungsvorhaben:

„Ergänzungsprojekt zum Vorhaben Wurzeleinwuchs in Abwasserleitungen und –kanäle – Ursachen, Prüfung und Vermeidung“, AZ IV – 9 – 042 378 0010.

1	Veranlassung	4
2	Problem- und Zielstellung	5
3	Naturwissenschaftlich-Technischer Hintergrund	7
3.1	Grundlagen des Wurzelwachstums.....	7
3.2	Einfluss der Umgebung auf das Wurzelwachstum.....	9
3.2.1	Einfluss der Bodenstruktur.....	9
3.2.2	Einfluss von Bodentieren.....	11
3.2.3	Wurzelwachstum in anthropogen beeinflussten Böden sowie in Abwasserleitungen.....	11
3.2.4	Anatomischen Veränderungen bei Einwachsen in eine Rohrleitung.....	15
3.3	Wurzelfestigkeit: Untersuchungen und Prüfverfahren.....	18
3.3.1	Mechanischer Nachweis der Wurzelfestigkeit nach DIN 4060.....	18
3.3.2	Aufgrabungen im Leitungsnetz.....	19
3.3.3	In-situ-Versuche an Beton- und PVC-Rohren.....	22
3.3.4	Laborversuche.....	23
3.3.5	Zusammenfassung.....	31
4	Untersuchungen an Rohrverbindungen	33
4.1	Untersuchungen zur Ermittlung des Anpressdrucks.....	35
4.1.1	Rohre aus Keramik-/Steinzeug.....	38
4.1.2	Rohre aus PVC-U.....	40
4.1.3	Rohre aus PP.....	42
4.1.4	Rohre aus Dukt. Guss.....	43
4.1.5	Schlussfolgerungen.....	44
4.2	Außendruckuntersuchung.....	45
4.2.1	Prüfaufbau.....	45
4.2.2	Prüfkriterien.....	48
4.2.3	Rohre aus Keramik-/Steinzeugrohre.....	49
4.2.4	Rohre aus PVC-U.....	54
4.2.5	Rohre aus PP (Polypropylen).....	62
4.2.6	Rohre aus duktilem Gusseisen.....	68
4.3	Kulturversuche an Rohrverbindungen.....	69
4.4	Untersuchung der Verbindungsgeometrie.....	82
4.4.1	Keramik-/Steinzeugrohre.....	85
4.4.2	Rohre aus PVC-U.....	86
4.4.3	Rohre aus PP.....	89
4.4.4	Rohre aus duktilem Gusseisen.....	90
4.5	Zusammenfassung: Wurzelfestigkeit von Rohrverbindungen.....	91
5	Weiterführende Untersuchungen zum Wurzelwachstum	95
5.1	Einfluss der Korngröße.....	96
5.2	Einfluss der Porenräume auf den Wurzelwuchs.....	97
5.3	Regenerationsfähigkeit von Wurzeln.....	100
5.4	Wurzeldruck von Gymnospermen und Angiospermen.....	105
5.5	Erstellung eines Bestimmungsschlüssels und Erweiterung der bestehenden anatomischen Datenbank.....	112
5.6	Sauerstoffversorgung im Bereich der Rohrverbindungen.....	115
5.7	Einfluss des Rohrwerkstoffs auf das Wurzelwachstum.....	117
6	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	118
6.1	Wurzel – Boden - Interaktion.....	119
6.2	Charakteristika unterschiedlicher Wurzelsysteme.....	119
6.3	Wurzel – Rohrverbindung - Interaktion.....	120
7	Ausblick	122
8	Literatur	124

1 **Veranlassung**

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 des abgeschlossenen Forschungsvorhabens „Wurzeleinwuchs in Abwasserleitungen und –kanäle – Ursachen, Prüfung und Vermeidung -“ [1], die Ursachen für Wurzeleinwuchs in Leitungen wissenschaftlich zu belegen und die Mechanismen beim 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 beim 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, 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.

Im Rahmen des abgeschlossenen Vorhabens wurden die wesentlichen Ursachen für den Schadensfall Wurzeleinwuchs erkannt, darauf aufbauend Wachstumsmodelle formuliert und Hinweise 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. Insbesondere die weitergehenden Untersuchungen an Rohrverbindungen sowie weitergehende Versuche zur Verifizierung der Modellvorstellungen werden in dem vorliegenden Vorhaben ausgeführt und nachfolgend dargestellt.

Bei den vom Problem hauptsächlich betroffenen Steckverbindungen treten in vielen Fällen bauartbedingt Räume auf, die bei Einbau der Leitung und bei der dabei erfolgenden Verdichtung des Verfüllmaterials nicht ausgefüllt werden können. Wurzeln können diese Räume erreichen, wenn sie im Bettungs- bzw. Verfüllmaterial einer Leitung wachsen. Die

Geometrie der Rohrverbindung hat einen entscheidenden Einfluss auf die Wurzelfestigkeit einer Rohrverbindung.

Das derzeitige Verständnis für die beteiligten Vorgänge deutet an, dass spezifische Parameter von Rohrverbindungen, wie z.B. der Anpressdruck des Dichtelementes und das Auftreten bauartbedingter Räume einen deutlichen Einfluss auf die Wurzelfestigkeit der betreffenden Rohrverbindungen haben. In den derzeit geltenden Verordnungen zum Nachweis der Wurzelfestigkeit von Rohrverbindungen finden diese Erkenntnisse [2], [3] jedoch keine Beachtung. Der Angriff von Wurzeln auf eine Rohrverbindung wird nach wie vor mit Hilfe einer Scherlastprüfung [4] dargestellt, bei der keine biologischen Gegebenheiten berücksichtigt werden. In der Tat ist der direkte Einfluss, den wachsende Wurzeln auf eine Rohrverbindung haben, mit der Wirkung eines Überdrucks außerhalb der Leitung vergleichbar. Darüber hinaus werden Abwasserleitungen gemäß DIN EN 1610 [5] verlegt. Die bestehenden Vorgaben für Bettungs- und Verfüllmaterialien im Leitungsgraben beziehen sich demnach lediglich auf die Standsicherheit der Leitung und die Vermeidung von Leitungsschäden in Folge von Punktlasten, die durch das Bettungsmaterial übertragen werden. Vorgaben hinsichtlich der Durchwurzelungssicherheit von Bettungs- und Verfüllmaterialien bestehen nicht.

2 Problem- und Zielstellung

Ziel des Ergänzungsvorhabens ist es, die weiterhin offenen Fragestellungen hinsichtlich der **Interaktion Rohr/Boden/Wurzel** zu klären. Im Ergebnis wird eine grundsätzliche Beurteilung der Wurzelfestigkeit von Rohrverbindungen möglich sein, so dass anstehende zukünftige Investitionsentscheidungen mit der erforderlichen Sicherheit getroffen werden können. Um dieses Ziel zu erreichen, sollen

1. die Untersuchungen aus [1] zur Ermittlung der Wurzelfestigkeit anhand des Anpressdrucks von Rohrverbindungen fortgesetzt, auf 9 marktgängige Rohrverbindungen ausgeweitet und die Zahl der o.a. Versuche pro Rohrverbindung auf 3 Wiederholungsprüfungen erhöht werden, um statistisch aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen.
2. zur realitätsnahen Simulation von Wurzeleinwuchs die Untersuchungen zur Ermittlung der Wurzelfestigkeit von Rohrverbindungen um die Prüfung der Beständigkeit gegen Außendruck ergänzt werden.
3. weiterführende Kulturversuche an Rohrverbindungen unterschiedlicher Geometrien und Oberflächenbeschaffenheiten durchgeführt werden, um so weitere grundlegende Erkenntnisse hinsichtlich der Interaktion zwischen Rohrleitung und Wurzel zu gewinnen.
4. bei Forschungsinstituten, Universitäten, Fachhochschulen und Prüfinstituten Möglichkeiten bzw. bereits vorhandene Versuchseinrichtungen zur Prüfung der Gasdichtheit von Rohrverbindungen recherchiert werden, um ein Konzept zur Überprüfung der Sauerstoffdichtheit von Rohrverbindungen zu entwickeln.

5. weiterführende Kulturversuche in Bettungsmitteln mit unterschiedlichen Porengrößen durchgeführt werden, um das Zusammenwirken von Bodenkörper und Wurzel detailliert zu untersuchen.
6. im Rahmen einer Recherche Einwuchsfälle von Nadelbäumen ermittelt werden, um zu klären, ob auch die Wurzeln von Nadelbäumen in gleichem Maße wie die Wurzeln von Laubgehölzen zum Einwachsen in Rohrverbindungen und Leitungen neigen.
7. die Druckmessungen aus [1] ebenfalls an Wurzeln von Gymnospermen durchgeführt werden, um zu ermitteln, ob auch die Wurzeln von Nadelbäumen Drücke aufbringen, die ein Überwinden des Anpressdrucks und ein Eindringen in die Rohrverbindung ermöglichen.
8. auf der Basis bereits vorliegender Wurzelschnittbilder eine Datenbank aufgebaut und um neue Wurzelschnittbilder weiterer Baumarten ergänzt werden, um so zukünftig eine schnelle und zuverlässiger Bestimmung der Baumart und die Identifizierung des Schadensverursachers zu ermöglichen.

3 Naturwissenschaftlich-Technischer Hintergrund

Die Interaktion von Wurzeln und Rohrleitungen wird durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Grundlagen des Vorganges wurden bereits durch Beobachtung und Dokumentation von Schadensfällen erzielt [1], [3]. Zur Ableitung weiterer systematisch auftretender Gesetzmäßigkeiten werden grundlegende Erkenntnisse aus dem Bereich des Leitungsbaus, der Biologie und der Geologie berücksichtigt.

3.1 Grundlagen des Wurzelwachstums

Die eigentliche Wachstumszone der Wurzel liegt nicht an deren Spitze, sondern kurz dahinter. In der sog. Initialenzone werden neue Zellen gebildet. Zur Spitze hin lösen sich diese Zellen zunehmend auf und bilden so eine am Rand gelatinöse Haube (Calyptra). Nach hinten strecken sich die Zellen und werden zunehmend steifer. Kurz hinter dem Spitzenbereich werden die Wurzeln durch Wurzelhaare im Substrat verankert. Die Wurzelhaube ist damit kein reines Schutzorgan, sondern stellt den eigentlichen Bohrkopf dar, der mit Wurzeldruck in den Boden vorgetrieben wird. Direkte mechanische Messungen zeigen, dass der Wurzeldruck mit dem osmotischen Druck in den Zellen der Wurzeln übereinstimmt und bis zu 15 bar erreichen kann. [1] Das Wachstum der Wurzelspitze in Längsrichtung kann nicht mit der Penetration eines steifen Gegenstandes, wie beispielsweise einer Nadel verglichen werden.

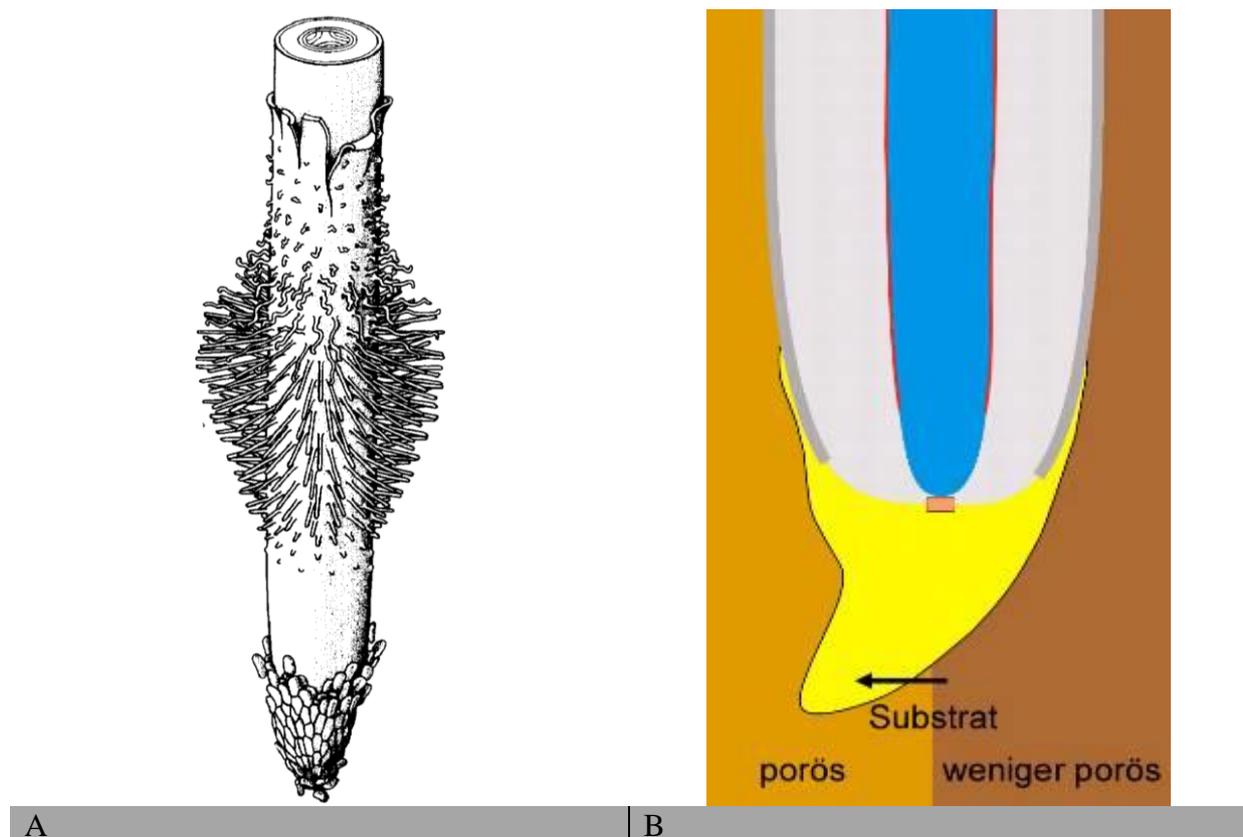


Abb. 1: Aufbau der Wurzelspitze. **A:** Längsansicht der Wurzelspitze. (aus [6]) **B:** Schematische Aufbau. Die Wurzelhaube (Calyptra, gelb) besteht aus abgestorbenen Zellen, die als Gleitmittel dienen. Ihre gelatinöse Struktur ermöglicht Änderungen der Wuchsrichtung. Die gallertige Wurzelhaube dringt vornehmlich in weniger dichten Boden (hellbraun) ein und führt bei weiterem Wachstum zu einer Richtungsänderung der gesamten Wurzel.

Die besondere Konstruktion der Wurzelspitze bedingt dabei, dass sie an Dichtegrenzen im Substrat stets in die Richtung der geringeren Dichte abgelenkt wird und in Räumen geringerer Dichte, insbesondere in Hohlräumen, praktisch gefangen wird. An Grenzflächen unterschiedlicher Substrate treten zum Teil räumlich eng begrenzte Dichteunterschiede in einem Substrates auf (Abb. 1). Wurzeln folgen häufig solchen Grenzflächen. Wurzeln folgen aus diesem Grund oft Grabenwänden oder auch den Grenzflächen zwischen der Oberfläche von Rohren und dem Bettungsmaterial im Rohrgraben. Entscheidend ist, dass für die Wurzeln nicht der Verdichtungsgrad maßgeblich ist, wie er üblicherweise im Bauingenieurwesen gemessen wird. Porenräume im Substrat erlauben auch in hochverdichteten Substraten eine nahezu ungehinderte Durchwurzelbarkeit. So können z.B. Recyclingschotter sehr rasch und gut durchwurzelt werden. Andererseits können Substrate ohne entsprechende Porenräume wie z.B. Tone oder technische Substrate wie Bentonit auch bei sehr schlechter Tragfähigkeit schwer durchwurzelt werden.

Die gelatinöse Wurzelspitze weicht bei Kontakt mit einem harten Gegenstand, wie z.B. einem Stein oder einer Elastomerdichtung, diesem aus. Auf diese Weise lässt sich z.B. erklären, dass Wurzeln von der geraden Wuchsrichtung abweichen. Sie folgen mit der Wurzelspitze dem Weg des geringsten Widerstandes und erschließen auf diese Weise Porenräume, Risse im Boden aber auch Risse oder andere Hohlräume in Bauteilen (vgl. Abb. 2).



Abb. 2: Änderung der Wuchsrichtung einer Wurzel aufgrund eines Hindernisses. Die Wurzel wächst in Richtung der Elastomerdichtung (1), ändert bei Kontakt mit der Dichtung die Wuchsrichtung und wächst dann entlang der Dichtung (2).

In der Entwicklung des Baumes besteht immer eine Gleichgewichtsbeziehung zwischen dem Kronenvolumen und dem durchwurzelten Raum. Der Wurzelraum muss eine ausreichende Größe haben, um die Krone mit Wasser und Nährstoffen zu versorgen und die Standsicherheit zu gewährleisten. Die Krone muss umgekehrt eine ausreichende Größe besitzen, um die nicht zu eigener Produktion befähigten Wurzeln mit Produkten der Photosynthese (Assimilaten) zu versorgen. Stärkere Eingriffe in einen Bereich wirken stets in beiden Bereichen. Beschädigung größerer Teile der Wurzeln können zu Totholzbildung im Kronenbereich und damit zu erhöhten Pflegekosten im Rahmen der Verkehrssicherungspflicht führen. Starke Kronenrückschnitte können das Absterben von Wurzelbereichen bewirken und schaffen damit Eintrittspforten für Pathogene [7]. Zunächst versuchen jedoch Gehölze solche Verluste, sei es im Kronen- oder im Wurzelbereich durch manchmal heftige Regenerationsreaktionen zu kompensieren. Möglicherweise kann dieses Verhalten vor allem in Leitungsgräben in den ersten Jahren nach

einer Baumaßnahme zu nachteiligen Interaktionen mit den neu geschaffenen Infrastrukturen führen. Dies kann auch erklären, warum die Risiken bei Bauarbeiten im alten Bestand höher sind als bei Neuanlagen von Pflanzungen [8].

3.2 Einfluss der Umgebung auf das Wurzelwachstum

3.2.1 Einfluss der Bodenstruktur

Pflanzen erhalten durch das Wurzelwachstum im Boden mechanischen Halt. Darüber hinaus entnehmen sie dem Boden Wasser und Nährstoffe für ihr Wachstum [9]. Weiterhin sind Wurzeln die Atmungsorgane der Pflanzen, über die Sauerstoffaufnahme und Kohlendioxidabgabe erfolgt. Wurzeln wachsen in der Regel im Boden, der sowohl günstige als auch ungünstige Umwelt- bzw. Randbedingungen aufweisen kann.

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 [10], [11]. Feine Poren werden von Wurzelhaaren durchzogen. Damit ist die Erfassung der größeren Porendurchmesser für das Wurzelwachstum zum Kanalrohr wesentlich. Das Durchdringen feinerer Poren durch so genannte Haarwurzeln ist für die Aufnahme von Wasser und Nährstoffen sowie die Atmung erforderlich. Das Porengefüge, beschreibbar durch die Porengrößenverteilung, stellt somit einen wichtigen Lebensraum für Wurzeln dar. Grundlage für die Bestimmung der Porengrößenverteilung sind die in [10] und [11] beschriebenen Annahmen. Wurzeln wachsen aber nicht nur in bereits bestehende Porenräume hinein. Sie können auch aktiv einen mechanischen Druck auf den Boden ausüben und die Porenräume vergrößern (vgl. [12], [13], [14] und [15]).

Der Gehalt des Bodens an Grobporen ist vor allen von der Rohdichte des Bodens abhängig. Je geringer die Rohdichte ist, umso höher sind die Gehalte an Grobporen [16], [17], [18]. Damit bestehen bereits früh erkannte Beziehungen zwischen Rohdichte und Durchwurzelung des Bodens. Veihmeyer u. Hendrickson (1948) [19] gaben für Sonnenblumen bei Sandböden eine Rohdichte des trockenen Bodens von 1,9 g/ccm und für Tonböden von 1,7 g/ccm an, bei der keine Durchwurzelung mehr erfolgte.

Beim Dickenwachstum muss die Wurzel die Partikel ihrer Umgebung beiseite schieben. Dazu muss der von der Wurzel entwickelte Druck groß genug sein, um den Druckwiderstand des Bodens zu überwinden. Entsprechend werden Druckwiderstandsmessungen am Profil unter dem zum Probenahmezeitpunkt im Boden vorliegenden Feuchteverhältnis durchgeführt. Mit Hilfe eines Penetrometers lassen sich die von Pflanzenwurzeln überwindbaren Durchwurzelungswiderstände ermitteln. Dieser Wert ist abhängig von

- der Korngröße und der Korngrößenverteilung im Boden,
- der Rohdichte des Bodens, d.h. der Lagerungsdichte der Partikel sowie
- dem Vorliegen von "Schmierstoffen" wie Wasser und Humus, die den Scherwiderstand herabsetzen.

Auch führt der während des Jahres wechselnde Bodenwassergehalt zu einem schwankenden Druckwiderstand des Bodens, den die Pflanzenwurzel zu überwinden hat (vgl. [20], [21], [22], [23] und [24]). Dies erschwert aber auch die Zuordnung der Merkmale wie Korngrößenzusammensetzung und Rohdichte zu den Druckwiderständen [25].

Das Wurzelwachstum wird deutlich verringert oder hört bei mit Penetrometern ermittelten Druckwiderständen von über 2 Mpa (vgl. [26] und [27]), 3 MPa (vgl. [28]) und nach anderen Angaben (vgl. [29]) bei 5 MPa auf. Allerdings scheinen die anhand von Penetrometermessungen ermittelten, von Pflanzenwurzeln überwindbaren Durchwurzelungswiderstände deutlich überschätzt [30] zu werden.

Die Pflanzenwurzeln werden in die Bodenregionen vorstoßen, wo sie Wasser und Nährstoffe vorfinden. Die Eigenschaft eines Bodens, Wasser und Nährstoffe pflanzenverfügbar bereit zu stellen, unterstützt eine Durchwurzelung. Dabei kann die Pflanze mit ihren Hauptwurzelsystemen ohne starke Seitenverzweigung Bodenbereiche durchwachsen, die ihr Wasser- und Nährstoffe nicht ausreichend anbieten oder deren Erschließung durch Feinwurzeln infolge hoher Bodendichte nicht möglich ist [31], [32]. Von Bedeutung ist nicht nur, ob Nährstoffe pflanzenverfügbar vorliegen, sondern dass sie auch zur Wurzel gelangen können. Phosphor wird z.B. überwiegend durch Ausscheiden von organischen Säuren durch die Wurzeln aus Phosphat verfügbar gemacht. Die Haarwurzeln müssen somit in der Lage sein, den Boden leicht zu durchdringen, d.h. der Boden muss ausreichend locker und porös sein [33]. Kalium hingegen erfordert einen hohen Massenfluss, d.h. Wassertransport in nur mit Wasser gesättigtem Boden, da Kalium zusammen mit Wasser aufgenommen wird. Dazu sind hohe Gehalte an Mittelporen erforderlich. Auch hier zeigt sich der jahreszeitliche Einfluss auf eine Durchwurzelung. Wird dem Boden in trockeneren Jahreszeiten Wasser entzogen, so wird auch der Massenfluss und damit die Kaliumaufnahme abnehmen.

Die Wurzelatmung erfordert ein Grobporensystem, das frei von Wasser ist und somit Sauerstoffzufuhr ermöglicht. Luftarmut erzeugt Sauerstoffmangel [34] und Kohlendioxidüberschuss [35], wodurch das Wurzelwachstum gehemmt wird. Bei starkem Sauerstoffmangel sterben die Wurzeln ab [36]. Ein wasserfreies Grobporensystem liegt vor bei

- großkörnigen Böden,
- gut aggregierten Böden,
- grund- und stauwasserfreien Böden.

Als ausreichende Luftkapazität werden 7 Vol. % [37], als nicht ausreichend unter 5 Vol. % [35] angegeben.

Der Gasaustausch erfolgt über Diffusion [38], [39]. Eine hohe Diffusion wird bei hohen Grobporengehalten und hoher Porenkontinuität vorliegen [40]. Eine maximale Diffusion wird erreicht, wenn kein Hindernis die Diffusion behindert, wie z.B. in Luft. Umlagerung und Verdichtung des Bodens werden diese verringern. Der Gasaustausch ist jedoch auch von der Länge des Diffusionsweges abhängig. In tiefen Bodenhorizonten nimmt daher die Bodenbelüftung ab, was zur Abnahme der Durchwurzelung führt. Kennzeichen hierfür ist ein geringes Redoxpotential. Vor allem im Bereich von Abwasserkanälen, aber auch aus

Gasleitungen können Gase (Methan, Kohlendioxid) entweichen, die Sauerstoff verdrängen. Diese Gase können sich auch aus Humus in Unterböden entwickeln. Zur Ermittlung von Bodenbereichen mit Sauerstoffdefiziten werden Redoxpotentialmessungen im frischen Bodenprofil durchgeführt.

Weitere Umweltbedingungen, die das Wurzelwachstum behindern können, sind niedrige pH-Werte unter pH 4,2, die zur Freisetzung toxischer Aluminiumionen führen, und das Vorliegen von erhöhten Salzgehalten, welche die Wasseraufnahme stören. Bodensalze sind in unserem niederschlagsreichen Klima von untergeordneter Bedeutung, da sie ausgewaschen werden.

Spezifische Merkmale der Abwasserleitungsgräben sind

- das Vorherrschen von sandigen Böden (Rohrbettung), auch unterhalb der Rohrsohle,
- die Oberflächenversiegelung durch eine Straßen- oder Gehwegdecke und
- der Wechsel jahreszeitlicher Wassergehalte durch Wasserentzug durch Straßenrandbäume und seitlichen Wasserzufluss.

3.2.2 Einfluss von Bodentieren

Der Boden bildet den Lebensraum für eine Vielzahl unterschiedlicher Organismen. Den größten Anteil bilden dabei die Gliederfüßer (Arthropoden). Grundsätzlich lassen sie sich in die Gruppen Spinnentiere, Tausendfüßler, Krebstiere und Insekten unterteilen. Im Boden sind darüber hinaus Weichtiere (Schnecken) und Würmer vertreten. Die größten Tiere des Bodens sind Säugetiere. Im Bereich der Bundesrepublik Deutschland kommen im Boden verschiedene Arten von Mäusen, und darüber hinaus auch Spitzmäuse und Maulwürfe vor. Alle Bodentiere verstoffwechseln unter Sauerstoffverbrauch organische Substanz. Der Lebensraum von Bodentieren ist daher in vielen Fällen durch das Ausbleiben einer ausreichenden Bodendurchlüftung begrenzt.

In der Regel sind öffentliche Abwasserkanäle in Tiefen verlegt, in denen ein Großteil der Bodentiere nicht überleben kann (Tiefe > 1 m). Private Anschlussleitungen sind jedoch zum Teil in geringeren Tiefen verlegt (zwischen 0,3 und 1 m Tiefe), so dass in einigen Fällen ein Einfluss von Bodentieren nicht vollständig auszuschließen ist. Der Regenwurm *Lumbricus terrestris* lebt nachweislich in Tiefen von bis zu 2 m. Die Tiere sind in der Lage, neben der Fraßaktivität („im Durchlauf“, vergleichbar mit einem Vortriebschild), den Boden aktiv zu verdrängen. Bei Vordringen in neue Bodenbereiche besteht jedoch hinsichtlich der Sauerstoffversorgung die genannte Grenze, die durch den Sauerstoffbedarf der Tiere vorgegeben ist. Bodentiere können als Folge ihrer unterirdischen Lebensweise die Bodenstruktur verändern, so dass z.B. die Nährstoffverfügbarkeit und die Durchlüftung des betreffenden Bodenbereiches verbessert werden. (vgl. [41] und [42])

3.2.3 Wurzelwachstum in anthropogen beeinflussten Böden sowie in Abwasserleitungen

Die Ausbreitung von Wurzeln in Substraten erfolgt nicht willkürlich oder zufällig. Die räumliche Verteilung der Wurzeln stellt eine Reaktion auf die in Kapitel 3.2.1 und 3.2.2 und beschriebenen Gegebenheiten der direkten Umgebung dar.

Wurzeln sind lebende unterirdische Teile der Pflanzen. Sie dienen einerseits der Nährstoff- und Wasserversorgung und haben andererseits eine wichtige statische Aufgabe. Während an optimalen Standorten das Wurzelbild (z.B. Flachwurzler, Herzwurzler, Tiefwurzler) von der Gehölzart abhängig sein kann, ist es in der realen Situation auch außerhalb des urbanen Raumes eher von den Gegebenheiten des Wuchsortes als von der Pflanzenart abhängig. So wird die meist als typischer Flachwurzler angesehene Fichte vielfach auf flachgründigen Standorten angepflanzt, auf denen sie nicht anders wachsen kann. Auf tiefgründigen Standorten bildet sie dagegen meist mehrere kräftige, tiefgehende sog. Herzwurzeln aus. [43] Ähnliche Beobachtungen gelten auch für andere Gehölze. 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.

Die besondere Konstruktion der Wurzelspitze bedingt unter anderem das Verhalten der Wurzeln, in Bereichen zweier unterschiedlich stark verdichteter Substrate bevorzugt in das geringer verdichtete Substrat einzuwachsen. Diese Eigenart konnte sowohl an den Schauplätzen realer Schadensfälle als auch im Laborversuch wiederholt nachvollzogen werden (vgl. [1]). Ein locker verdichtetes Substrat besitzt einen höheren Anteil an Grob- und Feinporen, der dessen Wasser- und Sauerstoffhaushalt für das Wurzelwachstum positiv beeinflusst. Dichtegrenzen bzw. Dichteunterschiede in der Porenraumverteilung können demnach zwei unterschiedliche Effekte auf das Wurzelwachstum von Straßenbäumen ausüben. Ein im Wurzelbereich hoch verdichtetes Substrat kann im Extremfall dazu führen, dass der eingepflanzte Baum nicht über den Wurzelballen hinaus wurzeln kann und verkümmert oder sogar abstirbt. Ebenso kann ein relativ zum umgebenden Substrat wenig verdichteter Leitungsraben oder ein hoch verdichtetes Substrat im Leitungsraben, mit durchwurzelbaren Porenräumen, das Wurzelwachstum in diesem Bereich fördern. [1] Durch den Einbau von Leitungen in offener Bauweise können, besonders in der Umgebung von Rohrverbindungen (z.B. im Zwickelbereich von Leitungen), die zuvor beschriebenen gering verdichteten Bodenbereiche entstehen. Die Entstehung solcher Bereiche ist abhängig von den verwendeten Bettungs- bzw. Verfüllmaterialien. Dabei ist in den meisten Fällen eine geringe bzw. ungleichmäßige Verdichtung des Bettungs- bzw. Verfüllmaterials in der Nähe der Leitung dafür verantwortlich, dass Wurzeln den Weg zur Leitung und auch in die nach den aktuellen Regelwerken wasserdichte Rohrverbindung finden. Im Verlauf der Zeit können sich darüber hinaus Bodenpartikel verlagern und in Spalten oder Räume von Steckverbindungen eindringen. Mit fortschreitender Betriebsdauer der Leitung kann in solchen Fällen ein Dichtegradient entstehen, der die in der Nähe einer Leitung wachsenden Wurzeln zur Rohrverbindung führen kann. (vgl. Abb. 3)

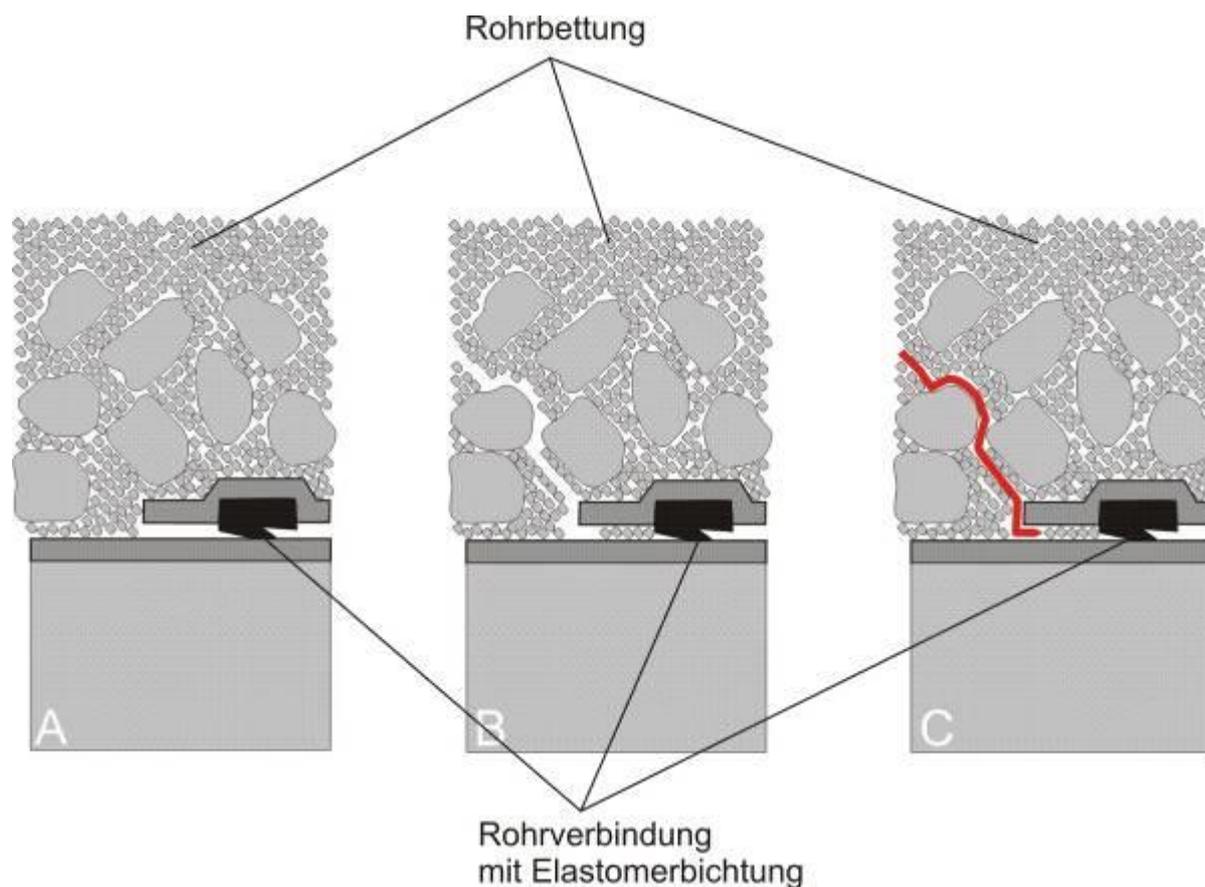


Abb. 3: Schematische Darstellung einer eingebauten Rohrverbindung (Steckverbindung) mit Elastomerdichtung in ihrem Bettungsmaterial. **A** Zustand direkt nach dem Einbau. **B** mögliche Beeinträchtigung der Bodenstruktur durch Eindringen von Bodenpartikeln in den Ringspalt der Rohrverbindung zwischen Muffe und Spitze oder Setzungen durch nachträgliche Verdichtungen im Zwickelbereich der Leitung. Entstehung eines Dichtegradienten. **C** Möglicher Weg für einen Wurzeinwuchs durch die beeinträchtigte Bodenstruktur (rot).

Im Zuge von Ausschachtungsarbeiten kommt es darüber hinaus bei der Erstellung von unterirdischen Kanalisationsanlagen regelmäßig zu Verletzungen an Wurzelsystemen. Durch den Einsatz von Saugbaggern können diese zwar minimiert, dennoch nicht komplett verhindert werden. Unabhängig von der Ursache, aber in Abhängigkeit vom Grad der Verletzung, können aus derartigen Verwundungen unterschiedliche Effekte hervorgehen. Durch grobes Ausreißen kann beispielsweise das Eindringen von Krankheitserregern begünstigt werden, die sich im Wurzelsystem ausbreiten und zum Absterben z.T. großer Teile des Wurzelwerkes führen können. Dieser Verlust kann eine Schwächung der Standfestigkeit nach sich ziehen. Im Falle von „sauberen“, d.h. glatten Schnittstellen („Handsichtung“) wirkt der Baum dem Verlust Wasser- und Nährstoff aufnehmender Bereiche durch den vermehrten Neuaustrieb von Wurzeln an der Verwundungstelle entgegen. Die Verletzungen führen also stets zu im Straßen- und Kanalbau unerwünschten Effekten.

Grundsätzlich wird die Wurzel ausbreitung im Boden durch das Zusammenwirken unterschiedlicher Faktoren beeinflusst. Die Bodeneigenschaften am Standort wirken auf Wurzeln modifizierend. Dabei nimmt die **Bodentemperatur** eine entscheidende Bedeutung ein. Die Intensität aller physikalischen und biologischen Vorgänge, nicht nur in den Wurzelzellen, unterliegt dem direkten Einfluss der Temperatur. Die Wurzeln der Pflanzen aus

gemäßigten Breiten zeigen in der Regel ab 4°C eine Wachstumsaktivität, die bei etwa 20°C ihr Optimum erreicht.

Wurzeln sind auf eine ausreichende **Wasserversorgung** angewiesen, da Nährstoffe als wässrige Lösung in den Pflanzenorganismus aufgenommen werden müssen. Jedoch führt ein dauerhaftes Untertauchen in sauerstoffarmem Wasser zum Absterben der Wurzeln (vgl. Kapitel 3. Wurzel-Grundlagen). Wurzeln fehlt ein Abschlussgewebe, das eine Abgabe von Wasser verhindert. Wurzeln sterben daher in Bodenbereichen mit geringer Feuchtigkeit ab. Die Bodenfeuchtigkeit hat somit einen Einfluss auf die Ausbreitung von Wurzeln. [44]

In ähnlicher Weise hat das Vorhandensein von Poren, in denen sich **Bodenluft** befindet, einen Einfluss auf die Ausbreitung von Wurzeln. Zu geringe Sauerstoff- bzw. hohe Kohlendioxidgehalte tolerieren Wurzelspitzen nicht, da sie auf Veratmung von Sauerstoff angewiesen sind (vgl. Kapitel 3. Wurzel-Grundlagen). Der Gehalt an Bodenluft eines Bodens kann nachträglich, z.B. durch Verdichtung verändert werden. Nimmt der Porenanteil eines Bodens ab, können die Wurzeln in den betreffenden Bodenbereichen absterben. [44]

Der Einfluss der **Nährstoffverhältnisse** drückt sich deutlich im Längenwachstum der betreffenden Wurzeln aus. In Böden mit geringem Stickstoffangebot verzweigen sich Wurzeln stärker als in Böden mit ausreichendem Stickstoffangebot. In engem Zusammenhang mit den Nährstoffverhältnissen steht das Auftreten von Symbionten, welche die Nährstoffe für die Wurzeln aufschließen. Auch hier ist eine Abhängigkeit der Wurzelenausbreitung vom Auftreten der Symbionten, wie etwa Mykorrhiza zu erkennen. [44]

Die Zusammensetzung des Bodens in Bezug auf seine **Poren- oder Skelettanteile** drückt aus, welcher Raum den Wurzeln innerhalb eines Bodengefüges verbleibt. Wurzeln sind auf das Vorhandensein von Porenräumen angewiesen. Die Porosität eines Bodens drückt aus, wie hoch der Anteil von Poren einer bestimmten Größe in einem Boden ist und bestimmt maßgeblich seine Durchwurzelbarkeit. Ein zunehmender Feinporenanteil, wie er als Resultat von Verdichtungen auftritt, kann das Vordringen von Wurzeln in einem Boden erschweren. Bei nachträglicher Verdichtung oder vollständiger Wassersättigung des Bodens können darin wachsende Wurzeln aufgrund von Sauerstoffmangel absterben. [44]

Bei Erstellung von Leitungen in offener Bauweise wird der anstehende Boden entfernt, und der Leitungsgraben verfüllt. Für die Eigenschaften des Verfüllmaterials werden lediglich bautechnische Anforderungen gestellt (vgl. [5]). Anforderungen mit Blick auf die Vermeidung von Wurzelwachstum fehlen. In vielen Fällen können daher in Leitungsgräben Bedingungen herrschen, die für die Ausbreitung von Wurzeln einiger Baumarten geeignet sind. [44]

3.2.4 Anatomischen Veränderungen bei Einwachsen in eine Rohrleitung

Im Rahmen von [1] wurden Leitungen aufgedrungen, in deren Rohrverbindungen Wurzeln eingewachsen waren. Zur Untersuchung der anatomischen Verhältnisse der Wurzeln nach dem Durchwachsen der Rohrverbindung wurden die eingewachsenen und sich stark verzweigenden Wurzeln freigelegt. Anschließend wurde diese Probe präpariert und mikroskopisch untersucht.

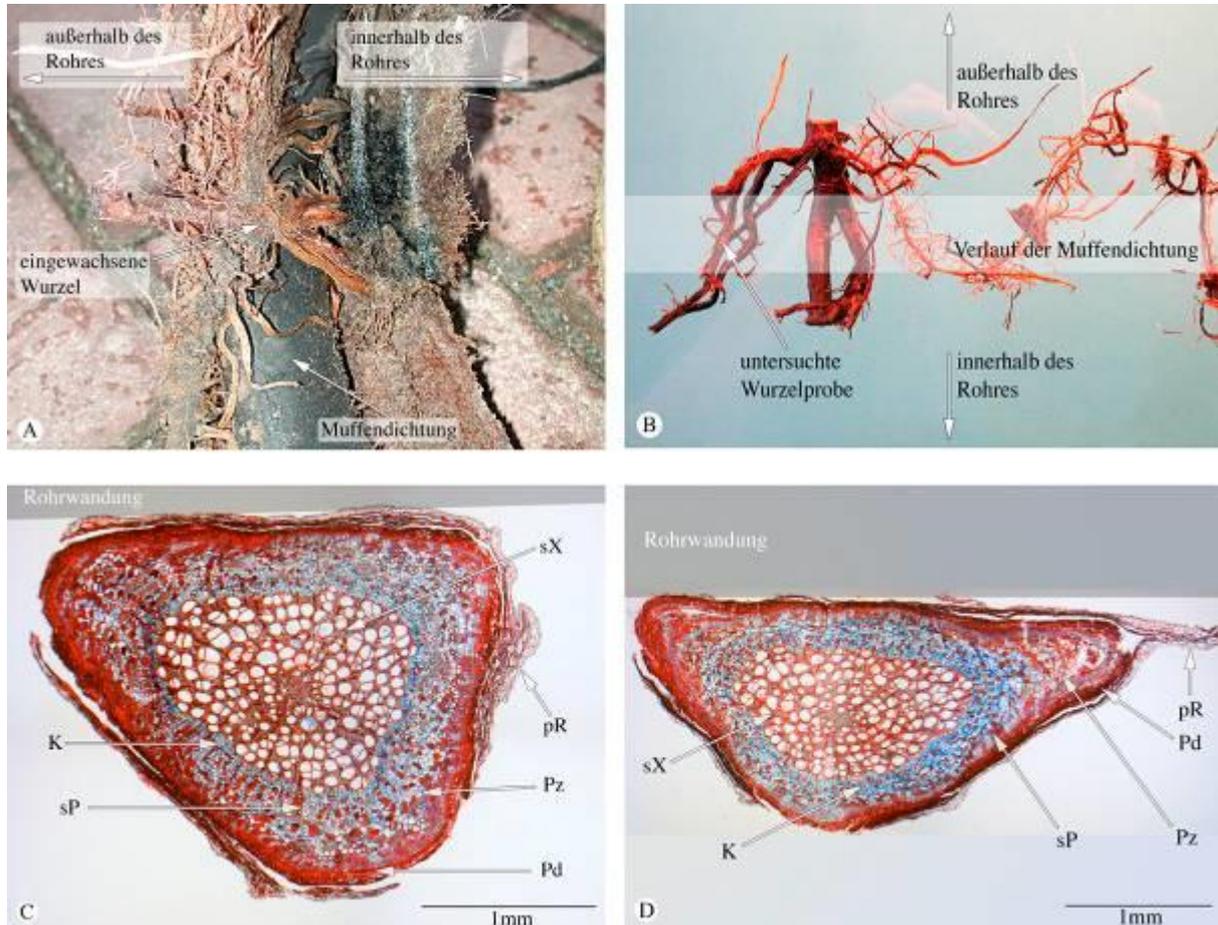


Abb. 4: In Rohrverbindung eingewachsene Wurzel von *Salix spec.* **A** Aus Rohrverbindung entnommenes Dichtelement; **B** Aus dieser Rohrverbindung freigelegte Wurzel von *Salix spec.*; **C** Querschnitt durch die eingewachsene Wurzel von *Salix spec.*, vor Eintritt in die Rohrverbindung – relative Lage zur Rohrwandung schattiert hervorgehoben; **D** Gleiches Objekt, zu Beginn des Eintritts in die Rohrverbindung. K = Kambium, pR = primäre Rinde, Pd = Periderm, Pz = Perizykel, sP = sekundäres Phloem, sX = sekundäres Xylem.

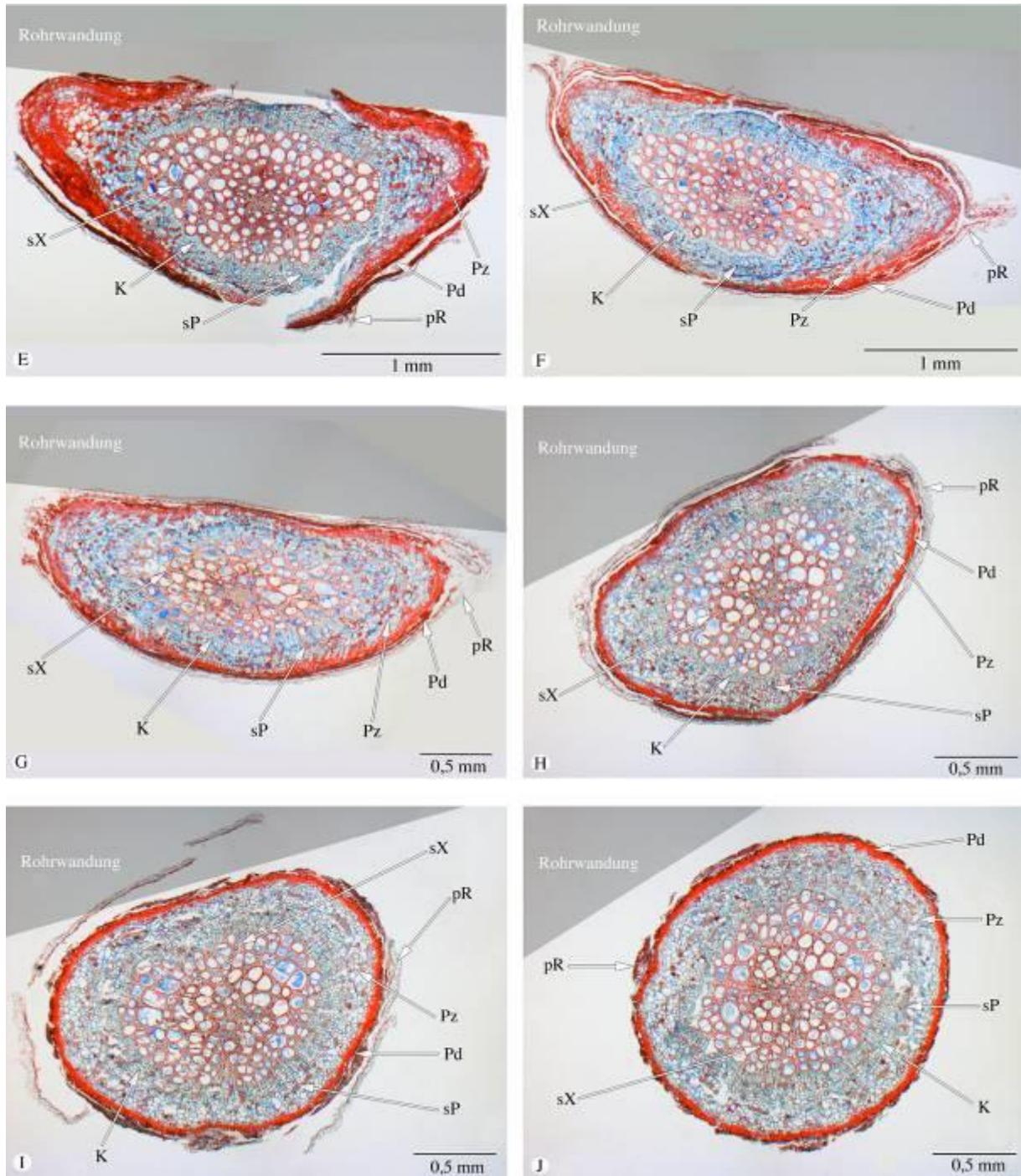


Abb. 5: In eine Rohrverbindung eingewachsene Wurzel der Weide (*Salix spec.*) **E** Querschnitt durch die eingewachsene Wurzel von *Salix spec.*, bereits in die Rohrverbindung eingetreten – relative Lage zur Rohrwandung schattiert hervorgehoben.; **F** Gleiches Objekt, innerhalb der Rohrverbindung; **G** Gleiches Objekt, innerhalb der Rohrverbindung (weiter in Richtung Rohrlumen); **H** Gleiches Objekt, kurz vor Austritt aus der Rohrverbindung; **I** Gleiches Objekt, bereits aus Rohrverbindung ausgetreten; **J** Gleiches Objekt, im Lumen des Rohres. K = Kambium, pR = primäre Rinde, Pd = Periderm, Pz = Perizykel, sP = sekundäres Phloem, sX = sekundäres Xylem.

Ungeachtet der einzelnen Gewebe zeigt die Schnittserie deutlich das Abflachen der Wurzel auf der Höhe des Dichtelementes. Die Aufnahmen der Schnittserien einer eingewachsenen Weidenwurzel (Abb. 4 C-D und Abb. 5 E-J) zeigen, dass in erster Linie die auf das Kambium folgenden, äußeren Gewebsschichten vom normalen Aufbau abweichen. Die primäre Rinde der noch jungen Weidenwurzel kann aufgrund des veränderten Platzangebotes innerhalb der Rohrverbindung nicht wie üblich während des sekundären Dickenwachstums abgeworfen werden. Daher ist sie als äußerstes Abschlussgewebe auf allen Schnitten erhalten geblieben. Auf die primäre Rinde folgt ein perikambiales Abschlussgewebe, das Periderm. Dieses zeigt auf allen Schnitten kaum eine Veränderung hinsichtlich seiner Ausmaße. Die Zellen der einzelnen Periderm-Gewebeschichten, namentlich die des Phellems (Korkkambium), zeigen allerdings an den Kontaktstellen der Wurzel mit dem Dichtelement oder der Rohrwandung oft einen hohen Grad an Verholzung und starker Komprimierung, so dass das Periderm dort mitunter schmaler erscheinen kann (Abb. 4 D und Abb. 5 E-G). Der auf das Periderm nach innen folgende Perizykel erweist sich als hochflexibles Gewebe. Seine Zellen sind relativ großlumig und besitzen unverholzte Zellwände. Zu den Seiten, an denen die Wurzel „leicht(er)“ expandieren kann, da sie in einen von sich selbst gebildeten Spalt hinein wächst, wird vermehrt Perizykelgewebe gebildet, wohingegen dieses in der Richtung, zu der die Kontaktflächen mit der Dichtung oder dem Rohr liegen, z.T. gar nicht ausgebildet wird (Abb. 4 D und Abb. 5 E-G). Auf den Perizykel folgen nach innen das Kambium und das sekundär gebildete Xylem.

Die Ausdehnung des Kambiumringes (Breite in Zellreihen) sowie die Form seiner einzelnen Zellen bleiben annähernd konstant, während sein Zellverband an sich auf der Höhe der Dichtungspassage ein Oval beschreibt. Die Ausbildung des sekundären Xylems folgt schließlich dieser Form (Abb. 5 F-G).

Vor und nach dem Durchtritt erscheint der Holzkörper der Wurzel mehr oder weniger drehrund, während er auf der Höhe der Dichtungspassage einen ovalen Querschnitt zeigt. Sekundäres Xylem wird demnach ebenfalls an den Stellen gebildet, an denen die Wurzel Platz zum Expandieren hat (kontaktfreie Bereiche mit der Umgebung).

Die Schnittserie zeigt, dass die Wurzel beim Wachstum in einer Umgebung mit eingeschränkten Expansionsmöglichkeiten am ehesten auf die Bildung parenchymatischen Gewebes (Perizykel) verzichten kann. Der Anteil dieses Zellverbandes am Aufbau der Wurzel ist auf der Höhe der Dichtungspassage demnach entsprechend sehr viel geringer, als vor oder nach der Passage. Der Verzicht auf die Ausbildung von Perizykelgewebe wird verständlich, wenn man sich seine Funktion und seinen Aufbau verdeutlicht: Der Perizykel und ist von allen beteiligten Geweben am wenigsten zur Aufrechterhaltung der Lebensfunktionen einer Wurzel notwendig. Auch das Fehlen von verholzten Zellwänden zeigt, dass die Zellen des Perizykels nicht zur Stabilisierung der Wurzel beitragen. Beim Wachstum in einer Muffe, umgeben von einem flexiblen Dichtungsmaterial werden vor allem diejenigen Gewebe benötigt, die die Stabilität erhöhen. Dies sind vor allem die verstärkten Zellen des sekundären Xylems, Phloems und des Phellems. Den größten Widerstand gegen den beständigen Druck durch die Dichtung, scheinen in dem hier betrachteten Beispiel die Zellen des Phellems zu leisten.

Dieser Umstand erscheint umso erklärlicher, wenn man eine der Hauptaufgaben der Wurzel, die Ernährung der Pflanze, betrachtet. Eine stark verholzte und somit schwer komprimierbare

äußere Schutzschicht (Phellem) sichert, während der Passage der Rohrverbindung, vor allem auf der Höhe der Dichtelemente, die volle Funktionsfähigkeit der Leitungsbahnelemente (Xylem und Phloem).

3.3 Wurzelfestigkeit: Untersuchungen und Prüfverfahren

Die Ausbildung des Wurzelwerks von Bäumen hängt, wie oben beschrieben, stark von den Bedingungen im Boden ab. In Städten werden diese Bedingungen stark durch die Bauwerke der Infrastruktur bestimmt. Das sind oberirdische Infrastrukturen wie Straßen und Gehwege und unterirdische Infrastrukturen wie Ver- und Entsorgungsleitungen. Insbesondere in diesen Bereichen wachsen Wurzeln. In der Folge kommt es zu Schäden, wie z.B. zu Hebungen durch Wurzelwachstum im Gehwegsbereich (vgl. [45]) oder Wurzeleinwüchse in Rohrverbindungen von Abwasserleitungen (vgl. [1]). Wurzeln wachsen dabei nicht nur in defekte oder undichte Abwasserleitungen und deren Verbindungen, sondern auch in Rohrverbindungen, die dem aktuellen Stand der Technik entsprechen.

Im Folgenden sind Untersuchungen zu den Ursachen von Wurzeleinwuchs und Verfahren zur Prüfung von Rohrverbindungen zusammengestellt. Ein universell anwendbares Testverfahren fehlt bislang.

3.3.1 Mechanischer Nachweis der Wurzelfestigkeit nach DIN 4060

Die Wurzelfestigkeit von Rohrverbindungen gilt in Deutschland nach DIN 4060 [4] als nachgewiesen, wenn die Rohrverbindung unter Scherlast eine Dichtheitsprüfung bei Über- bzw. Unterdruck besteht (vgl. Abb. 6). Die mechanischen Eigenschaften des Dichtmittels werden nach DIN EN 681 [46] geprüft. Die Geometrie des Dichtmittels und der daraus resultierende Einfluss auf den erzeugten Anpressdruck bleiben dabei allerdings unberücksichtigt.

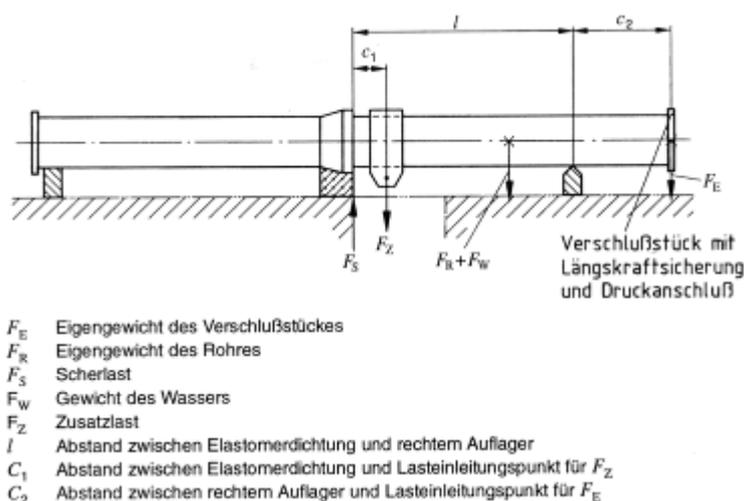


Abb. 6: Scherlastprüfung nach DIN 4060 [4].

Die in DIN 4060 [4] beschriebenen Prüfkriterien sind als Mindestanforderungen anzusehen. In Abhängigkeit der Rohrwerkstoffe sowie deren Rohrverbindung oder Lastklasse finden sich in den unterschiedlichen Rohrnormen dieselben bzw. höhere Anforderungen als in DIN 4060. Prüfkriterien für unterschiedliche Rohrwerkstoffe sind beispielhaft in Tabelle 1 dargestellt. Diesem Prüfverfahren liegt die Annahme zu Grunde, dass nur undichte Rohrverbindungen von

Wurzeln durchwachsen werden können und so durch eine mechanische Prüfung der Zusammenhang zwischen wasserdichten Rohrverbindungen und Wurzelfestigkeit hergestellt werden kann.

Table 1: Kriterien der Scherlastprüfung für unterschiedliche Rohrwerkstoffe.

Norm	Titel	Werkstoff	Prüfkriterium, Scherlast [N]	Prüfdruck [bar]	Prüfdauer [min]
DIN 4060	Rohrverbindungen von Abwasserkanälen und -leitungen mit Elastomerdichtungen - Anforderungen und Prüfungen an Rohrverbindungen, die Elastomerdichtungen enthalten	Allgemein	10 x DN	0,5	15
DIN EN 295	Steinzeugrohre und Formstücke sowie Rohrverbindungen für Abwasserleitungen und -kanäle	Steinzeug	25 x DN	0,5	15
DIN 19534-2	Rohre und Formstücke aus weichmacherfreiem Polyvinylchlorid (PVC-U) mit Steckmuffe für Abwasserkanäle und -leitungen	PVC-U	10 x DN	0,5	15
DIN EN 598	Rohre, Formstücke, Zubehörteile aus duktilem Gußeisen und ihre Verbindungen für die Abwasser-Entsorgung	Duktiles Gusseisen	30 x DN	2,0	120

Die Vorgaben unterscheiden sich in der Höhe des Prüfdrucks (0,5 bzw. 2,0 bar) und der Einwirkungsdauer des Prüfdrucks (15 Minuten bis 2 Stunden). Für Steinzeugrohre wird in DIN EN 295 [61] zusätzlich eine Scherwegbegrenzung in Höhe von 6 mm festgelegt. Für die Prüfung der Rohrverbindung duktiler Gussrohre nach DIN EN 598 [47] werden Rohre ausgewählt, die an den Grenzen der Toleranzmaße liegen und damit einen Maximalspalt zwischen Spitzende und Muffe aufweisen.

Die Prüfung der Dichtheit von Rohrverbindungen nach den genannten Kriterien berücksichtigt nur die kurzzeitige Beanspruchung des Dichtmittels. Eigenschaftsänderungen des Elastomers, wie z.B. die Verringerung des Anpressdrucks unter länger andauernder Scherlast, werden nicht berücksichtigt.

3.3.2 Aufgrabungen im Leitungsnetz

Bei den Aufgrabungen im Rahmen von [1] 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. 7** und **Abb. 8**). Teilweise waren die Wurzeln parallel zu den Leitungen bzw. entlang der äußeren Rohroberfläche sowohl von Ent- (vgl. **Abb. 8**) als auch von Versorgungsleitungen (**Abb. 7**) gewachsen.



Abb. 7: Wurzeln haben sich im Bettungsmaterial von Versorgungsleitungen ausgebreitet.



Abb. 8: Verholzte Wurzeln sind parallel zur Leitung gewachsen. Die Wurzeln haben hier einen Durchmesser von bis zu 0,2 m.

Bei Abwasserleitungen wurden verholzte Wurzeln freigegeben, die entlang der Rohrleitung im sogenannten Zwickelbereich von Rohrverbindung zu Rohrverbindung gewachsen waren. Die Räume vor dem Dichtmittel der Rohrverbindungen wurden in der Regel durch ein dichtes Wurzelpolster ausgefüllt.

Wurzeln wachsen über mehrere Jahre in diesen Räumen, bis diese komplett ausgefüllt sind. In der Folge durchdringen die Wurzeln das Dichtelement 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. 9**, **Abb. 10**). Der Einwuchs erfolgt in der Regel oberhalb der Sohle (**Abb. 9**) und nicht über den Sohlbereich. Das primäre Ziel scheint also nicht der Kontakt mit dem Abwasser zu sein.



Abb. 9: Blickrichtung gegen Fließrichtung. Die Rohrverbindung wurde geöffnet und eine Hälfte entfernt. Der mittlere Wasserstand bei Betrieb der Rohrleitung wird durch den Belag in der Sohle deutlich.



Abb. 10: Wurzelpolster im Abweig einer Regenwasserleitung. Der Abweig wurde teilweise entfernt. Die Wurzeln bilden ein dichtes Polster auf der Sohle der Leitung, welches die Form des Abzweiges abbildet

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.

Um die Beobachtungen zu systematisieren bieten sich die folgenden Modelle an:

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 hervorgehen.

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 durchwurzelteten Boden erfahren.

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.

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 von Freispiegelleitungen 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.

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 Leitung 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.

3.3.3 In-situ-Versuche an Beton- und PVC-Rohren

Im Rahmen von In-situ-Untersuchungen in Schweden konnte Wurzeleinwuchs in neue Rohrverbindungen nachgewiesen werden (vgl. [48]). Der Fachbereich für Landschaftspflege und Gartenbau an der Schwedischen Universität für Agrarwissenschaften in Ålnarp hatte im Jahre 1993 einen Großversuch angelegt. Die Untersuchungen wurden vom Fachbereich für Landschaftspflege und Gartenbau der Schwedischen Universität für Agrarwissenschaften (SLU), der Thames Water (UK), der Stadt Malmö und dem Schwedischen Wasser- und Abwasserverband unterstützt. Der Versuchsaufbau bestand aus jeweils einem im Boden verlegten Beton- und PVC-Rohrstrang sowie darauf gepflanzten Pappeln (vgl. Abb. 11, und Abb. 12 A). Ein Teil der jeweils 12 Rohrverbindungen pro Rohrstrang wurde manipuliert, d.h. z.B. schadhaft eingebaut, der andere Teil wurde fachgerecht eingebaut. Im Mai 2004 wurde der Großversuch beendet und die Rohre bzw. Rohrverbindungen wurden aufgegraben (vgl. Abb. 12 B bis D). Sowohl in die manipulierten als auch in die fachgerecht hergestellten Rohrverbindungen waren Wurzeln eingedrungen (vgl. Abb. 12 C bis D).

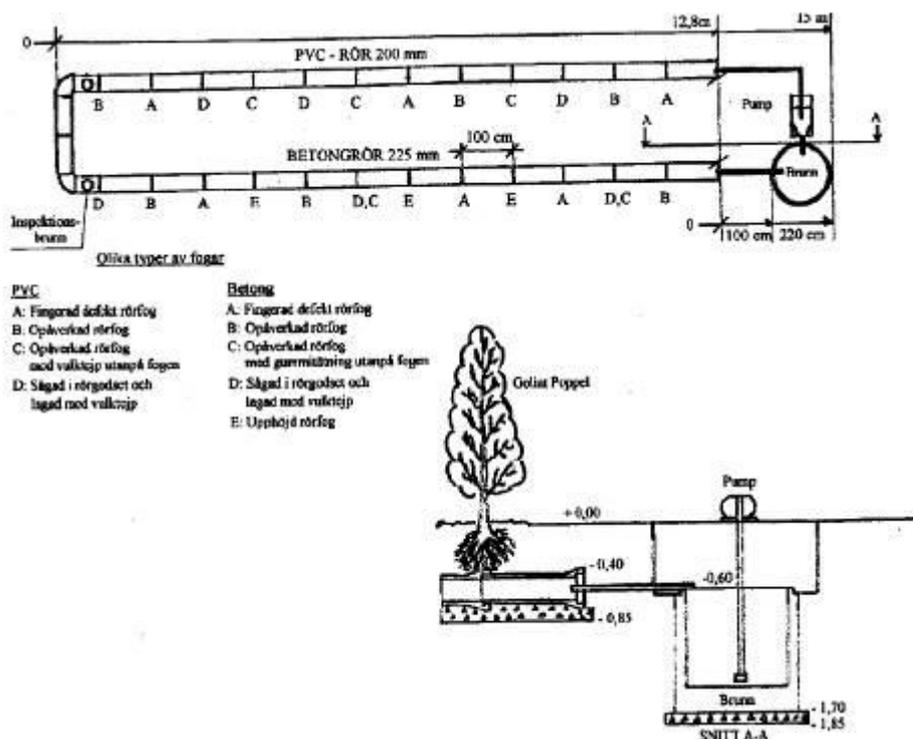


Abb. 11: Schema der Versuchsanlage in Schweden für Baumpflanzungen (Pappel) im Bereich von PVC- und Beton-Rohren (aus [48]).



B

Abb. 12: Kulturversuche in Schweden **A** Verlegung der Versuchstrecke **B** Aufgrabung der Versuchstrecke. **C** Wurzelpolster an der Rohrverbindung eines Betonrohres. **D** Wurzelpolster an der Rohrverbindung eines Kunststoffrohres.

A

B

D

3.3.4 Laborversuche

Neben den In-situ-Untersuchungen in Kanalnetzen sowie den Feldversuchen wurden Versuche in kleineren Maßstäben durchgeführt, d.h. mittelformatige Pflanzversuche, Kleinversuche und Kleinstversuche. Die jeweiligen Versuche werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

3.3.4.1 Mittelformatige Laborversuche

Im Jahr 1977 wurden in Pell City, Alabama mittelformatige Laborversuche zum Nachweis der Wurzelfestigkeit von PVC-Rohren durchgeführt. Eingesetzt wurde der in Abb. 13 dargestellte Versuchsaufbau mit einem im Boden eingebetteten Rohrstrang aus 6 Zoll PVC-Rohren (DN 150), die nach der US-amerikanischen Norm ASTM D 3034, DR 35 gefertigt wurden. Als Versuchspflanze wurden Trauerweiden (Weeping Willow) verwendet. Der Versuch wurde nach

15 Monaten beendet, nachdem die Pflanze vertrocknet war. Es wurden keine Wurzeln in den Rohrverbindungen gefunden und nur einige Feinwurzeln im Bereich des Glockenendes. [49]

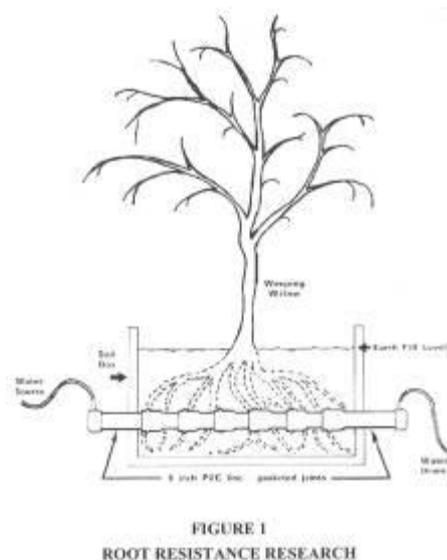


Abb. 13: Versuchsaufbau zur Prüfung der Wurzelfestigkeit von PVC-Rohren, die nach ASTM D 3212 gefertigt wurden.(aus [49])

Versuche mit einem vergleichbaren Versuchsaufbau wurden im Jahr 1996 durch die Landwirtschaftskammer Rheinland im Auftrag der Funke Kunststoffe GmbH begonnen. Im Jahr 1996 wurden mehrere Pflanzgefäße mit PVC-Rohren DN 150 bestückt, in Pflanzsubstrat gebettet und jeweils mit eine Kombination aus 2 Grauerlen, 2 Zitterpappeln und Ackerquecke bepflanzt. Eine erste zerstörende Kontrolle ausgewählter Rohrverbindungen erfolgte im Jahr 2000. Zu diesem Zeitpunkt wurden noch keine Wurzeln in den von außen zugänglichen Rohren festgestellt. Auch der Ausbau der Rohre und die Inaugenscheinnahme der Rohrverbindungen von außen erbrachte das selbe Ergebnis. Es waren noch keine Wurzeln in die Rohrverbindung gewachsen.



Abb. 14: Versuchsaufbau zur Prüfung der Wurzelfestigkeit von PVC-Rohren der Funke Kunststoffe GmbH: **A** Versuchsaufbau nach der Pflanzung in einem mittelformatigen Versuchszustand im Jahr 1996; **B** Versuchspflanzung im Jahr 2000; **C** Intensive Durchwurzelung im Substrat, keine Wurzeln in den Rohrverbindungen im Jahr 2000. (aus [50])

3.3.4.2 CSIRO

Während in Deutschland und Europa die Forderungen nach einem Mindestanpressdruck der Rohrverbindungen erst in den letzten Jahren Einzug in die Normen gefunden hat - so wird in DIN EN 1916 ein Anpressdruck von mindestens 1,5 bar = 0,15 MPa gefordert – wurden in Australien für PVC-Rohre bereits im Jahr 1984 (vgl. [51]) höhere Anforderungen gestellt. In dieser Norm wurden Anpressdrücke in der Rohrverbindung in Höhe von 5,5 bar = 0,55 MPa und Anpressdruckflächen von mindestens 7 mm gefordert. Nach einer Betriebsdauer von 50 Jahren sollten diese Rohrverbindungen immer noch einen Anpressdruck von 3,5 bar = 0,35 MPa aufweisen. Aufgrund von Erfahrungen mit PVC-Rohren in Ländern mit einem vergleichbaren Klima, wie San Diego (Kalifornien, USA) und Südafrika, sowie Erfahrungen aus Neuseeland – dort wird ein Mindestanpressdruck von 4 bar = 0,4 MPa gefordert (vgl. [52]) - wurden die hohen Anforderungen in der australischen Norm hinterfragt. Auch australische Netzbetreiber unterstützten dieses Vorgehen, da sich in Folge der hohen Anpressdrücke auch die Gefahr von Einbauschäden erhöht.

Im kleineren Maßstab wurden aus diesen Gründen Versuche durch das CSIRO - Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation durchgeführt, um den Einfluss unterschiedlicher Rohrverbindungstypen – VC-pipes (Vitrified Clay Pipes; Steinzeugrohre), PVC-pipes (PVC-Rohre) und FRC-pipes (Fibre-Reinforced-Concrete-Pipes; Faserverstärkte Betonrohre) - auf ihre Wurzelfestigkeit hin zu untersuchen. Dabei wurden zwei unterschiedliche Versuchsreihen angesetzt. Die Versuche unterschieden sich insbesondere durch die Einbaulage der Rohrverbindungen. In Rahmen der ersten Versuchsreihe wurden die Rohrverbindungen vertikal eingebaut (Vertikal-Versuche) und im Rahmen der zweiten Versuchsreihe horizontal (Horizontal-Versuche). Der Anpressdruck in den Rohrverbindungen wurde bei beiden Versuchsansätzen mit einem Verfahren nach AS 1462 Part 13 [53], dem sogenannten *Interfacial-Sealing-Pressure-Test* (IFSP) ermittelt, bei dem ein, mit einer Aussparung versehener Zylinder DN 150, in die Muffe geschoben wird. Über die Aussparung wird Wasserdruck aufgebracht, um das Versagen der Dichtung in Abhängigkeit von der Einschubtiefe zu messen. (vgl. Abb. 15)

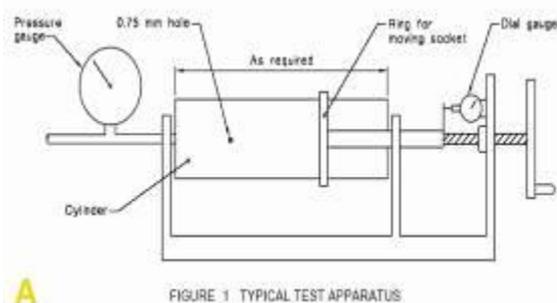


Abb. 15: Bestimmung des Anpressdrucks in der Rohrverbindung nach AS 1462 Part 13: **A** Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus (vgl. [54]). **B** Versuchsstand mit Weg- und Druckmesseinrichtung (vgl. [54]).

Die Vertikal-Versuche wurden an PVC-Rohren DN 150 mit drei unterschiedlichen Dichtungstypen durchgeführt (vgl. Abb. 16). Im Rahmen dieser Versuche wurden die Rohrverbindungen senkrecht aufgestellt, so dass der Ringspalt zwischen Spitzende und Muffe

senkrecht nach oben zeigten. Um die Rohrverbindung wurde ein ringförmiger Kranz angebracht und in diesen Kranz unterschiedliche Pflanzen eingesetzt.



Abb. 16: Vertikale Versuche des CSIRO, Australien: **A** Rohrverbindungen im bepflanzt Zustand. **B** Rohrverbindung nach dem Ausbau, längs aufgeschnitten [54].

Dieser Versuchsaufbau hat den Vorteil, dass er kompakt und einfach zu inspizieren ist sowie ein verhältnismäßig kleines Bodenvolumen aufweist und so die Wachstumsperiode bis zum Eintritt einer möglichen Interaktion mit dem Dichtelement kurz ist. Als Nachteil wurde angesehen, dass der senkrechte Versuchsaufbau nicht der üblichen Einbausituation entspricht und sich Wasser im Zwickel zwischen Elastomerdichtung und Spitzende ansammeln kann. [55]

Als Versuchspflanzen wurde sogenanntes Rye-Gras (*Lolium rigidum*) und Teebaumpflanzen (*Melaleuca armillaris*) eingesetzt. Pro Versuchsansatz wurde jeweils nur eine Pflanzensorte eingesetzt. Die Versuchsansätze mit Rye-Gras wurden nach 7 Monaten, die mit Teebaumpflanzen nach 14 Monaten ausgebaut. An keiner Rohrverbindung wurde ein Wurzeleinwuchs festgestellt, obwohl auch Rohrverbindungen bewusst undicht, d.h. mit einer Anglerschnur zwischen Elastomerdichtung und Spitzende, eingebaut wurden. (vgl. [53])

Aufgrund der oben genannten Nachteile mit den Vertikal-Versuchen wurden in einer zweiten Versuchsreihe sogenannte Horizontal-Versuche an Rohren und Rohrverbindungen DN 150 durchgeführt. Mit Hilfe des Versuchsaufbaus sollten insbesondere die o.g. Nachteile der Vertikalversuche vermieden werden. Die Horizontal-Versuche wurden auf weitere Rohrwerkstoffe ausgeweitet. Neben PVC-Rohren wurden auch faserverstärkte Betonrohre und Steinzeugrohre verwendet. Darüber hinaus bestand hier die Möglichkeit auch Verformungen, z.B. in Form von Scherwegen bzw. bei biegeweichen Rohren Ovalisierungen einzustellen (vgl. Abb. 16 A bis D). In Abb. 16 C sind die ausgebauten Rohrverbindungen dargestellt.

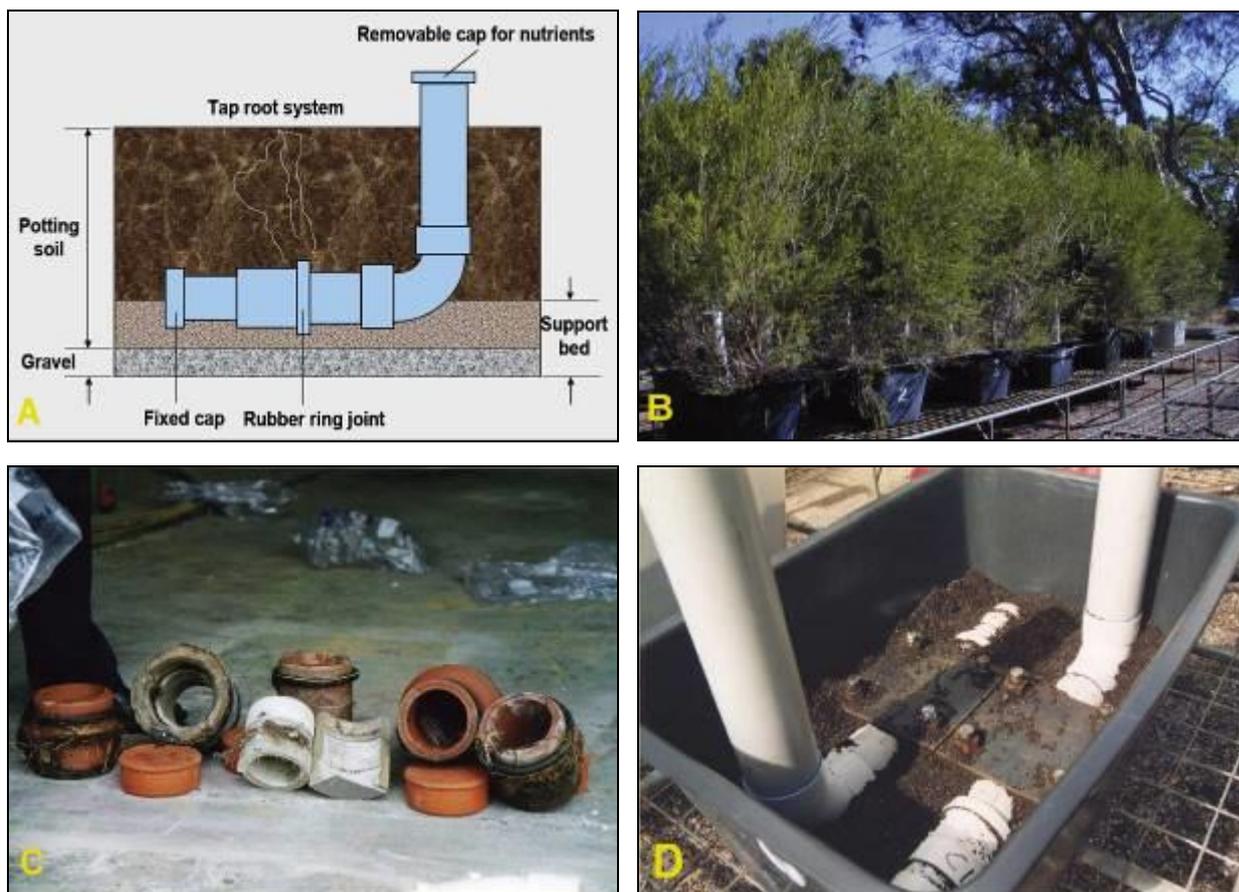


Abb. 17: Horizontal-Versuche des CSIRO, Australien: **A** Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus. **B** Bepflanzte Versuchsgefäße. **C** Rohrverbindungen aus unterschiedlichen Werkstoffen nach dem Ausbau. **D** Verformung des Spitzendes mit Hilfe einer Stahlplatte.

Als Versuchspflanzen wurden, wie auch bei den Vertikal-Versuchen, Rye-Gras und Teebaumpflanzen verwendet. Die Wachstumsperiode des Grases betrug 6 Monate und diejenige der Teebaumpflanze 32 Monate.

Nach 32 Monaten wurden folgende Ergebnisse erzielt:

- Von den Keramikrohren waren 7 von 8 Rohren verwurzelt.
- Von den Rohren aus faserverstärktem Beton waren 3 von 8 Rohren verwurzelt.
- Von den Rohren aus PVC-U war kein Rohr verwurzelt.

Die durchgeführten Untersuchungen zur Bestimmung der jeweiligen Anpressdrücke mit dem IFSP-Verfahren (vgl. [55]) zeigten, dass die Anpressdrücke in den Keramikrohren und denen aus faserverstärktem Beton höher waren, als die in Normen AS 1741 (0,55 MPa = 5,5 bar) bzw. AS 1260-2002 (0,4 MPa = 4 bar) [56] geforderten und diese trotzdem Wurzeleinwuchs aufwiesen. Dagegen wiesen auch PVC-Rohre mit geringeren Anpressdrücken keinen Wurzeleinwuchs auf. Gründe für diese unterschiedlichen Ergebnisse wurden nicht genannt.

3.3.4.3 Wurzelndruck, Anpressdruck, Ringräume und Ringspalte

Im Rahmen von [1] wurden sowohl die mechanischen Eigenschaften von Wurzeln als auch die mechanischen und geometrischen Eigenschaften von Rohrverbindungen untersucht.

So konnte mit Hilfe einer direkten Messmethode beispielhaft der Druck gemessen werden, den Primärwurzeln unterschiedlicher Pflanzenarten erzeugen können. Dabei wurde deutlich, dass selbst krautige bzw. einjährige Pflanzen wie Erbsen (*Pisum sativum*) mit ihren Wurzeln einen Druck von bis zu 5,9 bar erzeugen. An den Wurzelspitzen (Primärwurzeln) von Stieleichen (*Quercus robur*) konnte ein weit höherer Druck von bis zu 11,9 bar gemessen werden. (vgl. **Tabelle 2**)

Tabelle 2: Messwerte der Druckmessung an Keimwurzeln von Erbsen sowie Primärwurzeln von Eichen (*Quercus robur*).

Art	ermittelter Maximaldruck
<i>Pisum sativum</i> (Garten-Erbse)	5,9 bar
<i>Quercus robur</i> (Stieleiche)	11,9 bar

In Australien und Neuseeland (vgl. Abschnitt 3.3.4.2) wird in AS/NSZ 1260 (vgl. [56]) bei PVC-Rohren ein minimaler Anpressdruck des Dichtmittels in Höhe von 0,4 MPa (4,0 bar) und eine minimale Anpressdruckfläche von 4,0 mm gefordert. Für Rohre und Formstücke aus Beton gelten die Anforderungen der DIN EN 1916 [57]. Als Mindestforderung wird dort ein Anpressdruck in Höhe von 0,15 MPa (1,5 bar) gefordert.

Die mechanischen Untersuchungen an Rohrverbindungen DN 150 im Rahmen von [1] ergaben stark variierende Anpressdrücke und Anpressdruckflächen für unterschiedliche Rohrprodukte. Insbesondere die Mindestanpressdrücke schwankten von 0,8 bar bis 6,6 bar. Vergleicht man diese Werte ohne Berücksichtigung anderer Faktoren, wie beispielsweise der Rohrgeometrie, mit den gemessenen Wurzeldrücken, läge der Schluss nahe, dass alle untersuchten Rohrverbindungen durchwurzelt werden können. Als weiterer den Wurzelwuchs beeinflussender Faktor wurde die Geometrie der Rohrverbindung untersucht. Die Größe des Ringspalts und des Ringraums vor dem Dichtelement können die Wahrscheinlichkeit des Einwuchses in die Rohrverbindung beeinflussen. Darüber hinaus hat eventuell die Sauerstoffversorgung durch die Rohrverbindung einen Einfluss auf das Wachstum der Wurzeln. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurden drei wesentliche Eigenschaften von Rohrverbindungen zur Bewertung ihrer Wurzelfestigkeit beschrieben:

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.

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. verwehrtten 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 Einwuchsriskos 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.

Betrachtet man vor diesem Hintergrund beispielhaft die im Rahmen von [1] untersuchten Rohrverbindungen, so wird deutlich, dass einige der zur Bewertung notwendigen Prüfungen bereits im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführt wurden. Auf dieser Grundlage kann somit ein erster Ansatz für ein Bewertungsmodell zur Wurzelfestigkeit von Rohrverbindungen dargestellt werden (vgl. Tabelle 3). Auch wenn die Bewertung und Gewichtung der einzelnen Kriterien zum Teil subjektiven Einflüssen unterliegt, so werden hierdurch doch die Stärken und Schwachpunkte der am Markt verfügbaren Produkte in übersichtlicher Weise deutlich. Die Beurteilung erfolgt als Stufen keiner (○), geringer (●), großer (●●) und ausgezeichneter Wirkung (●●●) zur Verhinderung eines Wurzeleinwuchses durch die Rohrverbindung.

Tabelle 3 Beurteilung der Wurzelfestigkeit von Rohrverbindungen auf Basis der Wurzeleinwuchs behindernden Einflüsse (vgl. [1])

Eigenschaft	Wirkungsweise	Rohrwerkstoff, Rohrverbindung											
		Stanzzeug				PVC-U		Duktiler Gussseidel	Beton	GFK	PE		
		Benor	Ceragfix	Eurotop	Eurotrad	Commer	KG	Tyton	Direktvermörtelt	PWC-Kuppelung	Anschluß	Plastische Geschwindigkeit	
I Gegendruck	Anpressdruck	-	••	••	•	-	•	••••	-	-	-	-	-
		-	••	•	0	-	•	••	-	-	-	-	-
	Dichtfläche	-	••	•	•	-	•	••••	-	-	-	-	-
		-	••	•	0	-	•	••	-	-	-	-	-
II Abweiche Geometrie	Außendruckdichtheit												
	Ringspalt			••		•	••••		••	••			
	Ringraum	•	•	•	•	•	••			•		•	
	Zwickel an der Elastomerdichtung	•	•	•	•	•	•			•		•	•
III Gasdichtheit	Oberflächenstruktur	••••	••••	•	••••	••••	••••					••••	••••
	Gasdichtheit	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Wurzeleinwuchs behindernde Einflüsse:													
		-	nicht geprüft				0	keine Wirkung					
							•	geringe Wirkung					
							••	große Wirkung					
							••••	ausgezeichnete Wirkung					
		•	subjektive Einschätzung					kein Kriterium bzw. andere Wirkungsweise					

3.3.5 Zusammenfassung

3.3.5.1 Einfluss der Rohrverbindung

Wurzelschäden betreffen unterschiedliche Verbindungssysteme. Aufgrund der Konstruktion von Steckverbindungen verbleibt an der Muffe ein ringförmiger Raum (Ringraum), der bis zum Dichtelement reicht und von außen her über den Ringspalt zugänglich ist (Abb. 18). Aufgrabungen im Rahmen abgeschlossener Forschungsprojekte [1], [3] haben ergeben, dass Wurzeln bei Eindringen in eine Rohrverbindung generell in diesen äußeren Ringraum einwachsen und darauf in vielen Fällen in der Rohrverbindung kreisförmig entlang des Leitungsumfanges weiter wachsen.

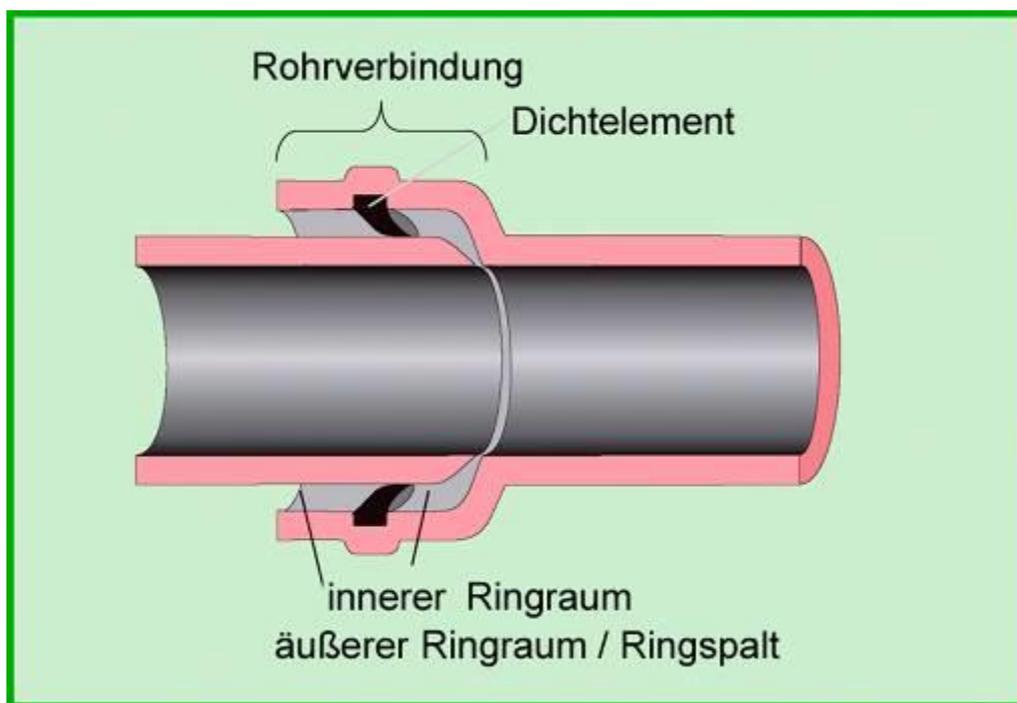


Abb. 18: Der äußere Ringraum einer Rohrverbindung ist für Wurzeln vom Bettungs- bzw. Verfüllmaterial aus erreichbar. Bei Durchwachsen des Dichtelementes erreichen sie den inneren Ringraum und damit den Leitungsquerschnitt.

Bisher wurde in der Bundesrepublik Deutschland meist davon ausgegangen, dass Wurzeln lediglich in undichte Rohrverbindungen einwachsen. Das Austreten von Leitungsmedium durch die Undichtigkeit weist den Wurzeln, gemäß der weitläufigen Annahme, den Weg zu den Rohrverbindungen. Als Grund für den Wurzeleinwuchs wird somit ausschließlich die in [1] definierte Leck-Hypothese herangezogen. Auf Grundlage dieser Hypothese wurden die Prüfungen zum Nachweise der Wurzelfestigkeiten in Normen verankert. Demnach ist der Nachweis der Wurzelfestigkeit, z.B. nach DIN 4060 [4] erbracht, wenn eine Rohrverbindung, unter Einwirkung einer definierten Scherlast, als dicht gemäß DIN EN 1610 [5] geprüft wird. Im Rahmen des abgeschlossenen Projektes „Wurzeleinwuchs in Abwasserleitungen und Kanäle“ [1] wurde beschrieben, dass nicht nur undichte Rohrverbindungen, sondern auch unbeschädigte, also wasserdichte Rohrverbindungen durchwurzelt werden.

3.3.5.2 Einfluss des Dichtelements

Bisherige Untersuchungen haben deutlich gezeigt, dass luftgefüllte Freiräume das Wachstum der Wurzeln fördern können (vgl. [1]). Entsprechend kann die Wurzelfestigkeit entscheidend durch die Geometrie der Rohrverbindung und die damit angebotenen bzw. verwehrteten 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 Einwuchsriskos zu sein.

Unabhängig vom Werkstoff müssen Rohrverbindungen leicht montierbar, erschwinglich und dauerhaft ausgeführt sein. Generell werden steckbare Rohrverbindungen von Abwasserleitungen und –kanälen in der Bundesrepublik Deutschland gemäß DIN 4060 mit Hilfe einer Scherlastprüfung auf ihre Wurzelfestigkeit geprüft [4].

Das am häufigsten diskutierte Mittel zur Verhinderung von Wurzeleinwüchsen ist der Einsatz mechanisch wirkender Dichtelemente, 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 der wachsenden Wurzeln nicht zu überwinden ist.

3.3.5.3 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. [58]).

4 Untersuchungen an Rohrverbindungen

Schwerpunkt der Untersuchungen an Rohrverbindungen DN 150 waren:

- Ermittlung des **Anpressdrucks**,
- Beschreibung der jeweiligen **Rohrverbindungsgeometrien**,
- **Außendruckversuche** und
- weiterführende **Kulturversuche an Rohrverbindungen**.

Die Untersuchungen wurden an marktgängigen Rohrprodukten im Nennweitenbereich DN 150 durchgeführt. Zum Einsatz kamen Steckverbindungen für Rohre aus Steinzeug, PVC, PP und GGG (vgl. Tabelle 4).

Die jeweiligen Untersuchungen an den Rohrverbindungen werden in den Kapiteln 4.1 bis 4.3 beschrieben. In Kapitel 4.4 werden die jeweiligen Ergebnisse zusammengefasst und mit Blick auf die jeweiligen Auswirkungen auf die Wurzelfestigkeit der Rohrverbindungen beurteilt.

Tabelle 4: Übersicht der ausgewählten Rohrprodukte in Nennweiten DN 150, DN/OD 160 bzw. DN 160

Werkstoff	Produktbezeichnung, Nennweite, Hersteller	Abbildung
PVC-U	PVC KG, DN 160 Gebr. Ostendorf GmbH & Co KG	
	PVC-KG, DN 150 Wavin GmbH	
	Awadukt SN4 PVC KG DN/OD 160 Rehau AG + Co	
	Awadukt PVC SN8 DN/OD 160 Rehau AG + Co	
PP	Awadukt SN4 PP KG DN/OD 160 Rehau AG + Co	
	Rausisto SN10 PP KG DN/OD 160 Rehau AG + Co	
	PP KG-2000, DN 150 Gebr. Ostendorf GmbH & Co KG	
Steinzeug, glasiert	Cerafix, Steckmuffe L DN 150 Deutsche Steinzeug GmbH	
	Eurotrade, Steckmuffe L DN 150 Euroceramic GmbH	
Steinzeug, unglasiert	Eurotop DN 150 Euroceramic GmbH	
GGG, Duktiles Gussrohr	INTEGRAL, DN 150 Saint-Gobain Gussrohr GmbH	

4.1 Untersuchungen zur Ermittlung des Anpressdrucks

Zum Nachweis der Wurzelfestigkeit fordert DIN 4060 [4] unabhängig vom Rohrwerkstoff eine Scherlastprüfung, bei der das Zehnfache der Nennweite in Newton auf die Rohrverbindung aufzubringen und dann die Dichtheit der Rohrverbindung nachzuweisen ist. Diese Scherlast stellt die Mindestanforderung dar. Von diesen Mindestanforderungen abweichend werden höhere Anforderungen in den jeweiligen Produktnormen gefordert. Eine Übersicht der jeweiligen Scherlasten für den Nachweis der Beständigkeit der Rohrverbindungen gegenüber Scherlasten und somit zum Nachweis der Wurzelfestigkeit ist Tabelle 5 zu entnehmen.

So werden beispielsweise für den Werkstoff Steinzeug in DIN EN 295-3 [61] Scherlasten von 25 x DN bzw. für Rohre aus Duktilem Gusseisen nach DIN EN 598 [4] Scherlasten in Höhe von 30 x DN gefordert. Grundsätzlich ergibt sich die Höhe der Scherlasten jeweils proportional zum Rohrdurchmesser.

Tabelle 5: Nachweis der Wurzelfestigkeit von Rohrverbindungen aus unterschiedlichen Rohrwerkstoffen; Anforderungen der Normen.

Werkstoff	Produktnorm	Anforderung für die Scherlastprüfung
PVC-U	EN 1401-3 [59]	10 mal DN in [N]
PP	DIN EN 1451-1 [60]	10 mal DN in [N]
Keramik	DIN 295 Teil 5 [61, 62]	25 mal DN in [N]
Dukt. Gusseisen	DIN EN 598 [63]	30 mal DN in [N]

Die Scherlastbeständigkeit der ausgewählten Rohrverbindungen wurde in Anlehnung an der Versuchsanordnung nach DIN 4060 untersucht. Für die Untersuchungen wurde ein Versuchstand verwendet, bei dem die Prüflasten durch eine Kombination aus Auflagegewichten und Hebelmechanismus auf die Rohrverbindung übertragen werden (vgl. Abb. 19).

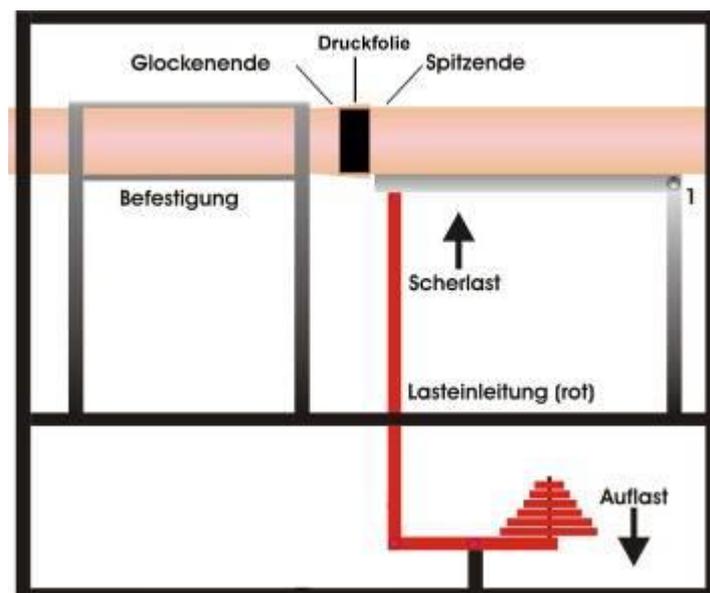


Abb. 19: Schematische Darstellung des Scherlastversuchs.

Die Wurzelfestigkeit von Rohrverbindungen wird, wie bereits in Kapitel 1 beschrieben, unter anderem durch den Anpressdruck des verwendeten Dichtelementes beeinflusst. Zur Verhinderung von Wurzeleinwuchs ist die Dichtheit von Leitungen nach DIN 4060 [4] zu gewährleisten. Wird auf eine Rohrverbindung Scherlast aus Richtung der Sohle aufgebracht, erhöht sich der Anpressdruck im Scheitelbereich der Rohrverbindung, entsprechend kommt es gleichzeitig zu einer Verminderung des Anpressdruckes im Sohlbereich (Abb. 20).

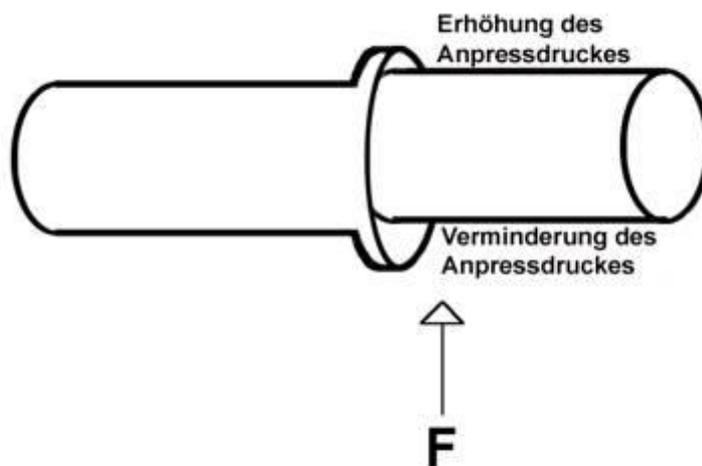
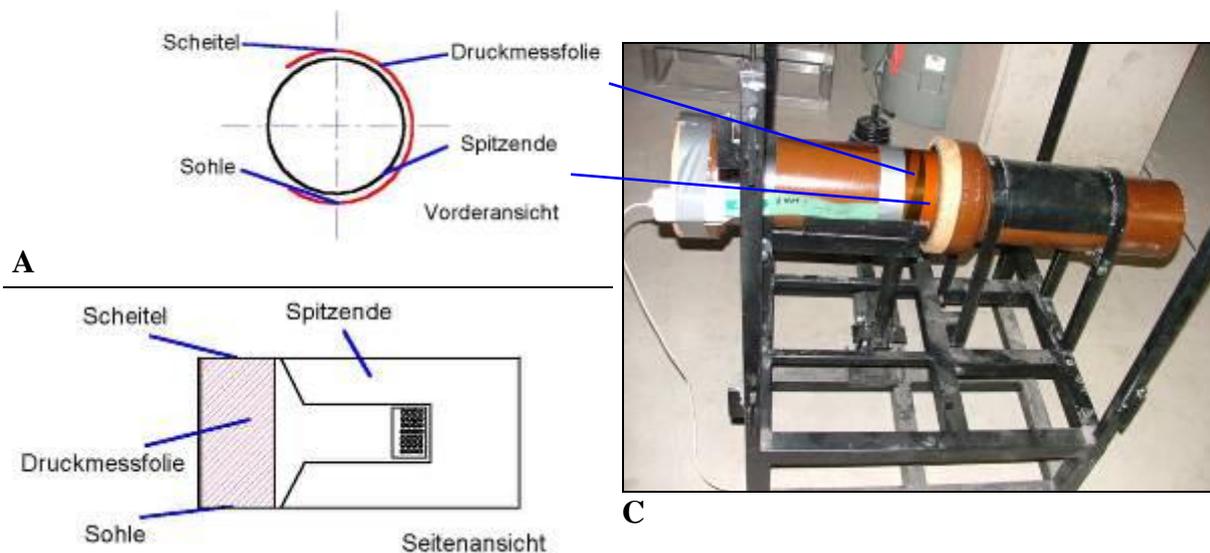


Abb. 20: Wirkung der Scherlast auf den Anpressdruck des Dichtelementes einer Rohrverbindung. Verminderung des Anpressdruckes im Bereich der Sohle, Erhöhung des Anpressdruckes im Bereich des Scheitels.

Für die Bestimmung der Anpressdrücke sowie der korrespondierenden Dichtflächen wurden die mit Druckmessfolien bestückten Rohrverbindungen in einem für Rohrquerschnitte bis ca. DN 150 konzipierten Scherlastversuchsstand untersucht (Abb. 19). Die Position der Druckfolie ist in Abb. 21 A und B dargestellt. Eine in den Scherlastversuchsstand eingebaute Rohrverbindung mit Druckfolie zeigt Abb. 21 C. Die Druckfolien wurden auf dem Spitzende befestigt, zusammen mit dem Spitzende in die Muffe eingeschoben und in den Scherlastversuchsstand eingebaut. Die Druckfolien messen ausschnittsweise die am Kreisring wirkende Anpressdruckverteilung zwischen Spitzende und Elastomerdichtung. Die eingesetzten Druckfolien haben eine aktive Druckfläche von 306 x 82,5 mm und können so die Anpressdrücke vom Kämpfer bis zur Sohle der Rohrverbindungen erfassen. Die Folien sind nach Herstellerangaben für Drücke bis 34,5 bar (500 psi) ausgelegt und wurden vor den Prüfungen kalibriert. Die aktive Druckfläche wird in einer Matrix von 44 x 34 Messpunkten aufgelöst. Das bedeutet, bezogen auf die Druckfolienbreite von 306 mm, eine Auflösung von $306 \text{ mm} / 44 = 6,95 \text{ mm}$ und für die Druckfolientiefe von 82,5 mm eine Auflösung von $82,5 / 34 = 2,43 \text{ mm}$. Die Anpressflächentiefe wird somit mit einer Auflösung von 2,43 mm gemessen und ergibt sich aus der Summe aller Messzellen, die den messbaren Schwellenwert von 0,1 bar überschreiten (vgl. [64]). 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 überwunden werden muss. Als kritische Bereiche der Rohrverbindung sind dann diejenigen Bereiche des Rohrumfangs zu bewerten, an denen der maßgebliche Anpressdruck vergleichsweise gering ist.

In den Versuchen wurden auf die Rohrverbindungen jeweils Scherlasten in Höhe der in den jeweiligen Rohrnormen geforderten Scherlasten F_s aufgebracht (vgl. **Tabelle 1**). Die Messdaten wurden dann hinsichtlich der Anpressdruckverteilung, kritischen Verbindungsbereichen und **maßgeblichen Anpressdrücken** bzw. **Anpressflächentiefen** ausgewertet.



B

Abb. 21: Messung des Anpressdruckes bei Einwirkung einer Scherlast. **A** Druckfolie auf dem Spitzende einer Rohrverbindung, Querschnitt. **B** Druckfolie auf dem Spitzende einer Rohrverbindung, Ansicht. **C** In den Scherlastversuchsstand eingebaute Rohrverbindung aus Keramik.

Im Folgenden sind die Anpressdruck- und Anpressflächenverteilung beispielhaft für eine Rohrverbindung ohne Scherlast (Abb. 22) und mit Scherlast (Abb. 23) dargestellt. Die in Abb. 24 dargestellte Farbskala spiegelt die gemessenen Druckwerte wider.

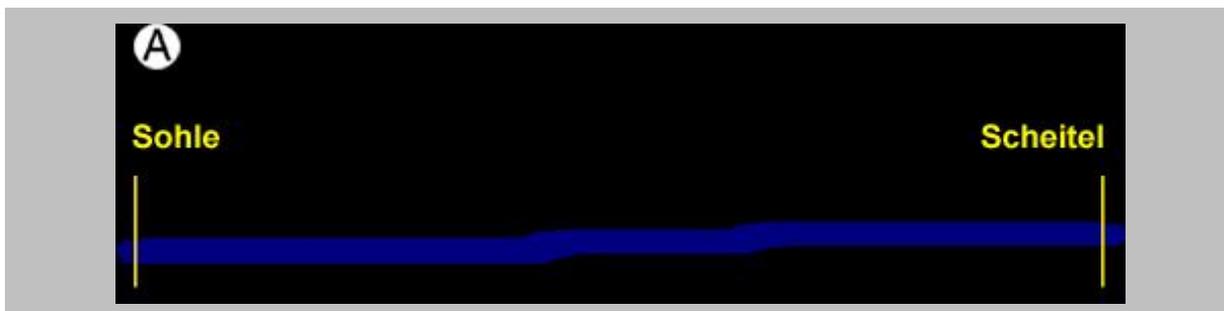


Abb. 22: Anpressdruckbild einer Rohrverbindung von der Rohrsohle bis zum Rohrscheitel ohne Scherlast.

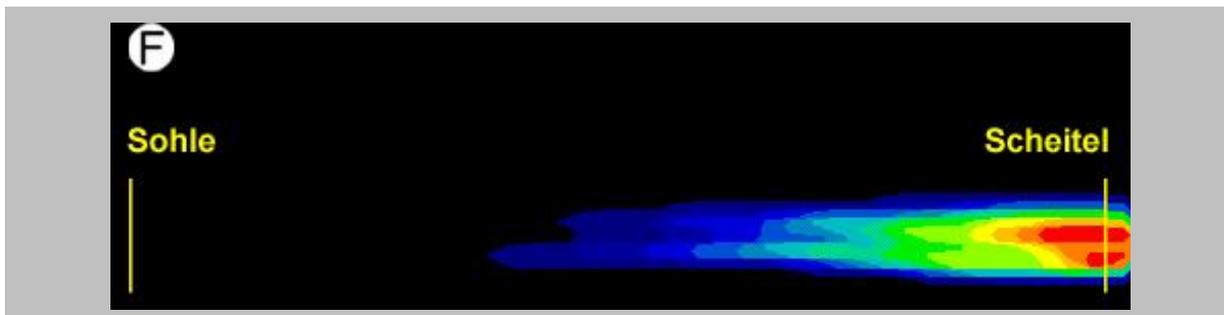


Abb. 23: Anpressdruckbild einer Rohrverbindung von der Rohrsohle bis zum Rohrscheitel unter Scherlast.



Abb. 24: Farblegende zur Darstellung und Zuordnung der Druckmesswerte (Seite 38-43).

Im Folgenden sind die Untersuchungen zur Bestimmung des Anpressdrucks der ausgewählten Rohrverbindungen DN 150 dargestellt. Die Ergebnisse fließen auch in die Gesamtübersicht in Kapitel 4.5 ein.

4.1.1 Rohre aus Keramik-/Steinzeug

a) Cerafix DN 150 Steckmuffe L, Deutsche Steinzeug GmbH

Die maßgeblichen Anpressdrücke für die Cerafix-Verbindung betragen im Versuch ohne Scherlast im Mittel 3,0 bar. Die korrespondierende mittlere Anpressflächentiefe betrug 8,1 mm.

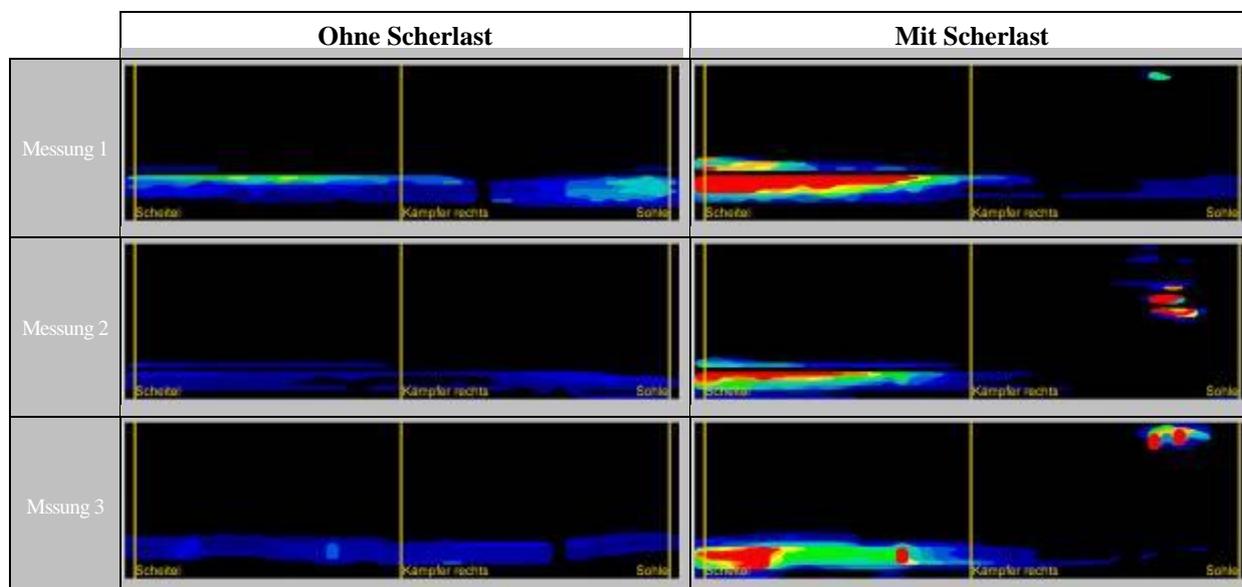


Abb. 25: Messung des Anpressdruckes mittels einer Druckfolie. Rohrverbindung Steinzeug Cerafix DN 150 ohne Scherlast und mit Scherlast nach DIN 4060 [4]. Maßgeblicher Anpressdruck im Bereich der Rohrsohle: **Messung 1)** ohne Scherlast-Wirkung 5,3 bar, mit Scherlast-Wirkung 0,4 bar **Messung 2)** ohne Scherlast-Wirkung 2,6 bar, mit Scherlast-Wirkung 0,1 bar, **Messung 3)** ohne Scherlast-Wirkung 1,0 bar, mit Scherlast-Wirkung 0,2 bar. **Mittelwerte** des Anpressdruckes ohne Scherlast **3,0 bar**, mit Scherlast **0,2 bar**.

b) Eurotrade DN 150, Euroceramic GmbH

Die maßgeblichen Anpressdrücke für die Eurotrade-Verbindung betragen im Versuch im Mittel 1,5 bar. Die korrespondierende mittlere Anpressflächentiefe betrug 2,4 mm.

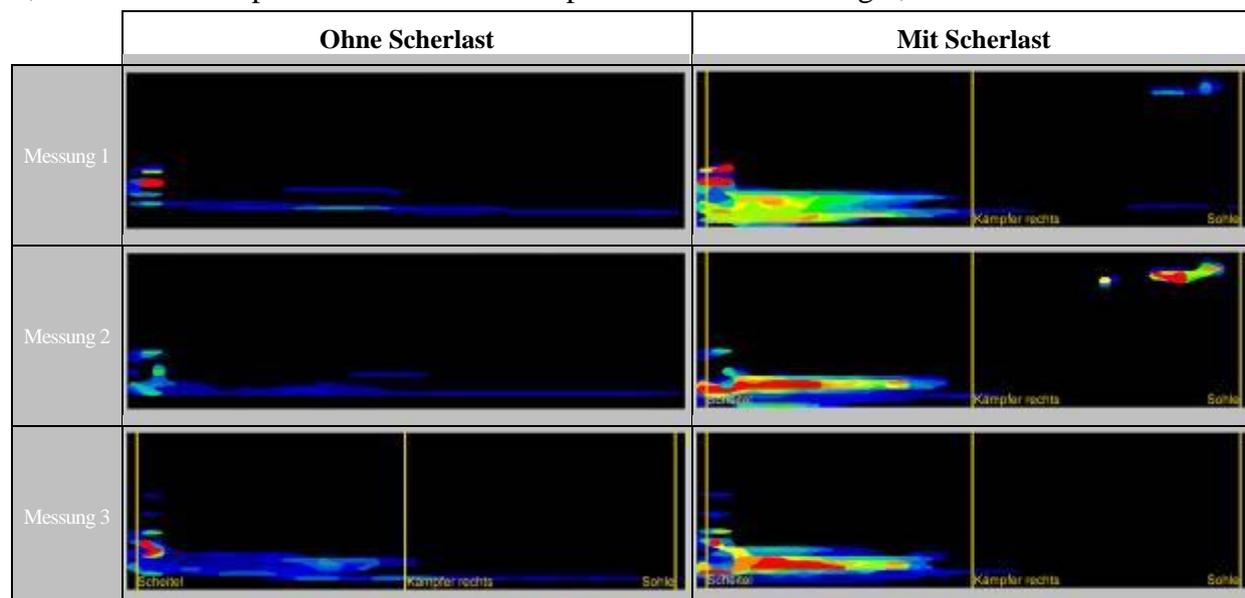


Abb. 26: Messung des Anpressdruckes mittels einer Druckfolie. Rohrverbindung Euroceramic Eurotrade DN 150 ohne Scherlast und mit Scherlast nach DIN [5]. Maßgeblicher Anpressdruck im Bereich der Rohrsohle: **Messung 1)** ohne Scherlast-Wirkung 2,3 bar, mit Scherlast-Wirkung 1,1 bar **Messung 2)** ohne Scherlast-Wirkung 1,1 bar, mit Scherlast-Wirkung 0,1 bar, **Messung 3)** ohne Scherlast-Wirkung 1,1 bar, mit Scherlast-Wirkung 0,1 bar. **Mittelwerte** des Anpressdruckes ohne Scherlast **1,5 bar**, mit Scherlast **0,4 bar**.

c) Eurotop Überschiebkupplung, DN 150, Euroceramic GmbH

Die maßgeblichen Anpressdrücke für die Eurotop-Verbindung betragen im Versuch im Mittel 2,5 bar. Die korrespondierende mittlere Anpressflächentiefe betrug 2,4 mm.

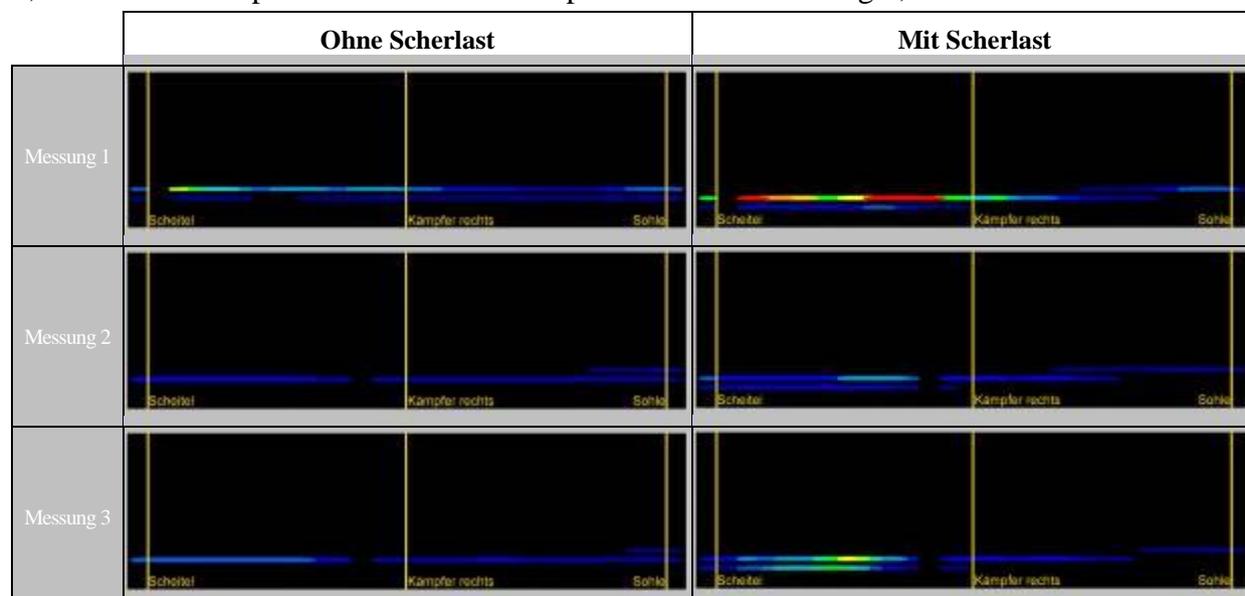


Abb. 27: Messung des Anpressdruckes mittels einer Druckfolie. Rohrverbindung Euroceramic/Hepworth Eurotop DN 150 ohne Scherlast und mit Scherlast nach DIN [4]. Maßgeblicher Anpressdruck im Bereich der Rohrsohle: **Messung 1)** ohne Scherlast-Wirkung 3,7 bar, mit Scherlast-Wirkung 4,3 bar **Messung 2)** ohne Scherlast-Wirkung 1,7 bar, mit Scherlast-Wirkung 1,5 bar, **Messung 3)** ohne Scherlast-Wirkung 2,0 bar, mit Scherlast-Wirkung 0,1 bar. **Mittelwerte** des Anpressdruckes ohne Scherlast **2,5 bar**, mit Scherlast **2,0 bar**.

4.1.2 Rohre aus PVC-U

a) KG-PVC DN 160, Gebr. Ostendorf GmbH & Co. KG

Die maßgeblichen Anpressdrücke für die KG-PVC-Verbindung der Fa. Ostendorf betragen im Versuch im Mittel 4,5 bar. Die korrespondierende mittlere Anpressflächentiefe betrug 5,7 mm.

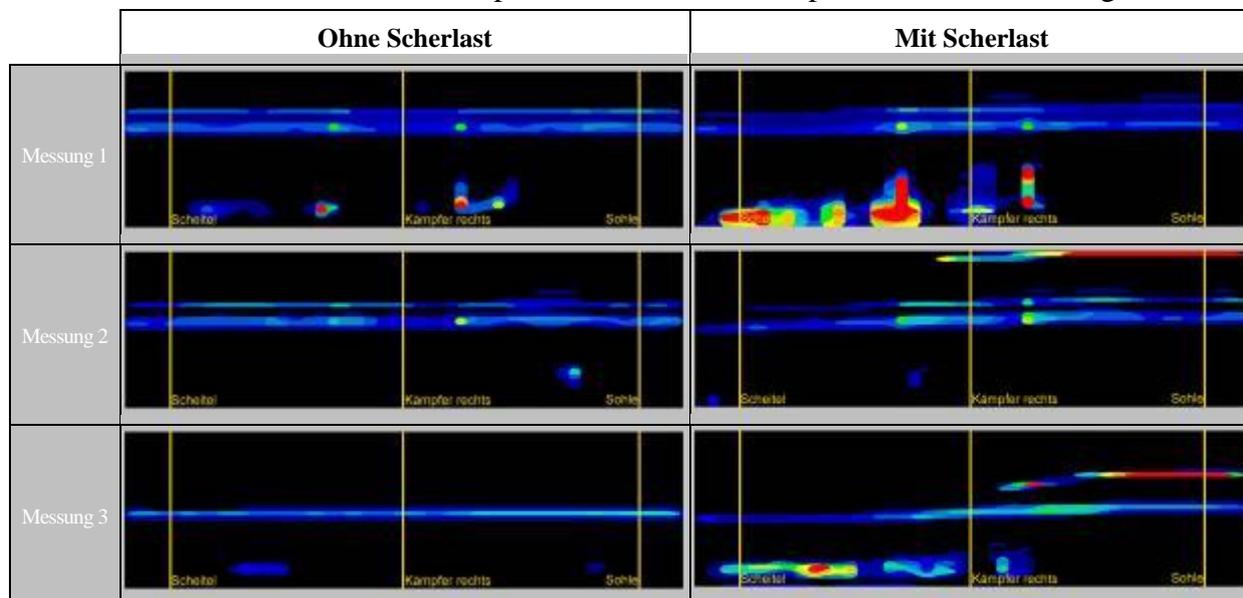


Abb. 28: Messung des Anpressdruckes mittels einer Druckfolie. Rohrverbindung Ostendorf KG PVC DN 160 ohne Scherlast und mit Scherlast nach DIN [4]. Maßgeblicher Anpressdruck im Bereich der Rohrsohle: **Messung 1)** ohne Scherlast-Wirkung 4,4 bar, mit Scherlast-Wirkung 3,1 bar **Messung 2)** ohne Scherlast-Wirkung 4,4 bar, mit Scherlast-Wirkung 2,9 bar, **Messung 3)** ohne Scherlast-Wirkung 4,8 bar, mit Scherlast-Wirkung 3,3 bar. **Mittelwerte** des Anpressdruckes ohne Scherlast **4,5 bar**, mit Scherlast **3,1 bar**.

b) Awadukt SN4 PVC, DN/OD 160, Rehau AG + Co

Die maßgeblichen Anpressdrücke für die Awadukt SN 4 PVC-Verbindung der Fa. Rehau betragen im Versuch im Mittel 7,7 bar. Die korrespondierende mittlere Anpressflächentiefe betrug 6,5 mm.

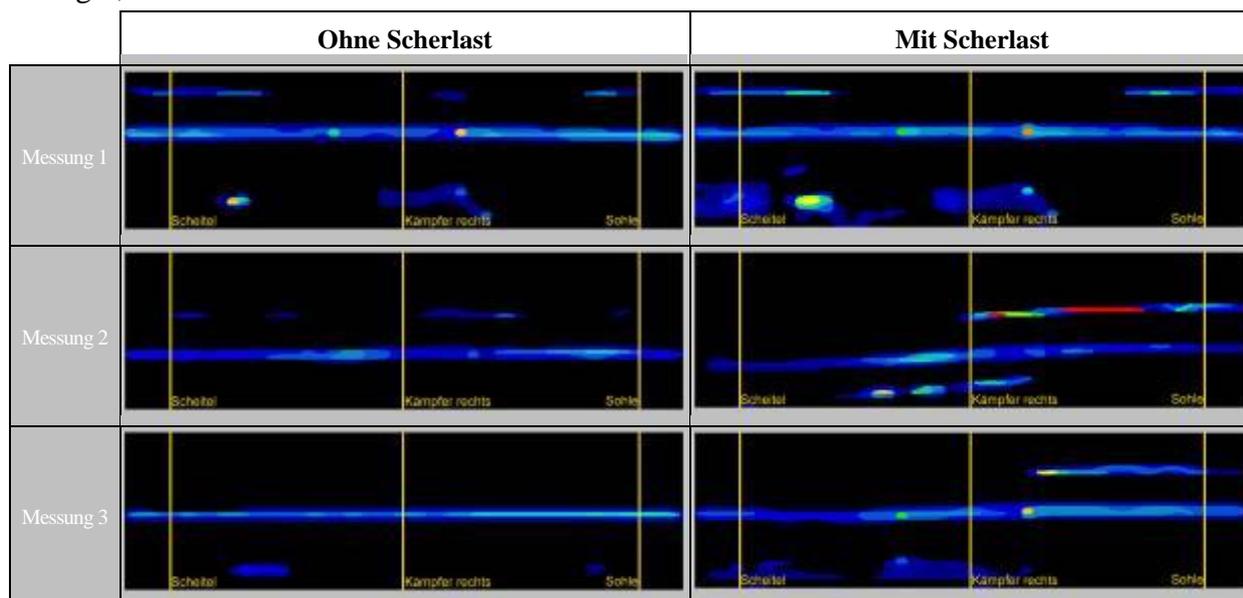


Abb. 29: Messung des Anpressdruckes mittels einer Druckfolie. Rohrverbindung Rehau Awadukt SN4 PVC DN/OD 160 ohne Scherlast und mit Scherlast nach DIN [4]. Maßgeblicher Anpressdruck im Bereich der Rohrsohle: **Messung 1)** ohne Scherlast-Wirkung 10,7 bar, mit Scherlast-Wirkung 9,0 bar **Messung 2)** ohne Scherlast-Wirkung 4,5 bar, mit Scherlast-Wirkung 2,4 bar, **Messung 3)** ohne Scherlast-Wirkung 8,1 bar, mit Scherlast-Wirkung 7,5 bar. **Mittelwerte** des Anpressdruckes ohne Scherlast **7,7 bar**, mit Scherlast **6,3 bar**.

c) KG- PVC, DN 150, Wavin GmbH Kunststoffrohrsysteme

Die maßgeblichen Anpressdrücke für die KG-PVC-Verbindung der Fa. Wavin betragen im Versuch im Mittel 4,1 bar. Die korrespondierende mittlere Anpressflächentiefe beträgt 4,9 mm.

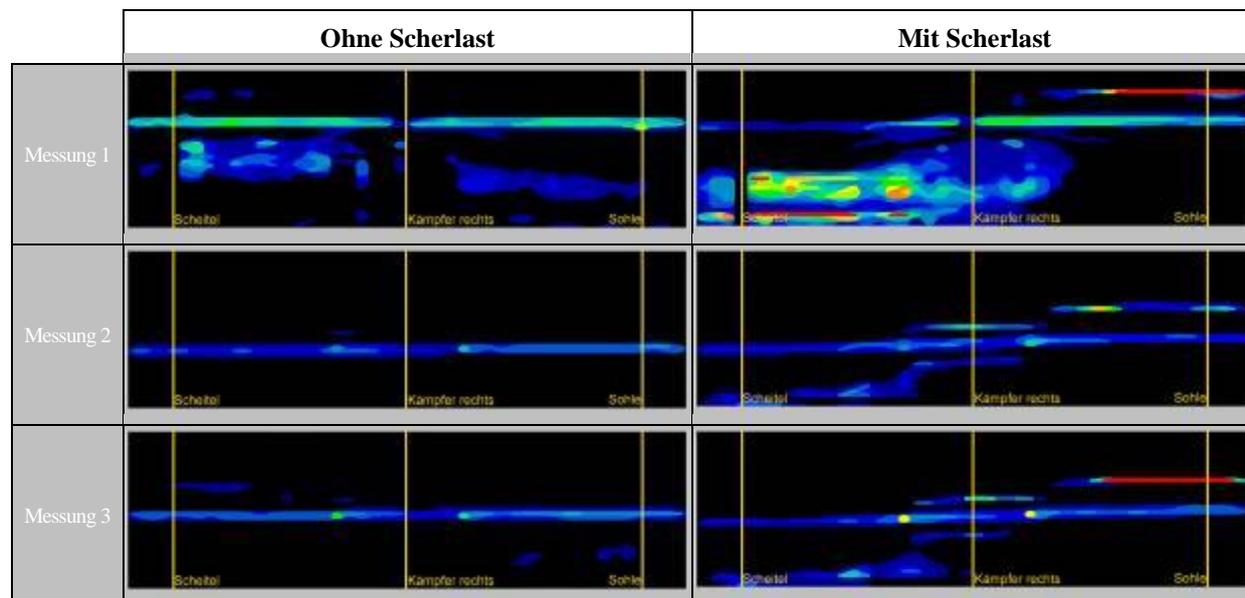


Abb. 30: Messung des Anpressdruckes mittels einer Druckfolie. Rohrverbindung Wavin KG PVC DN 150 ohne Scherlast und mit Scherlast nach DIN [4]. Maßgeblicher Anpressdruck im Bereich der Rohrsohle: **Messung 1)** ohne Scherlast-Wirkung 4,8 bar, mit Scherlast-Wirkung 3,9 bar **Messung 2)** ohne Scherlast-Wirkung 3,3 bar mit Scherlast-Wirkung 4,2 bar, **Messung 3)** ohne Scherlast-Wirkung 4,1 bar, mit Scherlast-Wirkung 3,0 bar. **Mittelwerte** des Anpressdruckes ohne Scherlast **4,1 bar**, mit Scherlast **3,7 bar**.

d) Awadukt PVC SN8, DN/OD 160, Rehau AG + Co

Die maßgeblichen Anpressdrücke für die Awadukt PVC SN 8-Verbindung der Fa. Rehau betragen im Versuch im Mittel 3,8 bar. Die korrespondierende mittlere Anpressflächentiefe betrug 7,3 mm.

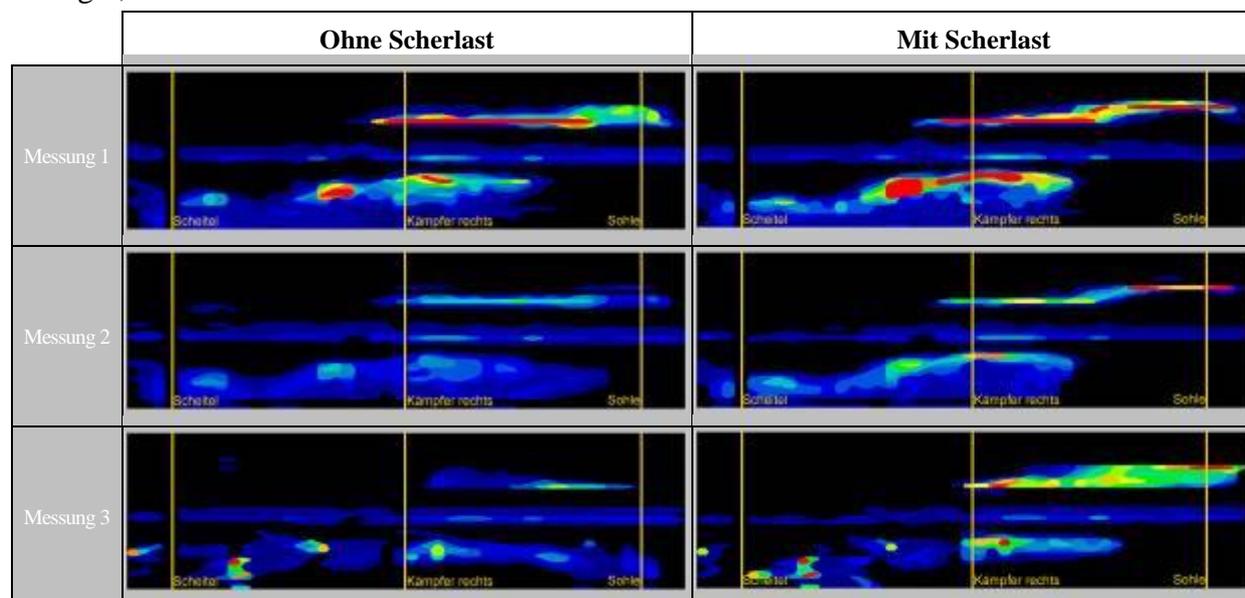


Abb. 31: Messung des Anpressdruckes mittels einer Druckfolie. Rohrverbindung Rehau Awadukt PVC SN8 DN/OD 160 ohne Scherlast und mit Scherlast nach DIN [4]. Maßgeblicher Anpressdruck im Bereich der Rohrsohle: **Messung 1)** ohne Scherlast-Wirkung 5,4 bar, mit Scherlast-Wirkung 2,0 bar **Messung 2)** ohne Scherlast-Wirkung 3,1 bar, mit Scherlast-Wirkung 1,3 bar, **Messung 3)** ohne Scherlast-Wirkung 2,8 bar mit Scherlast-Wirkung 1,7 bar. **Mittelwerte** des Anpressdruckes ohne Scherlast **3,8 bar**, mit Scherlast **1,7 bar**.

4.1.3 Rohre aus PP

a) KG-2000, DN 150, Gebr. Ostendorf GmbH & Co KG

Die maßgeblichen Anpressdrücke für die KG-2000-Verbindung der Fa. Ostendorf betragen im Versuch im Mittel 4,1 bar. Die korrespondierende mittlere Anpressflächentiefe betrug 12,2 mm.

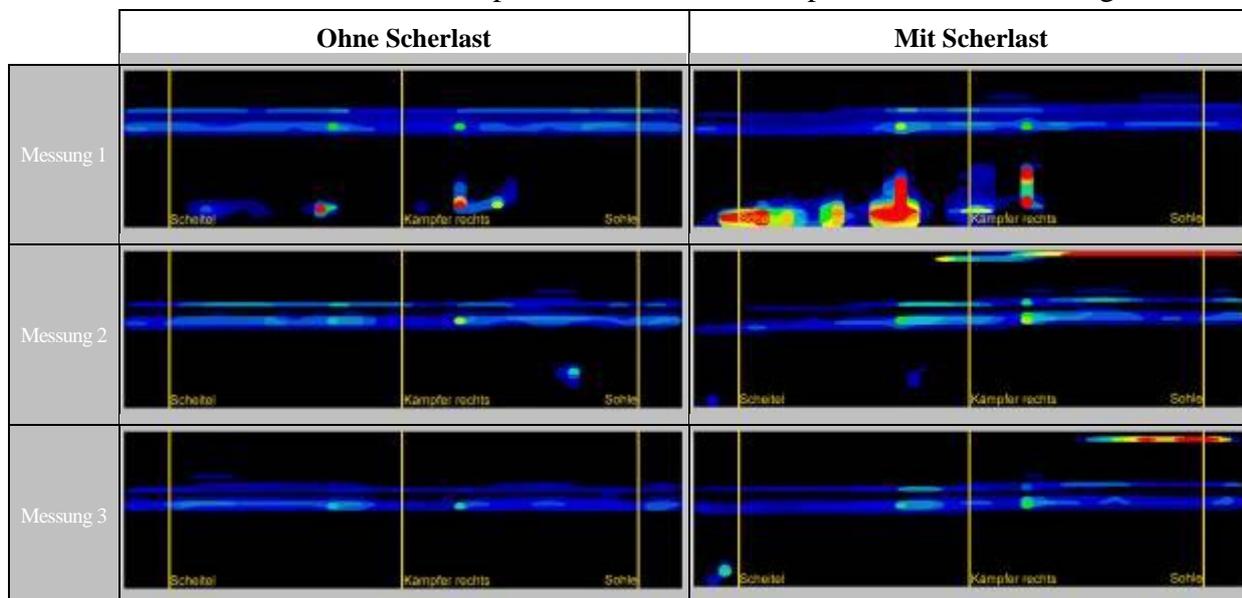


Abb. 32: Messung des Anpressdruckes mittels einer Druckfolie. Rohrverbindung Ostendorf KG-2000, DN 150 ohne Scherlast und mit Scherlast nach DIN [4]. Maßgeblicher Anpressdruck im Bereich der Rohrsohle: **Messung 1)** ohne Scherlast-Wirkung 4,7 bar, mit Scherlast-Wirkung 1,2 bar **Messung 2)** ohne Scherlast-Wirkung 3,5 bar, mit Scherlast-Wirkung 2,5 bar, **Messung 3)** ohne Scherlast-Wirkung 4,3 bar, mit Scherlast-Wirkung 4,5 bar. **Mittelwerte** des Anpressdruckes ohne Scherlast **4,1 bar**, mit Scherlast **2,7 bar**.

b) Awadukt SN4 PP, DN/OD 160, Rehau AG + Co

Die maßgeblichen Anpressdrücke für die Awadukt SN 4 PP-Verbindung der Fa. Rehau betragen im Versuch im Mittel 4,7 bar. Die korrespondierende mittlere Anpressflächentiefe betrug 7,3 mm.

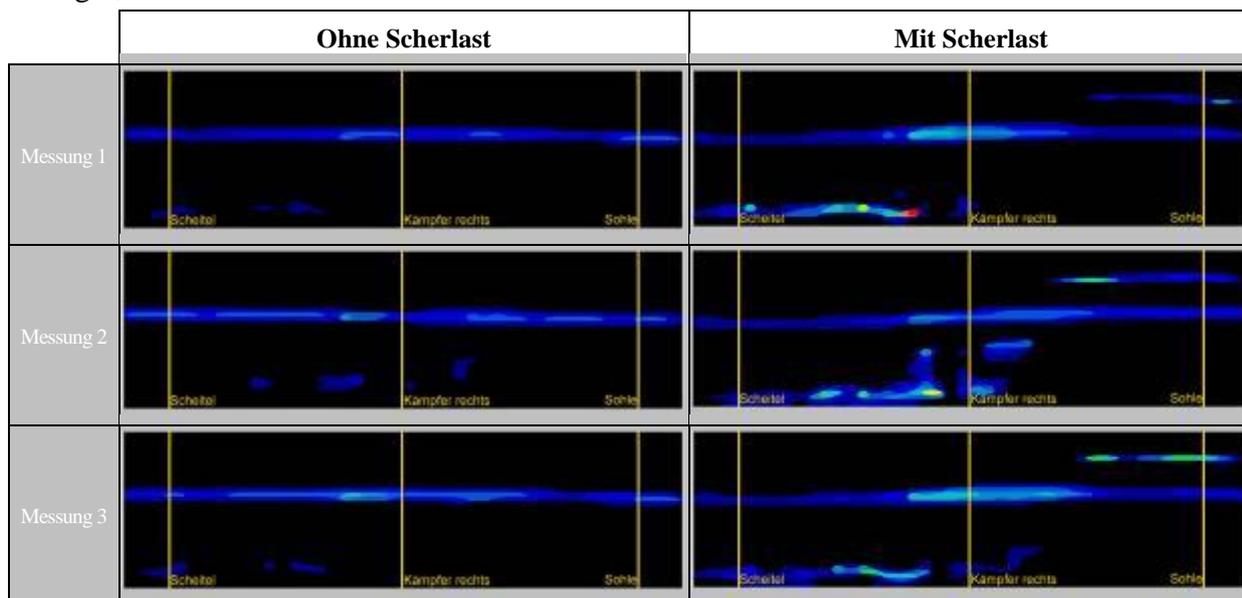


Abb. 33: Messung des Anpressdruckes mittels einer Druckfolie. Rohrverbindung Rehau Awadukt SN4 PP DN/OD 160 ohne Scherlast und mit Scherlast nach DIN [4]. Maßgeblicher Anpressdruck im Bereich der Rohrsohle: **Messung 1)** ohne Scherlast-Wirkung 4,8 bar, mit Scherlast-Wirkung 2,8 bar **Messung 2)** ohne Scherlast-Wirkung 4,1 bar, mit Scherlast-Wirkung 3,2 bar, **Messung 3)** ohne Scherlast-Wirkung 5,1 bar, mit Scherlast-Wirkung 3,6 bar. **Mittelwerte** des Anpressdruckes ohne Scherlast **4,7 bar**, mit Scherlast **3,2 bar**.

c) Rausisto SN 10 PP, DN/OD 160, Rehau AG + Co

Die maßgeblichen Anpressdrücke für die KG-PVC-Verbindung der Fa. Rehau betragen im Versuch im Mittel 6,5 bar. Die korrespondierende mittlere Anpressflächentiefe betrug 8,1 mm.

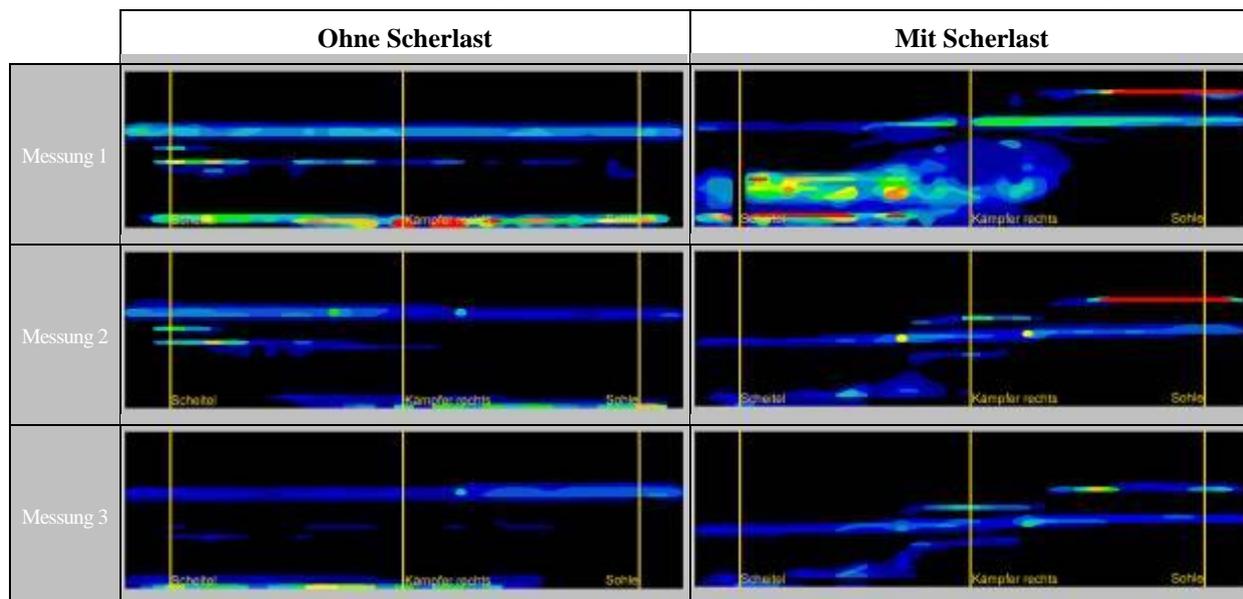


Abb. 34: Messung des Anpressdruckes mittels einer Druckfolie. Rohrverbindung Rehau Rausisto SN10 PP DN/OD 160 ohne Scherlast und mit Scherlast nach DIN [4]. Maßgeblicher Anpressdruck im Bereich der Rohrsohle: **Messung 1)** ohne Scherlast-Wirkung 9,1 bar, mit Scherlast-Wirkung 8,9 bar **Messung 2)** ohne Scherlast-Wirkung 3,7 bar, mit Scherlast-Wirkung 3,4 bar, **Messung 3)** ohne Scherlast-Wirkung 6,6 bar, mit Scherlast-Wirkung 6,5 bar. **Mittelwerte** des Anpressdruckes ohne Scherlast **6,5 bar**, mit Scherlast **6,3 bar**.

4.1.4 Rohre aus Dukt. Guss

e) Integral, DN 150, Saint-Gobain Gussrohr GmbH

Die maßgeblichen Anpressdrücke für die Tyton-Verbindung der Fa. Saint-Gobain betragen im Versuch im Mittel 22,1 bar. Die korrespondierende mittlere Anpressflächentiefe betrug 21,9 mm.

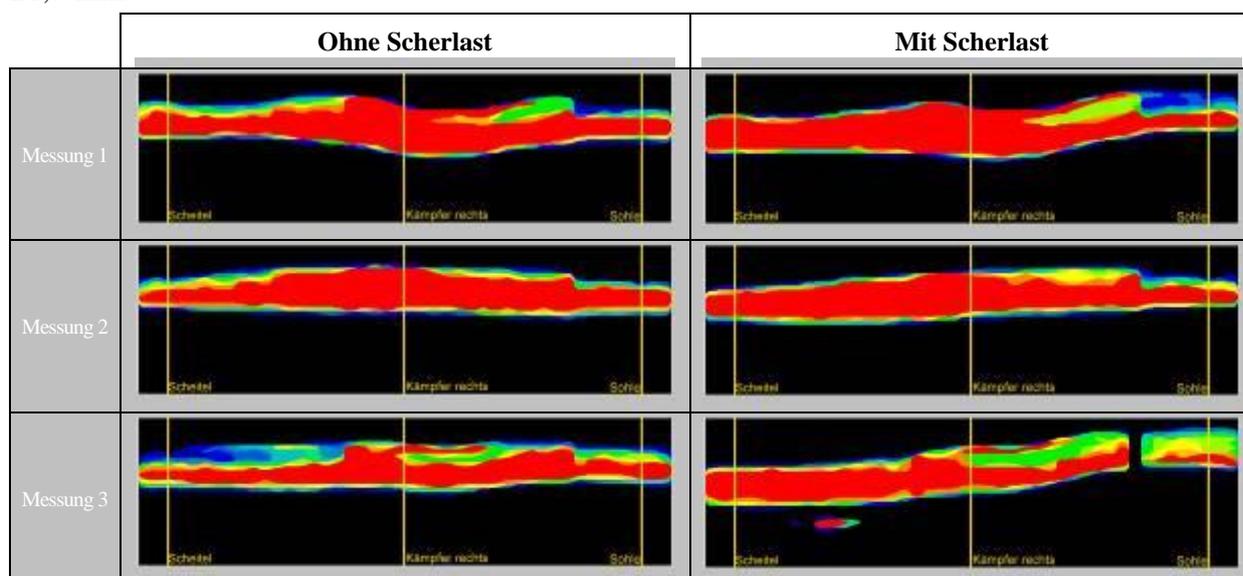


Abb. 35: Messung des Anpressdruckes mittels einer Druckfolie. Rohrverbindung Saint Gobain Gussrohr Tyton® DN 160 ohne Scherlast und mit Scherlast nach DIN [4]. Maßgeblicher Anpressdruck im Bereich der Rohrsohle: **Messung 1)** ohne Scherlast-Wirkung 24,8 bar, mit Scherlast-Wirkung 21,2 bar **Messung 2)** ohne Scherlast-Wirkung 23,9 bar, mit Scherlast 20,4 bar, **Messung 3)** ohne Scherlast-Wirkung 17,8 bar, mit Scherlast-Wirkung 10,8 bar. **Mittelwerte** des Anpressdruckes ohne Scherlast **22,2 bar**, mit Scherlast **17,5 bar**.

4.1.5 Schlussfolgerungen

Bei den hier untersuchten Rohrverbindungen handelt es sich ausschließlich um sogenannte Steckverbindungen, d.h. um bewegliche Rohrverbindungen, deren Dichtwirkung durch Zusammenstecken von Spitzende und Muffe oder Kupplung in Verbindung mit einem elastischen Dichtmittel erzielt wird (vgl. [65]). Steckverbindungen werden zum überwiegenden Teil für den Bau von Kanalisationsnetzen eingesetzt. Grundsätzlich müssen die Steckverbindungen die in den jeweiligen Rohrnormen definierten Anforderungen erfüllen (vgl. z.B. Tabelle 1). Die konkrete Ausbildung der Rohrverbindungen als Steckverbindungen wird durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Beispielhaft können folgende Einflussfaktoren genannt werden:

- Rohrwerkstoffe und deren Eigenschaften (Festigkeit, etc.),
- die aus den Fertigungsprozessen resultierenden Fertigungsgenauigkeiten,
- die Härte bzw. die Härten der eingesetzten Elastomerdichtungen,
- die Geometrien der Elastomerdichtungen.

Die durchgeführten Untersuchungen mit Druckmessfolien, eingebaut in Rohrverbindungen DN 150, veranschaulichen die Auswirkungen der Konstruktionsunterschiede auf die Anpressdrücke und deren Verteilung um den Rohrumfang. Eine Möglichkeit, die Eigenschaften von Rohrverbindungen zu beschreiben, besteht in der Definition von Anpressdrücken und Anpressflächentiefen bzw. wirksamen Dichtbreiten. Solche Anforderungen wurden in Deutschland erstmals durch die Einführung der DIN EN 1916 an Rohre und Formstücke aus Beton, Stahlfaserbeton und Stahlbeton gestellt (vgl. [57]). Die gemessenen mittleren Anpressdrücke der untersuchten Rohrverbindungen DN 150, ohne Einwirkung von Scherlasten, schwankten zwischen 2,0 bar und 22,2 bar. Für die Dichtbreiten wurden Längen zwischen 2,4 mm und 21,9 mm ermittelt. Unter Einwirkung von Scherlasten variierten die gemessenen mittleren Anpressdrücke zwischen 0,2 bar und 17,9 bar. Unterschiede gab es in der Reaktionen der jeweiligen Rohrverbindungstypen unter Berücksichtigung der Maßhaltigkeit der Rohre. Insbesondere für Rohrverbindungen mit einem vergleichsweise großen Ringspalt stellen Scherlasten kritische Belastungsszenarien dar. So wurde bei diesen Rohrverbindungen ein vergleichsweise starker Abfall der mittleren Anpressdrücke im entlasteten Bereich der Rohrverbindung festgestellt. Setzt man den mittleren Anpressdruck von unbelasteten Rohrverbindung ins Verhältnis zu belasteten Rohrverbindungen gleicher Bauart konnte eine maximale Reduzierung um den Faktor 10 ermittelt werden. An Rohrverbindungen mit einem vergleichsweise kleinen Ringspalt hatten Scherlasten aufgrund der Bewegungsbegrenzung einen geringeren Einfluss auf die Veränderung des Anpressdrucks im entlasteten Bereich. Hier beträgt dieser Faktor maximal 2,2.

Die untersuchten Rohrverbindungen DN 150 entsprechen alle dem aktuellen Stand der Technik und den jeweils gültigen Normen. Mit Blick auf die Beurteilung der untersuchten Rohrverbindungen auf Wirksamkeit gegen wachsenden Wurzeln können diese Untersuchungen allein nicht herangezogen werden. Die hier ermittelten Messwerte geben lediglich erste Hinweise zum Verhalten der Dichtmittel unter Scherlasten.

4.2 Außendruckuntersuchung

4.2.1 Prüfaufbau

Die Fähigkeit von Wurzeln, den Anpressdruck von Dichtelementen in Rohrverbindungen zu überwinden und in diese einzuwachsen, ist auf osmotischen Druck zurückzuführen, der in den Zellen der Wurzeln entsteht. Die mechanische Wirkung, die Wurzeln auf die betreffende Rohrverbindungen ausüben, lässt sich mit einem Außenüberdruck vergleichen.

Zur Ermittlung des Einflusses von Außenüberdruck auf Rohrverbindungen wurden die ausgewählten Rohrverbindungen (vgl. Tabelle 4) im montierten Zustand unter Einwirkung von Wasseraußendruck auf ihre Dichtheit untersucht. Für die Untersuchung wurde eine Außendruck-Prüfvorrichtung verwendet, die aus einem Gusseisen-Rohr DN 600 mit einer Länge von 1,0 m besteht. Das Rohr ist mit Hilfe von zwei Deckeln mit Flanschen durch Schrauben verschließbar (Abb. 36). Der Prüfraum wird an den Austrittsstellen der zu prüfenden Rohre durch zwei Dichtblasen abgeschlossen (Abb. 40 A). Dabei werden die Dichtblasen mit einem Luftdruck von bis zu 7 bar von außen an die Rohrwandung angepresst.



Abb. 36 Vorrichtung zur Wasseraußendruckuntersuchung, bestehend aus einem Gusseisenrohr DN 600 mit Deckeln, die mit Einrichtungen zum Befüllen, Entlüften und zur Druckmessung versehen sind.

Zur Vermeidung von Versätzen im Rohrverbindungsbereich wurde innerhalb des Prüfraumes ein Auflager aufgestellt. Diese Vorrichtung gewährleistet die horizontale Ausrichtung der zu prüfenden Rohrverbindungen (Abb. 40 B).

Darüber hinaus war sicherzustellen, dass der Außendruck nicht zu Schäden am Rohrschaft führt, sondern ausschließlich die Rohrverbindung versagen kann. So ist bei einem freien

biegeweichen Rohr unter gleichmäßiger Außendruckbelastung bereits systembedingt bei Außendrücken von 3 EI/R^3 mit einem Beulversagen des Rohres zu rechnen. Vor diesem Hintergrund wurden diese Rohre so ausgesteift (vgl. Abb. 37), dass ein Beulversagen erst bei deutlich höheren Drücken zu erwarten war und dennoch die lokale Verformungsfähigkeit im betrachteten Verbindungsbereich (Ringspalt/Ringraum) weitgehend erhalten blieb.

Unter Einsatz der in Abb. 37 dargestellten Stützvorrichtungen wurden die zu prüfenden biegeweichen Rohre in jeweils zwei Ebenen ausgesteift. Eine Stützvorrichtung besteht jeweils aus einem Stahlrohr und zweimal sechs Schrauben, die in zwei Ebenen und von Innen zugänglich in das Rohr geschraubt sind. Die Schrauben steifen die zu prüfenden Rohre durch formschlüssigen Kontakt mit deren Innenwand aus. Die beiden Stützvorrichtungen wurden so positioniert, dass die eine Aussteifungsebene im Bereich der von außen abdichtenden Dichtblasen (vgl. Abb. 38) positioniert wurde. Die zweite Aussteifungsebene im freien Rohr ergab sich dann automatisch durch den fixen Abstand der zweiten Aussteifungsebene voneinander. Vor, zwischen und hinter den Aussteifungsebenen verbleibt nach Verspannen ein ringförmiger Spalt von weniger als 10 mm zur Innenwand der zu prüfenden Rohre.



Abb. 37: Stützvorrichtung zur Vermeidung von Formveränderungen (Beulen) während der Untersuchung von Kunststoffrohren (nicht eingebaut, nicht verspannt).

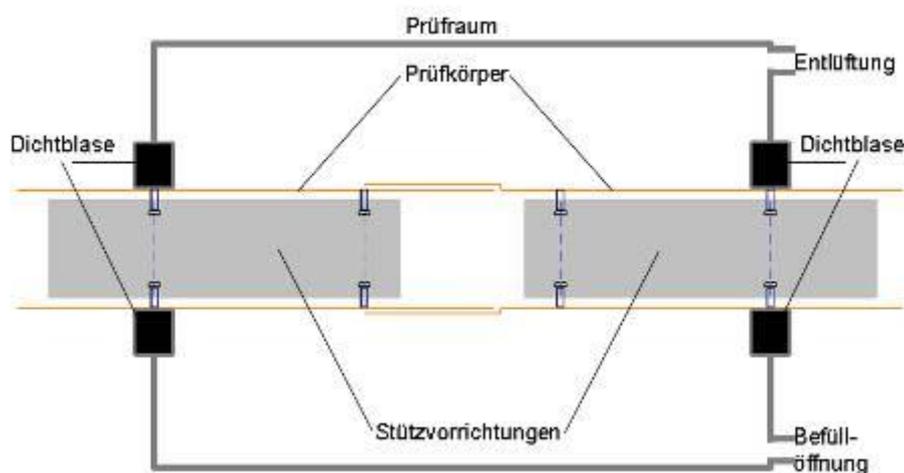


Abb. 38: Schema der Innendruckprüfanlage mit einem eingebauten Prüfkörper.

Der Fall "Stabilitätsversagen durch Beulen" wurde somit für niedrige Außendrucke weitgehend ausgeschlossen, da mit gleichmäßigem äußeren Wurzeldruck über den gesamten Rohrumfang kaum zu rechnen war, sondern lokale Beanspruchungen durch einzelne (Seiten-)Wurzeln den Einwuchsvorgang dominieren.

Vor diesem Hintergrund lassen sich folgende Lagerungsfälle unterscheiden:

1. äußere Verformungsbeschränkung durch die Muffe (Ringspalt-Beulen, vgl. Linerproblem)
2. äußere Bettung durch Elastomerdichtung (Beulen des gebetteten Kreisrings)
3. innere 6-Punkt-Lagerung durch Aussteifungsebene (Beulen bei 6-welliger Beulfigur)
4. innere Verformungsbegrenzung bei 2-welligem Beulen des freien Rohres
5. Einspannung durch innere 6-Punktlagerung und äußere Bettung in Dichtkissen

Beispielhaft sind in Abb. 39 Beulfiguren bei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen dargestellt. Der oben beschriebenen Fall eines freien biegeweichen Rohres unter gleichmäßiger Außendruckbelastung entspricht dem Fall a, mit $k=2$, linker Teil der Abbildung.

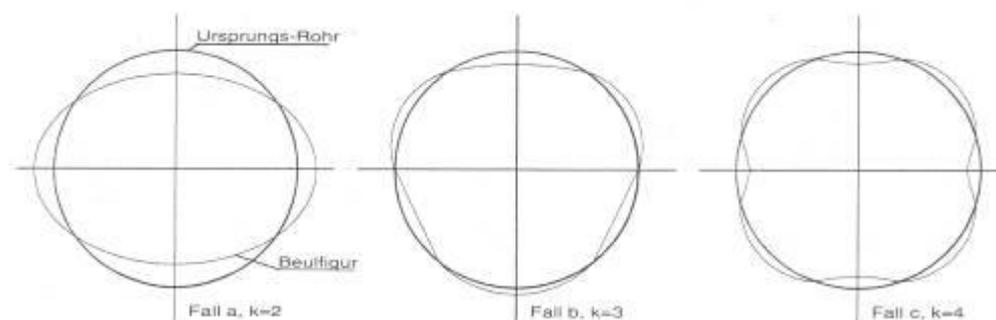


Abb. 39 Darstellung von zwei- drei- sowie vierwelligen Beulfiguren [65]

Zu Beginn der jeweiligen Untersuchungen werden auf die oben beschriebene Art jeweils zwei Stützvorrichtungen in den Probekörper eingesetzt. Die Vorrichtungen decken den Bereich der Rohrverbindung nicht ab, somit bleibt ein eventueller Durchtritt von Wasser durch die Rohrverbindung und damit ein Versagen der Dichtelemente der Rohre auch visuell durch Blick in das Rohrinne durch Photos dokumentierbar (Abb. 38).

Bei der Untersuchung der biegesteifen Rohre aus Keramik und duktilem Gusseisen konnte auf die Aussteifung verzichtet werden.

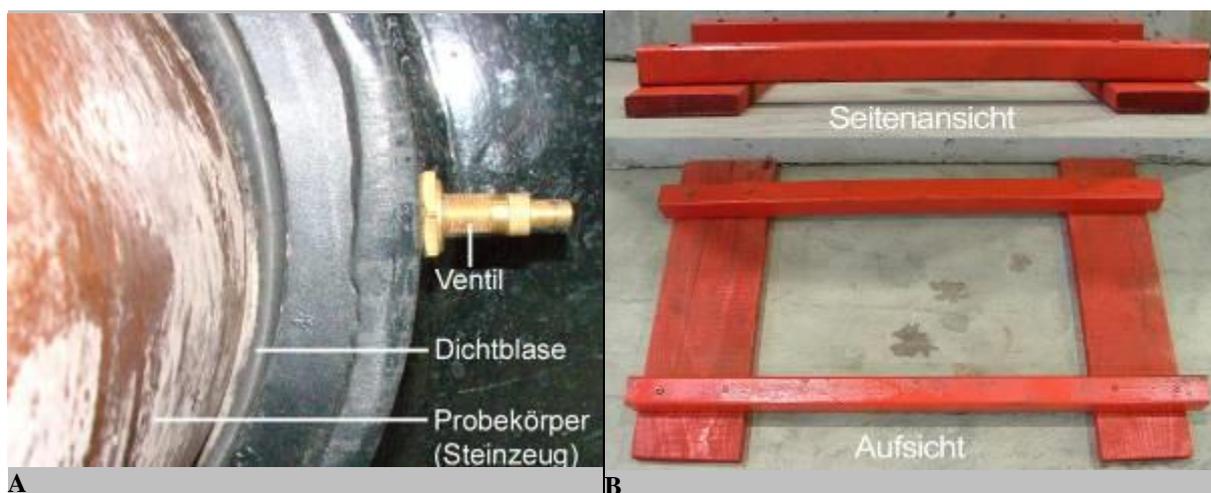


Abb. 40: Details der Vorrichtung zur Wasseraußendruckuntersuchung. **A** Der Abschluss des Prüfraumes erfolgt durch zwei Absperrblasen, welche die Außenoberfläche der Untersuchungsobjekte absperren. **B** Innerhalb der Vorrichtung befindet sich ein Auflager, mit dessen Hilfe die zu untersuchenden Rohrverbindungen horizontal ausgerichtet werden.

Der Prüfdruck innerhalb des Prüfraumes und damit der Druck beim Versagen wurden mit einem Drucksensors erfasst und die Messwerte gespeichert.

Von jeder Rohrverbindung wurden nacheinander 3 Untersuchungsobjekte in den Prüfraum eingebaut, so dass pro Rohrverbindungstyp drei Überdruck-Prüfungen durchgeführt wurden. Bei der Prüfung wurde sichtbarer Wassereintritt im Rohrquerschnitt als Kriterium für das Versagen der Rohrverbindung und den Abbruch der Prüfung angewendet.

Das Einstellen des Überdruckes im Prüfraum erfolgte durch kontrollierte Erhöhung des Wasserüberdrucks über das öffentliche Wasserversorgungsnetz. Der Zustand der Rohrverbindung bzw. ihr Verhalten wurde nach jeder Änderung des Prüfdruckes mit einem Foto dokumentiert (vgl. Abb.41 bis Abb.84).

4.2.2 Prüfkriterien

Das verwendete Messwerterfassungssystem liefert kontinuierliche Messwerte für den Druck in der Prüfvorrichtung. Zu Beginn der Untersuchung wurde ein Druck von 0,5 bar aufgebracht. Nach einer Dauer von 3 Minuten wurde der Druck um 0,5 bar erhöht und für weitere 3 Minuten nicht verändert. Die stufenweise Erhöhung des Druckes gefolgt von einer Warte- bzw. Beruhigungszeit wurde bis zum Versagen (Wassereintritt) bzw. bis zum Erreichen des maximalen Drucks des Leitungsnetzes fortgesetzt. Die Druckstufen wurden mit Blick auf die Ergebnisse der Anpressdruckuntersuchungen entweder in 0,5 bar- oder in 1,0 bar-Stufen gesteigert. Die jeweiligen Drücke beim Versagen der Rohrverbindung wurden mit Hilfe eines elektronischen Drucksensors anhand des feststellbaren Druckabfalls ermittelt. Ein Versagen der Rohrverbindung wurde somit durch Inaugenscheinnahme sowie durch den ersten plötzlichen Abfall der Druckmesswerte erkennbar (vgl. Abb. 43). Die in den Bildern grafisch dargestellten Drücke sind jeweils die angestrebten Druckstufen. Bei Versagen der Rohrverbindung ist der hierfür maßgebliche Druck in der Bildunterschrift angegeben.

4.2.3 Rohre aus Keramik-/Steinzeugrohre

a) Cerafix DN 150 Steckmuffe L, Deutsche Steinzeug GmbH



Abb.41: Rohrverbindung Steinzeug Cerafix DN 150, bei einem Außenüberdruck von 1,0 bar. Kein Wassereintritt.



Abb.42: Rohrverbindung Steinzeug Cerafix DN 150. Angestrebte Druckstufe 1,5 bar. Hier Wassereintritt bei einem Außenüberdruck von ca. 1,4 bar. (vgl. **Tabelle 6**).

Tabelle 6: Rohrverbindungen vom Typ Steinzeug Cerafix DN150: Außenwasserdrücke beim Versagen der Elastomerdichtung.

	Rohrverbindung 1	Rohrverbindung 2	Rohrverbindung 3	Mittelwert
Steinzeug Cerafix Steckmuffe L DN 150	1,42 bar	0,80 bar	0,96 bar	1,06 bar

Bei den Rohrverbindungen vom Typ Steinzeug Cerafix DN 150 wurde bei einem Außenüberdruck von 1,06 bar (gemittelter Wert) Wassereintritt und damit ein Versagen des Dichtelementes festgestellt.

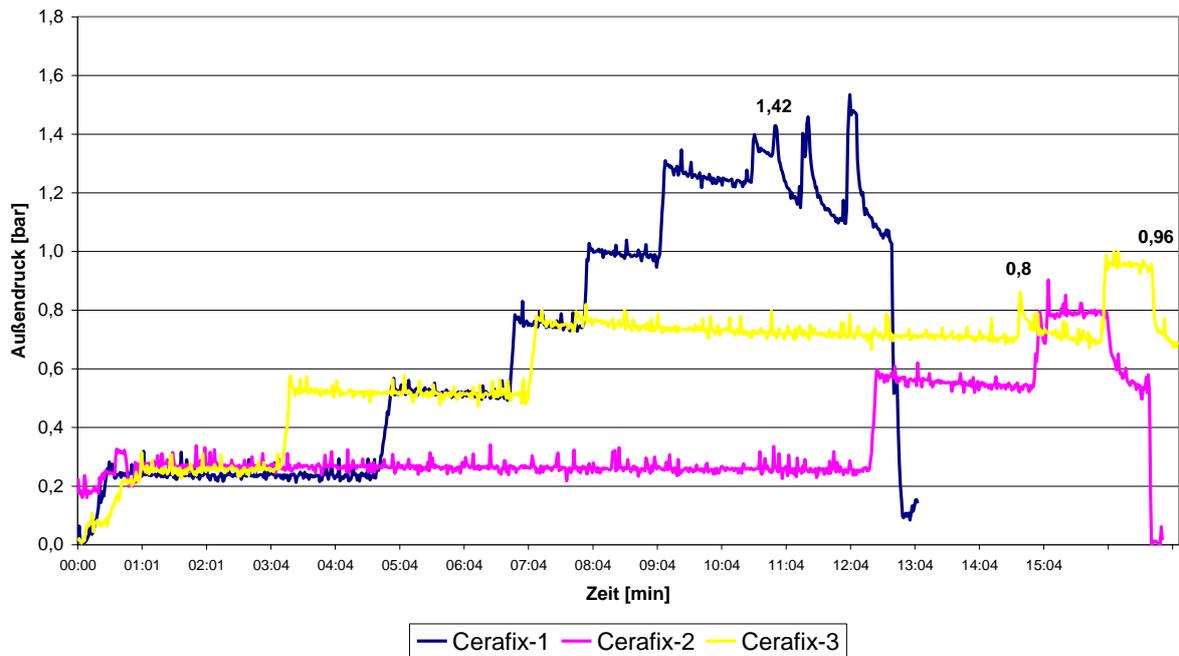


Abb. 43: Ergebnisse der Außendruckuntersuchungen an Rohrverbindungen vom Typ Steinzeug Cerafix DN150. Im Diagramm sind die Messwerte dreier Messungen aufgetragen. Die eingetragenen Werte geben den jeweiligen Versagensdruck für die entsprechenden Rohrverbindungen wieder.

b) Eurotrade, Steckmuffe L, Euroceramic GmbH



Abb.44: Rohrverbindung Euroceramic Eurotrade DN 150, bei einem Außenüberdruck von 1,0 bar. Kein Wassereintritt.

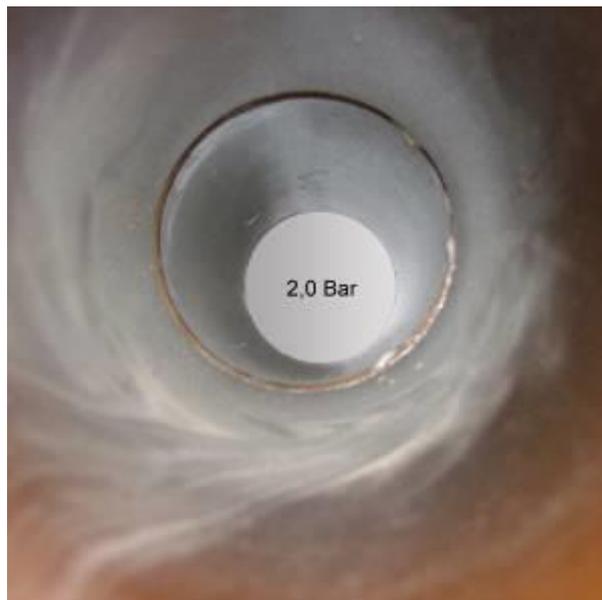


Abb.45: Rohrverbindung Euroceramic Eurotrade DN 150, bei einem Außenüberdruck von 2,0 bar. Kein Wassereintritt.



Abb.46: Rohrverbindung Euroceramic Eurotrade DN 150. Angestrebte Druckstufe 3 bar. Hier Wassereintritt bei einem Außenüberdruck von ca. 2,2 bar.

Tabelle 7: Rohrverbindungen vom Typ Euroceramic Eurotrade DN 150: Außenwasserdrücke beim Versagen der Elastomerdichtung.

	Rohrverbindung 1	Rohrverbindung 2	Rohrverbindung 3	Mittelwert
Euroceramic, Eurotrade DN 150	2,22 bar	2,06 bar	2,23 bar	2,17 bar

Bei den Rohrverbindungen vom Typ Euroceramic Eurotrade wurde bei einem Außenüberdruck von 2,17 bar (gemittelter Wert) Wassereintritt und damit ein Versagen des Dichtelementes festgestellt.

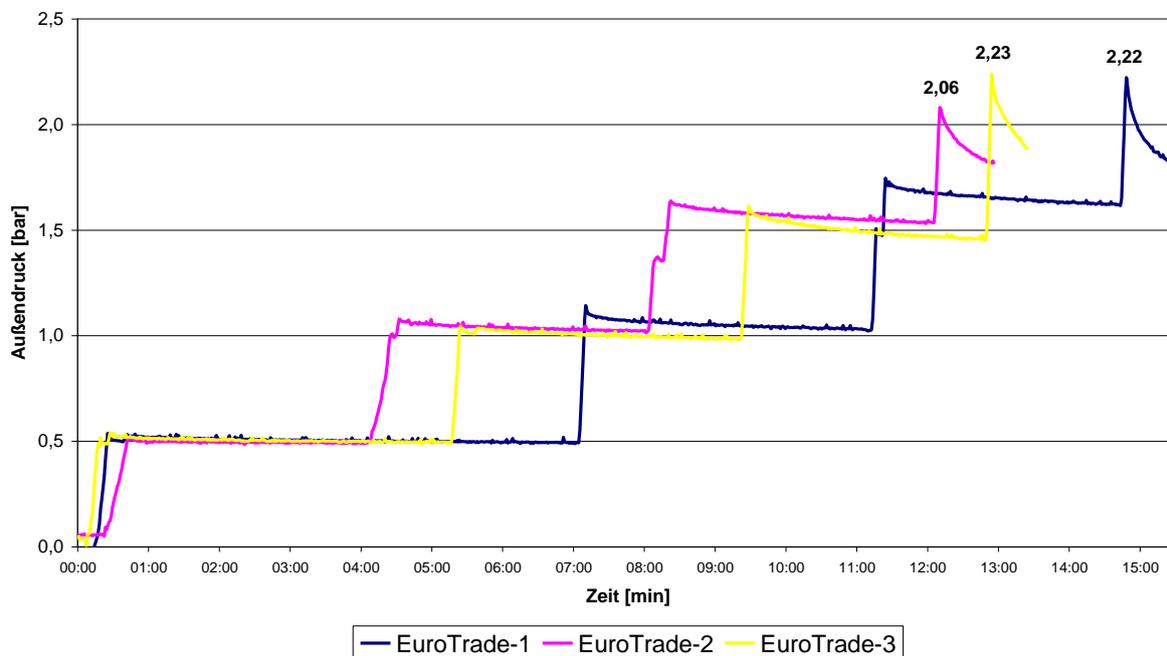


Abb. 47: Ergebnisse der Außenüberdruckuntersuchungen an Rohrverbindungen vom Typ Euroceramic Eurotrade DN 150. Im Diagramm sind die Messwerte dreier Messungen aufgetragen. Die Höchstwerte geben den Versagensdruck bei den einzelnen Rohrverbindungen wieder.

c) Eurotop, Überschiebkupplung, Euroceramic GmbH



Abb.48:Rohrverbindung Euroceramic Eurotop DN 150, bei einem Außenüberdruck von 1,0 bar. Kein Wassereintritt.

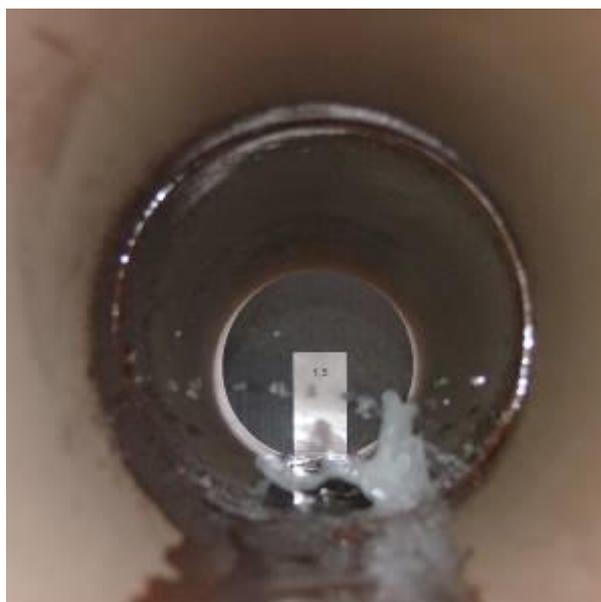


Abb.49:Rohrverbindung Euroceramic Eurotop DN 150. Angestrebte Druckstufe 1,5 bar. Hier Wassereintritt bei einem Außenüberdruck von ca. 1,2 bar. Versagen des Dichtelementes.

Tabelle 8: Rohrverbindungen vom Typ Euroceramic Eurotop: Außenwasserdrücke beim Versagen der Elastomerdichtung.

	Rohrverbindung 1	Rohrverbindung 2	Rohrverbindung 3	Mittelwert
Euroceramic, Eurotop DN 150	1,18 bar	1,15 bar	1,17 bar	1,17 bar

Bei den Rohrverbindungen vom Typ Euroceramic Eurotop wurde bei einem Außenüberdruck von 1,17 bar (gemittelter Wert) Wassereintritt und damit ein Versagen des Dichtelementes festgestellt.

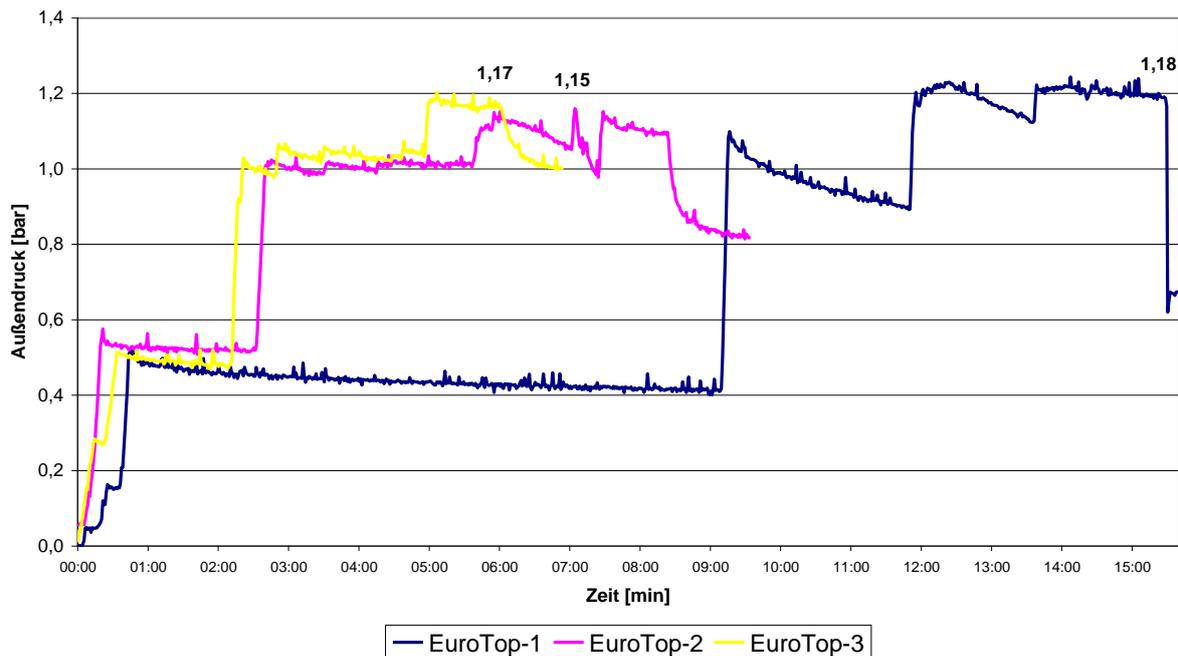


Abb. 50: Ergebnisse der Außenüberdruckuntersuchungen an Rohrverbindungen vom Typ Euroceramic Eurotop DN150. Im Diagramm sind die Messwerte dreier Messungen aufgetragen. Die Höchstwerte geben den Versagensdruck bei den einzelnen Rohrverbindungen wieder.

4.2.4 Rohre aus PVC-U

a) PVC-KG, Ostendorf GmbH & Co. KG



Abb.51: Rohrverbindung Ostendorf PVC-KG, bei einem Außenüberdruck von 1,0 bar. Kein Wassereintritt.

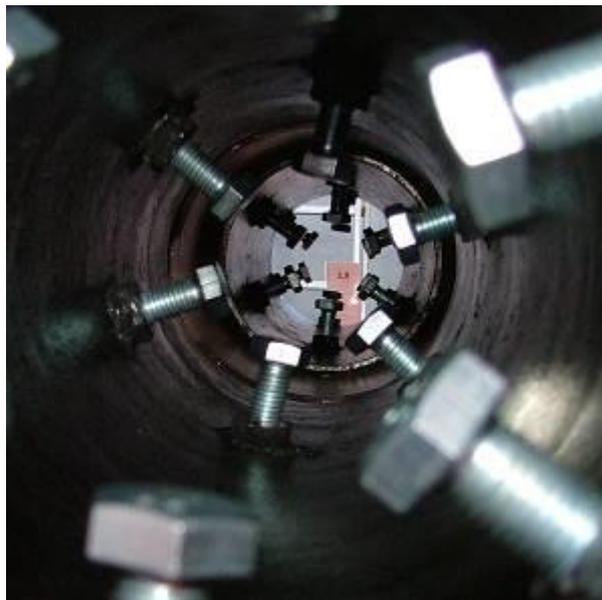


Abb.52: Rohrverbindung Ostendorf PVC-KG, bei einem Außenüberdruck von 2,0 bar. Kein Wassereintritt.

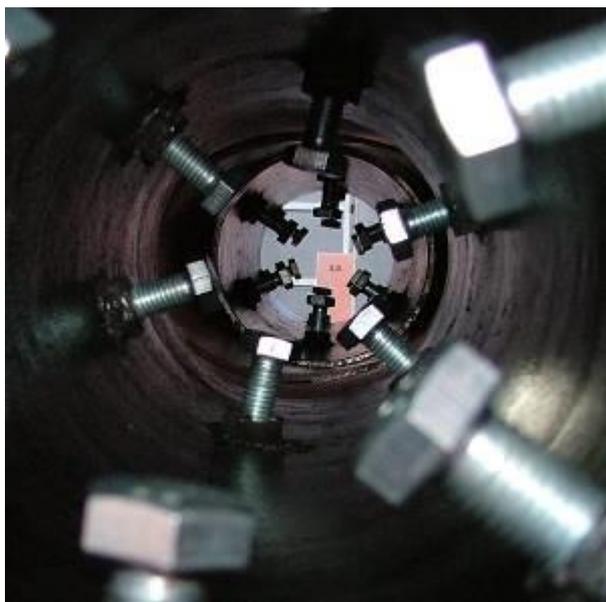


Abb.53: Rohrverbindung Ostendorf PVC-KG, bei einem Außenüberdruck von 3,0 bar. Kein Wassereintritt.



Abb.54: Rohrverbindung Ostendorf PVC-KG. Angestrebte Druckstufe 4 bar. Hier Wassereintritt bei einem Außenüberdruck von ca. 3,7 bar. Verformung des Spitzendes.

Tabelle 9: Rohrverbindungen vom Typ Ostendorf PVC-KG: Außenwasserdrücke beim strukturellen Versagen des Spitzendes.

	Rohrverbindung 1	Rohrverbindung 2	Rohrverbindung 3	Mittelwert
Ostendorf, PVC-KG DN 160	3,74 bar	3,42 bar	3,88 bar	3,68 bar

Bei den Rohrverbindungen vom Typ Ostendorf PVC-KG wurde bei einem Außenüberdruck von 3,68 bar (gemittelter Wert) Wassereintritt festgestellt. Der Wassereintritt trat infolge eines strukturellen Versagens des Spitzendes auf (vgl. Abb.54).

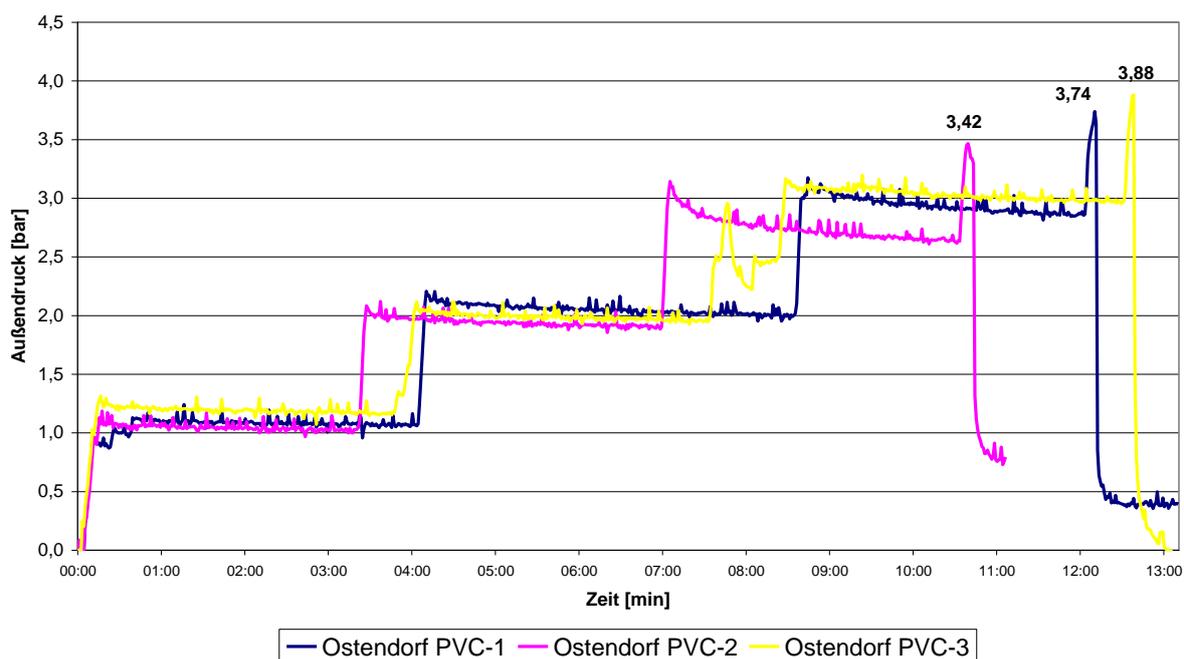


Abb. 55: Ergebnisse der Außenwasserdruckuntersuchungen an Rohrverbindungen vom Typ Ostendorf PVC-KG. Im Diagramm sind die Messwerte dreier Messungen aufgetragen. Die Druckmesswerte geben den Versagensdruck bei den einzelnen Rohrverbindungen wieder.

b) Awadukt SN4 PVC Rehau AG + Co

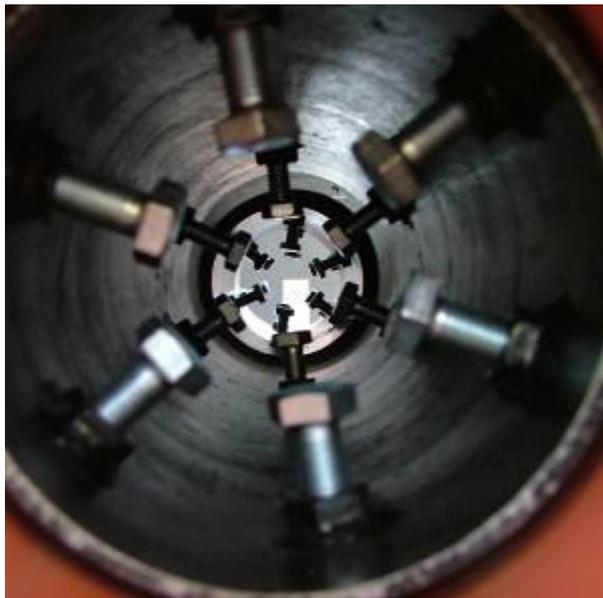


Abb.56: Rohrverbindung Awadukt SN4 PVC, bei einem Außenüberdruck von 1,0 bar. Kein Wassereintritt.

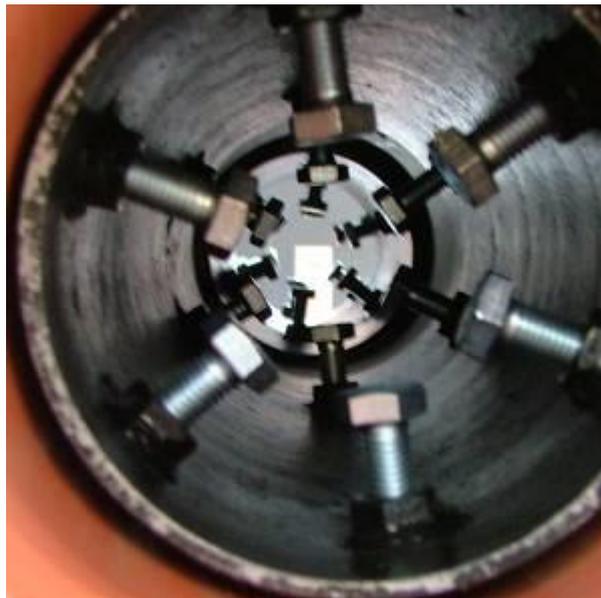


Abb.57: Rohrverbindung Awadukt SN4 PVC, bei einem Außenüberdruck von 2,0 bar. Kein Wassereintritt.

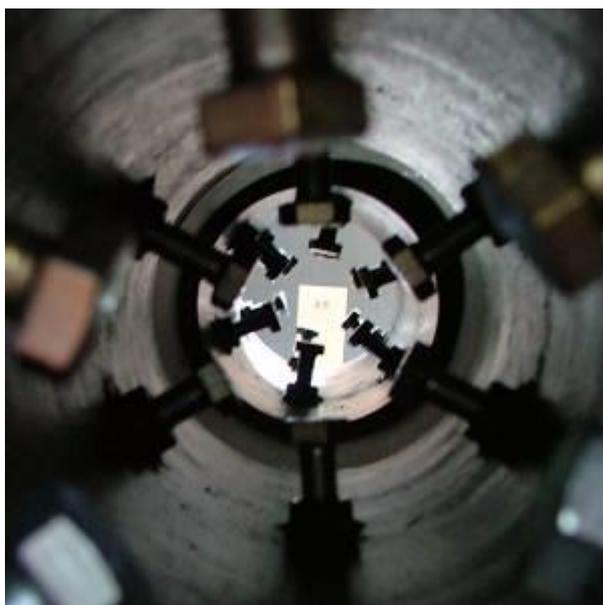


Abb.58: Rohrverbindung Awadukt SN4 PVC, bei einem Außenüberdruck von 3,0 bar. Kein Wassereintritt.

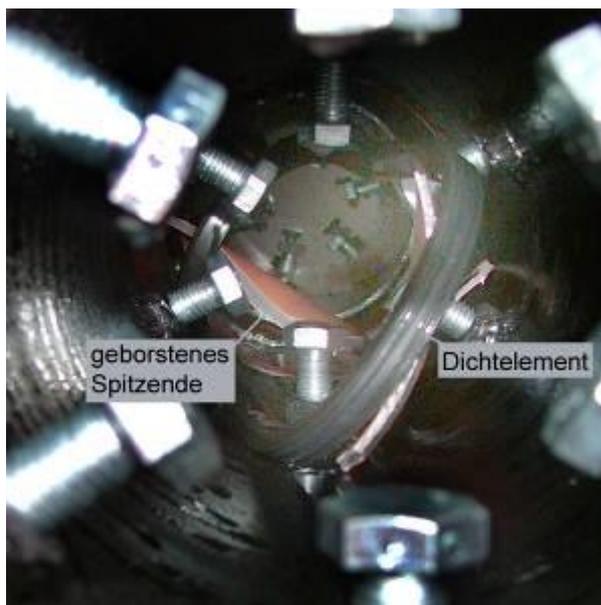


Abb.59: Rohrverbindung Awadukt SN4 PVC, nach einem maximalen Außenüberdruck von 4,03 bar. Wassereintritt durch Einbrechen des Spitzendes. Elastomerdichtung ist im Rohr erkennbar.

Tabelle 10: Rohrverbindungen vom Typ Rehau Awadukt SN4 PVC: Außenwasserdrücke beim strukturellen Versagen des Spitzendes.

	Rohrverbindung 1	Rohrverbindung 2	Rohrverbindung 3	Mittelwert
Rehau, PVC-SN4 DN/OD 160	4,03 bar	3,79 bar	3,63 bar	3,73 bar

Bei den Rohrverbindungen vom Typ Rehau Awadukt SN4 PVC wurde bei einem Außenüberdruck von 3,73 bar (gemittelter Wert) Wassereintritt festgestellt. Der Wassereintritt erfolgte aufgrund einer strukturellen Versagens des Spitzendes (vgl. Abb.59).

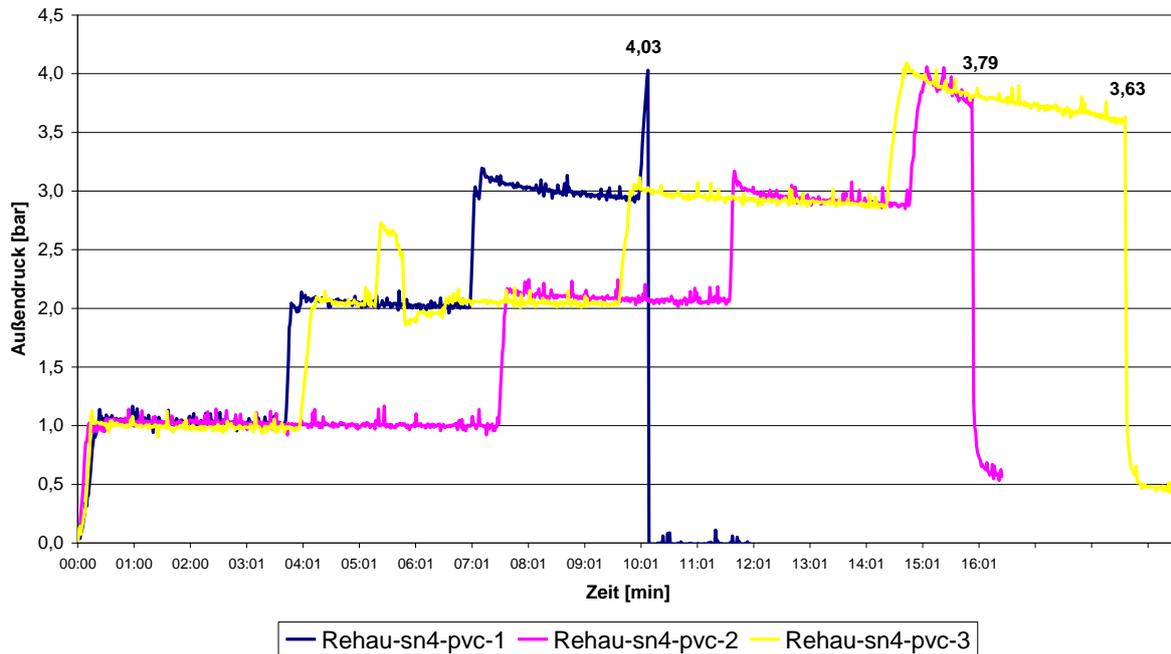


Abb. 60: Ergebnisse der Außenüberdruckuntersuchungen an Rohrverbindungen vom Typ Rehau PVC-SN4. Im Diagramm sind die Messwerte dreier Messungen aufgetragen. Die Höchstwerte geben den Versagensdruck bei den einzelnen Rohrverbindungen wieder.

c) Wavin KG PVC, Wavin GmbH

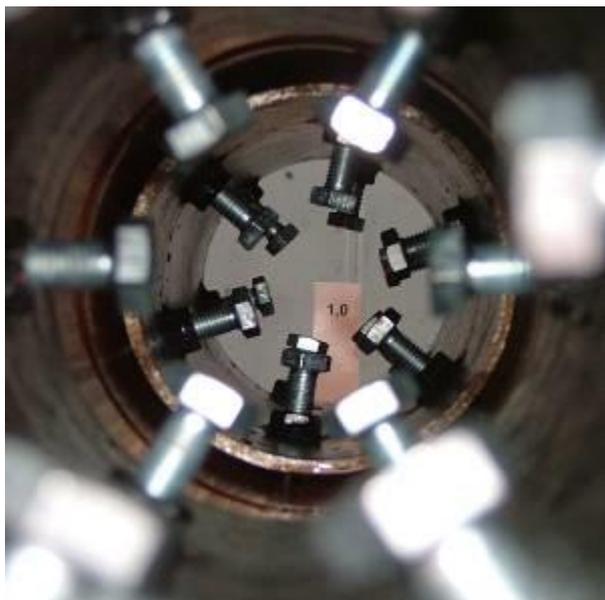


Abb.61: Rohrverbindung Wavin KG PVC bei einem Außenüberdruck von 1,0 bar. Kein Wassereintritt.

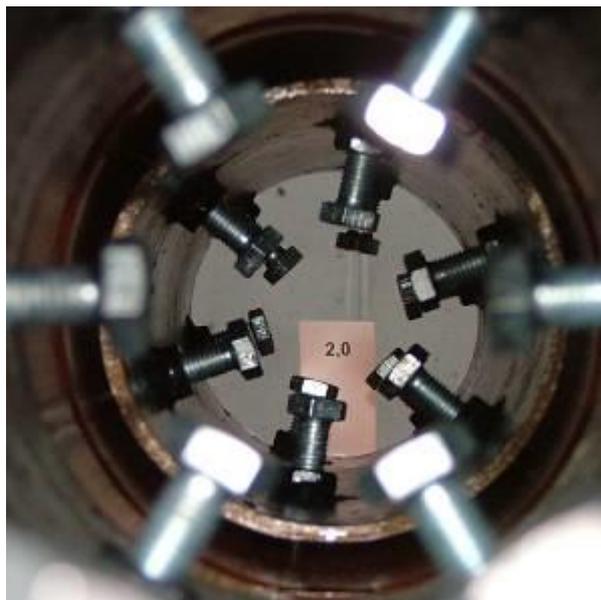


Abb.62: Rohrverbindung Wavin KG PVC bei einem Außenüberdruck von 2,0 bar. Kein Wassereintritt.

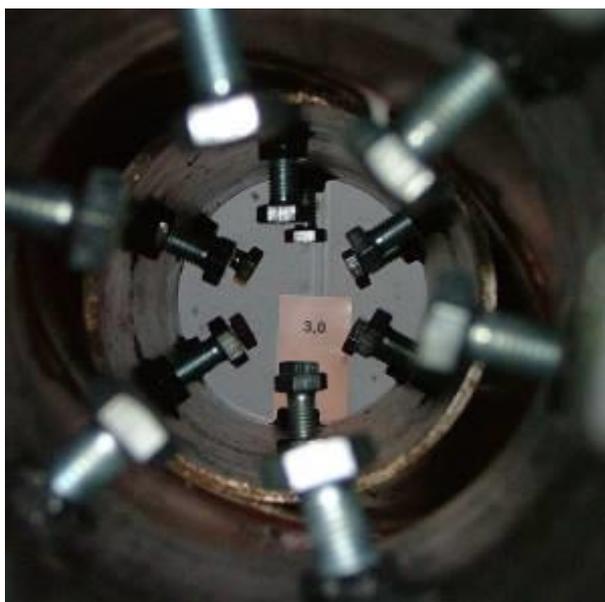


Abb.63: Rohrverbindung Wavin KG PVC bei einem Außenüberdruck von 3,0 bar. Kein Wassereintritt.



Abb.64: Rohrverbindung Wavin KG PVC nach einem Außenüberdruck von 3,89 bar. Wassereintritt durch Verformung des Spitzendes.

Tabelle 11: Rohrverbindungen vom Typ Wavin KG PVC: Außenwasserdrücke beim strukturellen Versagen des Spitzendes.

	Rohrverbindung 1	Rohrverbindung 2	Rohrverbindung 3	Mittelwert
Wavin PVC KG DN 150	2,14 bar	3,51 bar	3,89 bar	3,18 bar

Bei den Rohrverbindungen vom Typ Wavin KG PVC wurde bei einem Außenüberdruck von 3,18 bar (gemittelter Wert) Wassereintritt festgestellt. Der Wassereintritt erfolgte aufgrund eines strukturellen Versagens des Spitzendes.

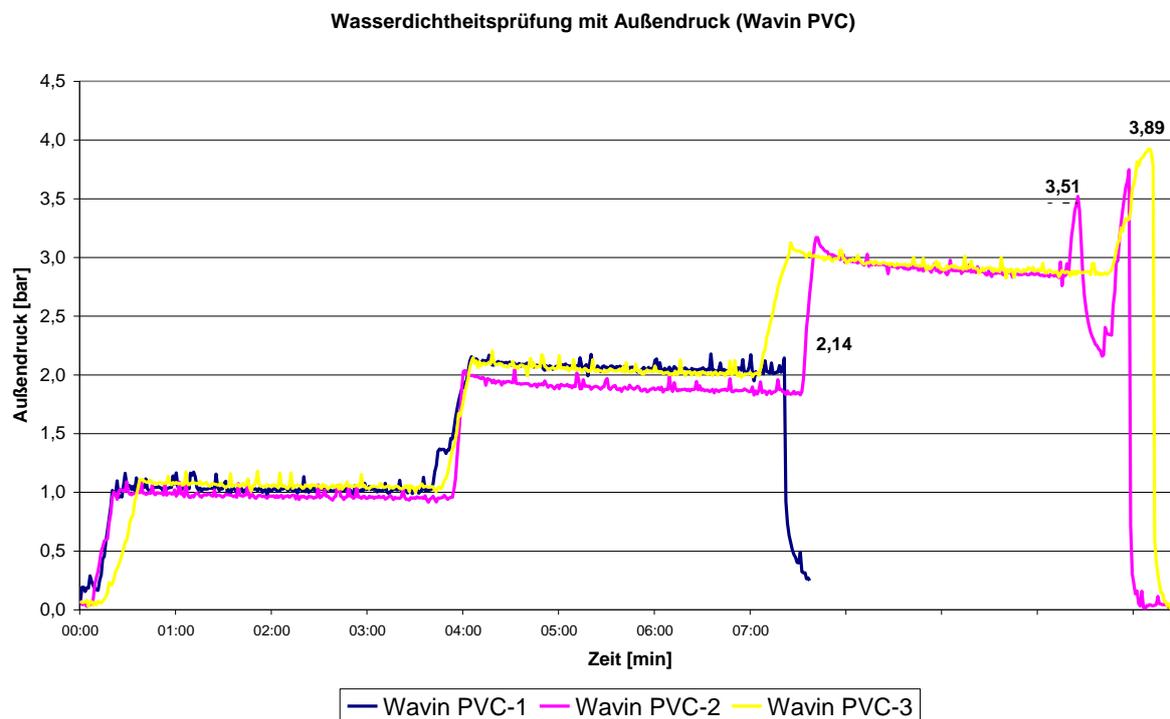


Abb. 65: Ergebnisse der Außendruckuntersuchungen an Rohrverbindungen vom Typ Wavin PVC-KG. Im Diagramm sind die Messwerte dreier Messungen aufgetragen. Die Höchstwerte geben den Versagensdruck bei den einzelnen Rohrverbindungen wieder.

c) *Awadukt PVC SN8, Rehau AG + Co*



Abb.66: Rohrverbindung Awadukt PVC SN8, bei einem Außenüberdruck von 1,0 bar. Kein Wassereintritt.



Abb.67: Rohrverbindung Awadukt PVC SN8, bei einem Außenüberdruck von 2,0 bar. Kein Wassereintritt.

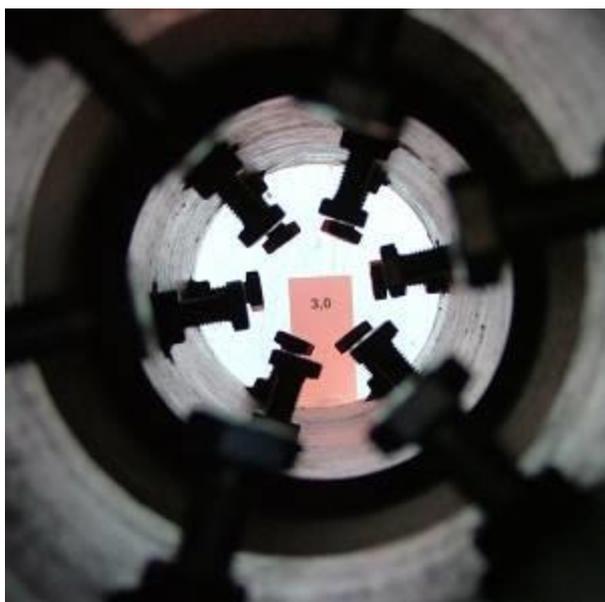


Abb.68: Rohrverbindung Awadukt PVC SN8, bei einem Außenüberdruck von 3,0 bar. Kein Wassereintritt.

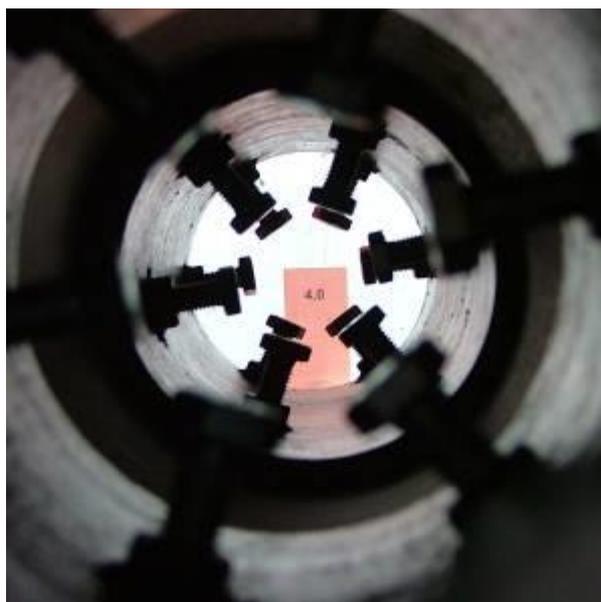


Abb.69: Rohrverbindung Awadukt PVC SN8, bei einem Außenüberdruck von 4,0 bar. Kein Wassereintritt.

Tabelle 12: Rohrverbindungen vom Typ Awadukt PVC SN8. Kein Versagen. Die Höchstwerte geben den Höchstdruck des Wasserversorgungsnetzes wieder.

	Rohrverbindung 1	Rohrverbindung 2	Rohrverbindung 3	Mittelwert
Rehau, PVC-SN4 DN/OD 160	4,42 bar	4,28 bar	4,03 bar	4,24 bar

Bei den Rohrverbindungen vom Typ Rehau Awadukt PVC SN8 wurde bei einem Außenüberdruck von 4,24 bar (gemittelter Wert) kein Wassereintritt bzw. Versagen Dichtelementes festgestellt.

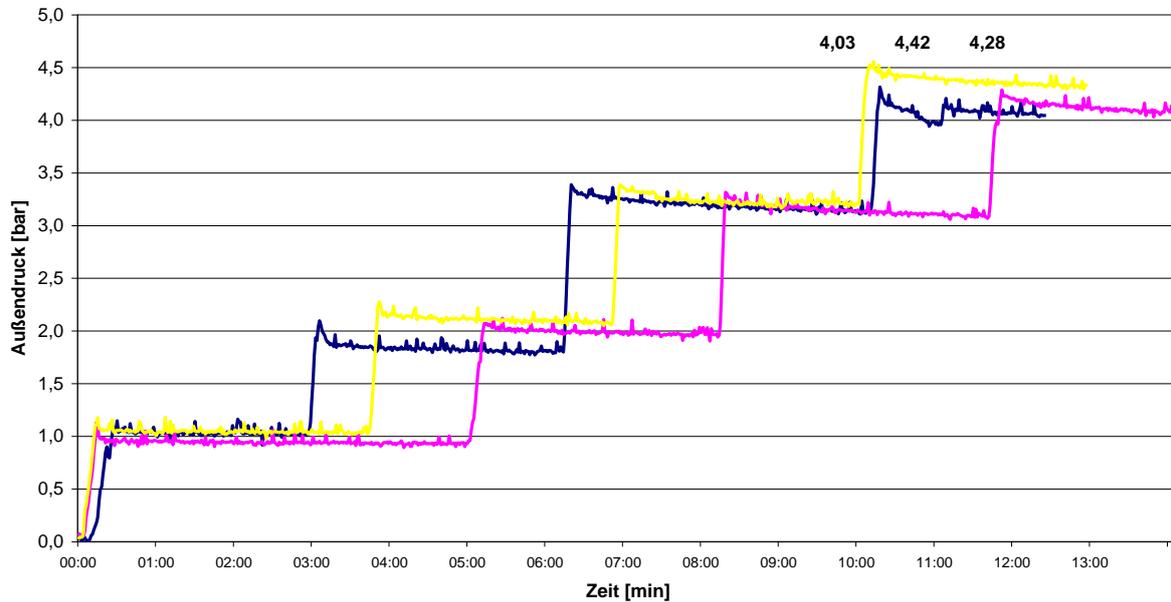


Abb. 70: Ergebnisse der Außendruckuntersuchungen an Rohrverbindungen vom Typ Awadukt PVC SN8. Im Diagramm sind die Messwerte dreier Messungen aufgetragen. Die Höchstwerte geben den Höchstdruck des Wasserversorgungsnetzes wieder.

4.2.5 Rohre aus PP (Polypropylen)

a) Ostendorf KG-2000 PP

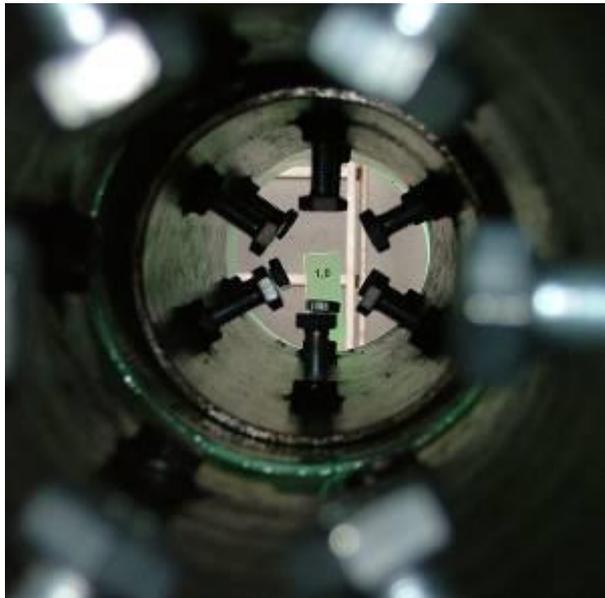


Abb.71: Rohrverbindung Ostendorf KG-2000 PP, bei einem Außenüberdruck von 1,0 bar. Kein Wassereintritt.

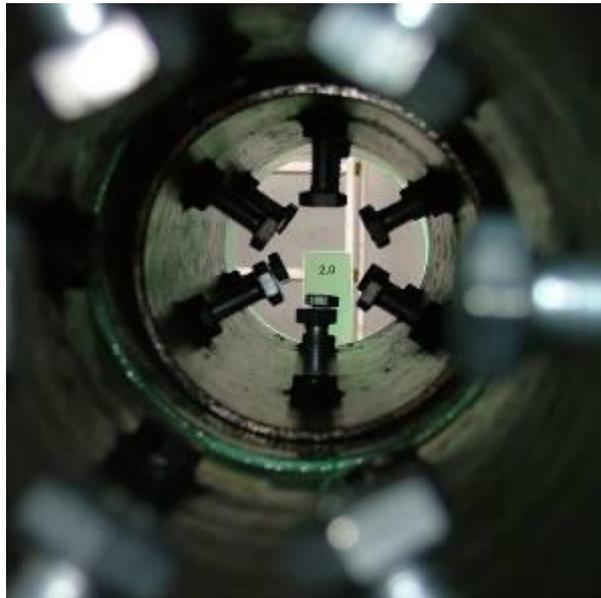


Abb.72: Rohrverbindung Ostendorf KG-2000 PP, bei einem Außenüberdruck von 2,0 bar. Kein Wassereintritt.

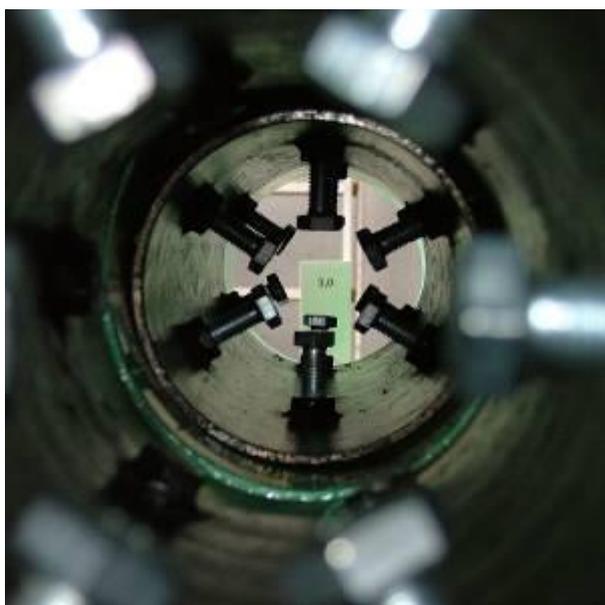


Abb.73: Rohrverbindung Ostendorf KG-2000 PP, bei einem Außenüberdruck von 3,0 bar. Kein Wassereintritt.

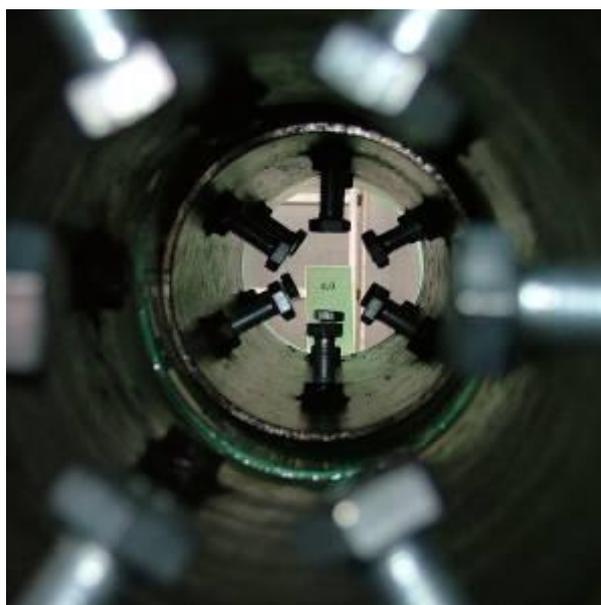


Abb.74: Rohrverbindung Ostendorf KG-2000 PP, bei einem Außenüberdruck von 4,0 bar. Kein Wassereintritt.

Tabelle 13: Rohrverbindungen vom Typ Ostendorf KG-2000 PP. Kein Versagen. Die Höchstwerte geben den Höchstdruck des Wasserversorgungsnetzes wieder.

	Rohrverbindung 1	Rohrverbindung 2	Rohrverbindung 3	Mittelwert
Ostendorf KG-2000 DN 150	4,69 bar	4,54 bar	4,81 bar	4,68 bar

Bei den Rohrverbindungen vom Typ Ostendorf KG-2000 PP wurde bei einem maximal aufbringbaren Außenüberdruck von 4,68 bar (gemittelter Wert) kein Wassereintritt bzw. Versagen des Dichtelementes festgestellt.

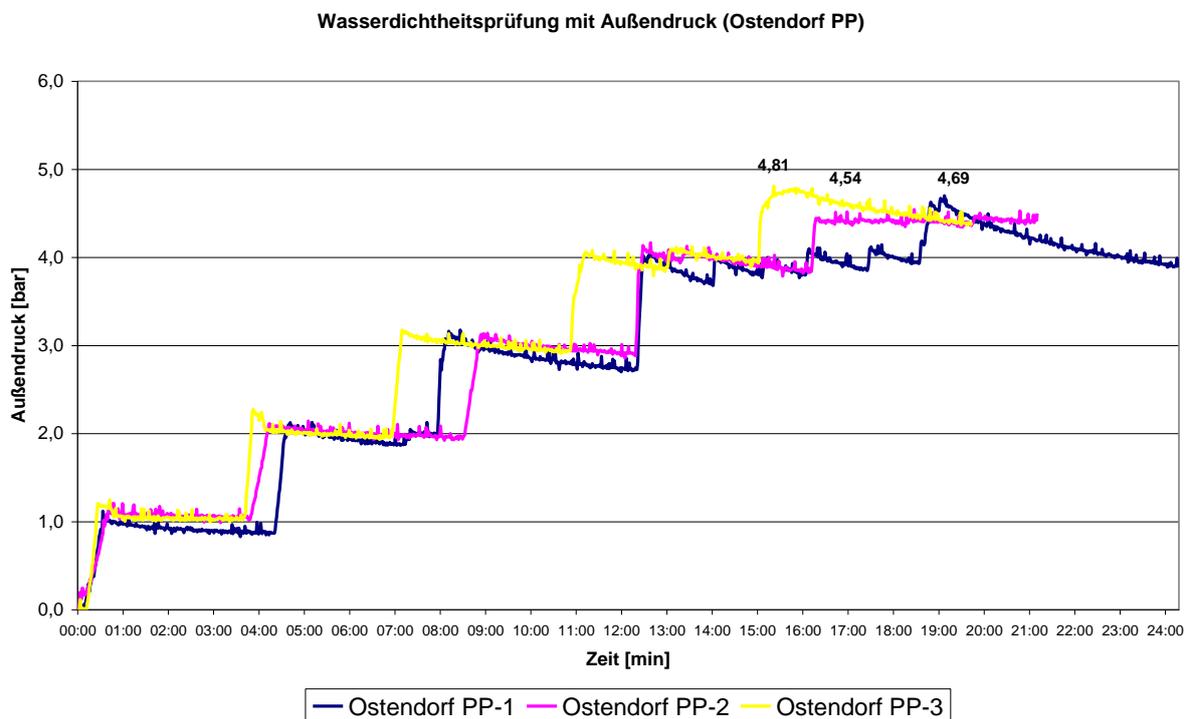


Abb. 75: Ergebnisse der Außendruckuntersuchungen an Rohrverbindungen vom Typ Ostendorf KG-2000 PP. Im Diagramm sind die Messwerte dreier Messungen aufgetragen. Die Höchstwerte geben den Höchstdruck des Wasserversorgungsnetzes wieder.

b) Rehau Awadukt PP SN 4 GmbH & Co. KG

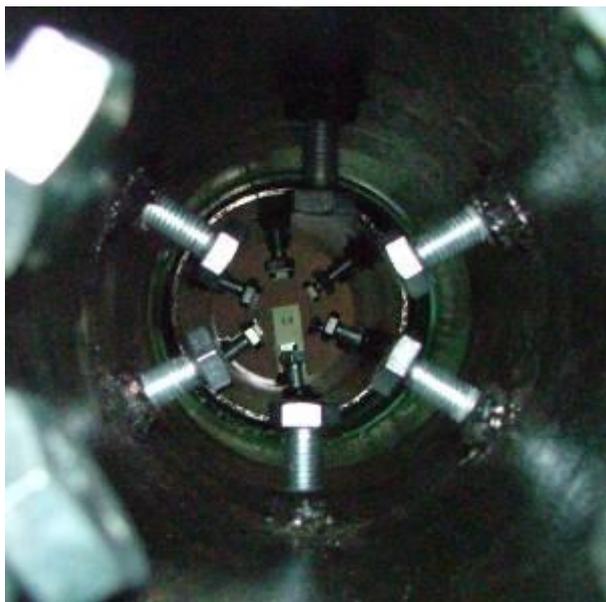


Abb.76: Rohrverbindung Rehau Awadukt SN PP 4 bei einem Außenüberdruck von 1,0 bar. Kein Wassereintritt.

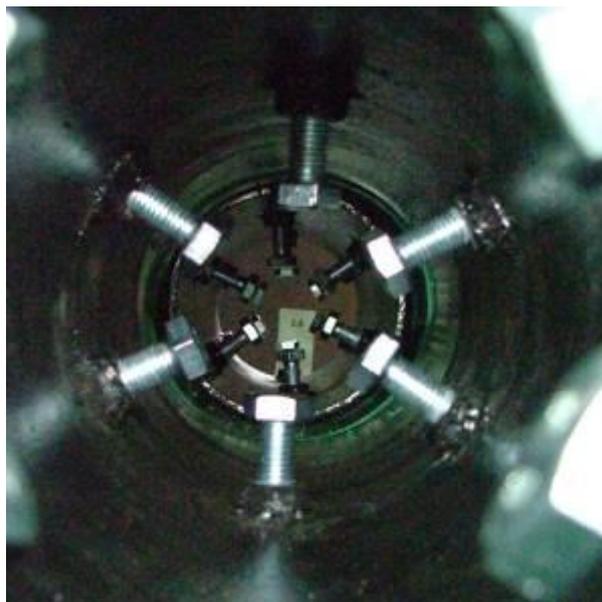


Abb.77: Rohrverbindung Rehau Awadukt PP SN 4 bei einem Außenüberdruck von 2,0 bar. Kein Wassereintritt.

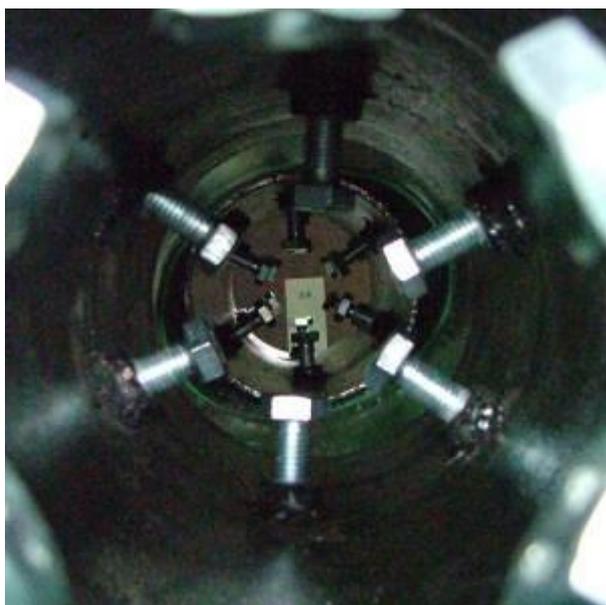


Abb.78: Rohrverbindung Rehau Awadukt PP SN 4 bei einem Außenüberdruck von 3,0 bar. Kein Wassereintritt.

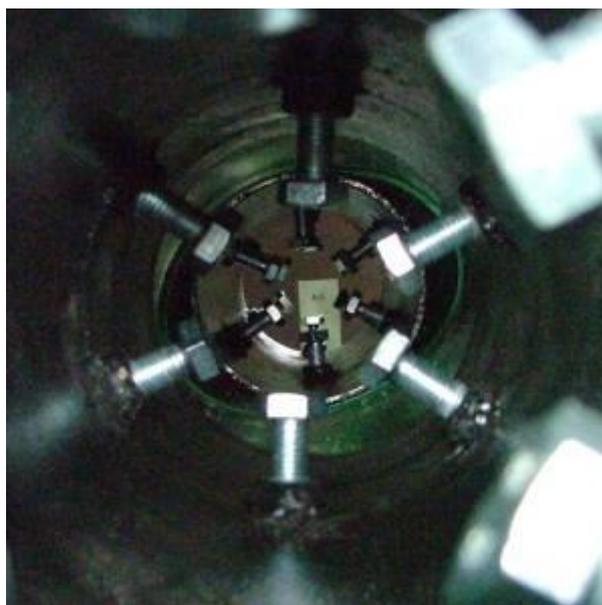


Abb.79: Rohrverbindung Rehau Awadukt PP SN 4 bei einem Außenüberdruck von 4,0 bar. Kein Wassereintritt trotz Beulen.

Tabelle 14: Rohrverbindungen vom Typ Rehau Awadukt PP SN 4. Kein Versagen. Die Höchstwerte geben den Höchstdruck des Wasserversorgungsnetzes wieder.

	Rohrverbindung 1	Rohrverbindung 2	Rohrverbindung 3	Mittelwert
Rehau SN4 PP DN/OD 160	4,40 bar	4,27 bar	4,26 bar	4,31 bar

Bei den Rohrverbindungen vom Typ Rehau Awadukt PP SN 4 wurde bei einem maximal aufbringbaren Außenüberdruck von 4,31 bar (gemittelter Wert) kein Wassereintritt bzw. Versagen des Dichtelementes festgestellt.

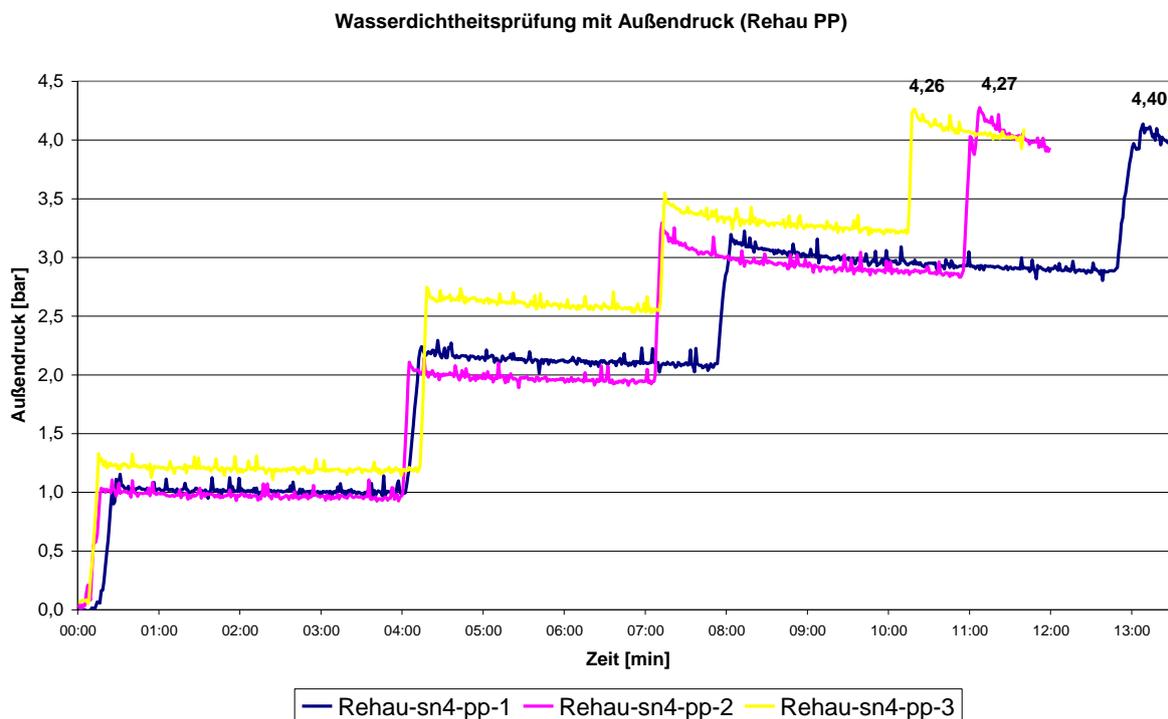


Abb. 80: Ergebnisse der Außendruckuntersuchungen an Rohrverbindungen vom Typ Rehau Awadukt SN 4 PP. Im Diagramm sind die Messwerte dreier Messungen aufgetragen. Die Höchstwerte geben den Höchstdruck des Wasserversorgungsnetzes wieder.

c) *Rehau Awadukt SN 10 Rausisto, Rehau AG + Co*



Abb.81: Rohrverbindung Rehau Awadukt SN 10 Rausisto, bei einem Außenüberdruck von 1,0 bar. Kein Wassereintritt.



Abb.82: Rohrverbindung Rehau Awadukt SN 10 Rausisto, bei einem Außenüberdruck von 2,0 bar. Kein Wassereintritt.

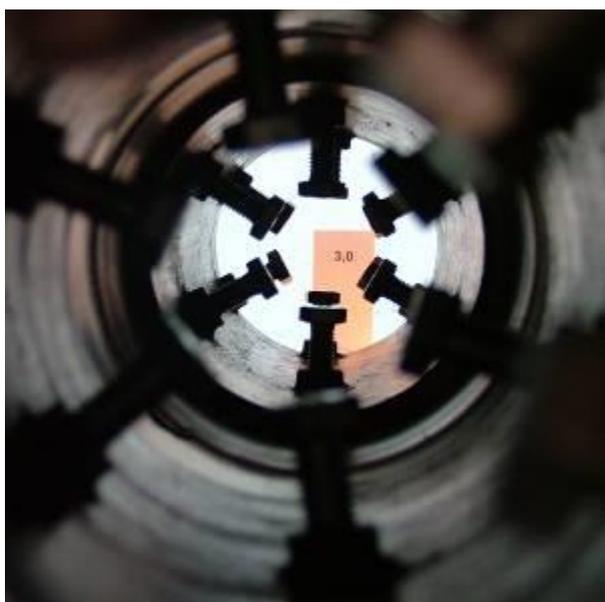


Abb.83: Rohrverbindung Rehau Awadukt SN 10 Rausisto, bei einem Außenüberdruck von 3,0 bar. Kein Wassereintritt.

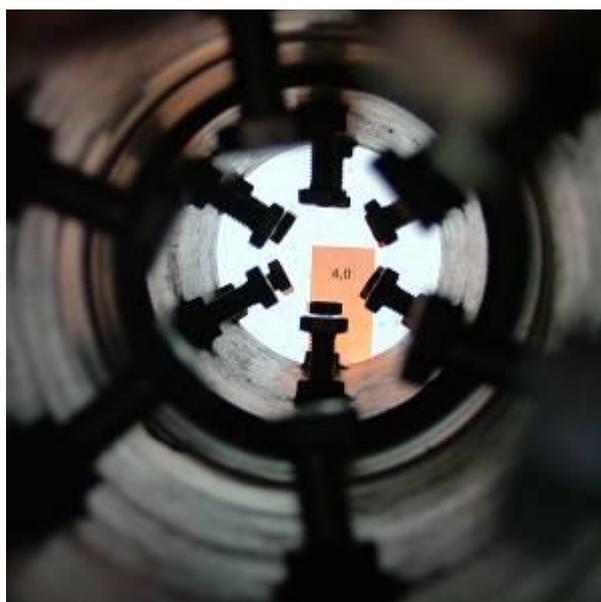


Abb.84: Rohrverbindung Rehau Awadukt SN 10 Rausisto, bei einem Außenüberdruck von 4,0 bar. Kein Wassereintritt.

Tabelle 15: Rohrverbindungen vom Typ Rehau Awadukt SN 10 Rausisto. Kein Versagen. Die Höchstwerte geben den Höchstdruck des Wasserversorgungsnetzes wieder.

	Rohrverbindung 1	Rohrverbindung 2	Rohrverbindung 3	Mittelwert
Rehau Awadukt SN 10 DN/OD 160	4,90 bar	4,86 bar	4,82 bar	4,86 bar

Bei den Rohrverbindungen vom Typ Rehau Awadukt SN 10 Rausisto wurde bei einem maximal aufbringbaren Außenüberdruck von 4,86 bar (gemittelter Wert) kein Wassereintritt bzw. Versagen des Dichtelementes festgestellt.

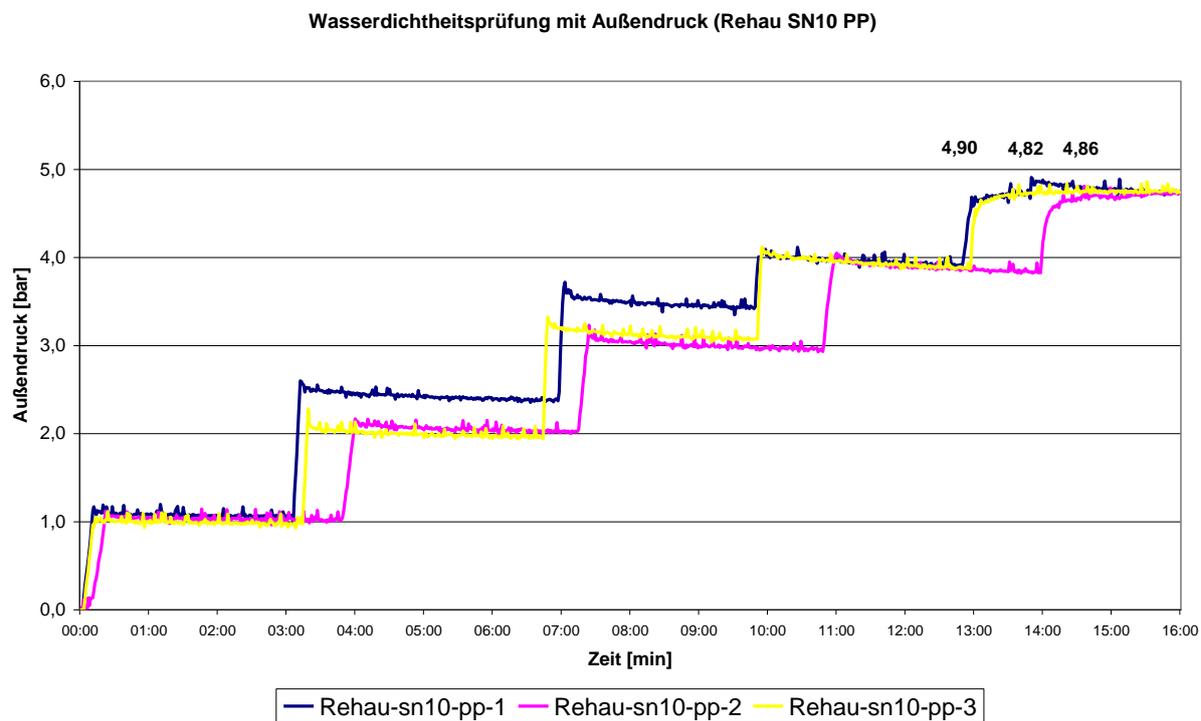


Abb. 85: Ergebnisse der Außendruckuntersuchungen an Rohrverbindungen vom Typ Rehau Awadukt SN 10 Rausisto. Im Diagramm sind die Messwerte dreier Messungen aufgetragen. Die Höchstwerte geben den Höchstdruck des Wasserversorgungsnetzes wieder.

4.2.6 Rohre aus Duktilem Gusseisen



Abb.86: Rohrverbindung der Saint Gobain Gussrohr GmbH, Typ Integral Muffenrohr bei einem Außenüberdruck von 1,0 bar. Kein Wassereintritt.



Abb.87: Rohrverbindung der Saint Gobain Gussrohr GmbH, Typ Integral Muffenrohr, bei einem Außenüberdruck von 2,0 bar. Kein Wassereintritt.



Abb.88: Rohrverbindung der Saint Gobain Gussrohr GmbH, Typ Integral Muffenrohr, bei einem Außenüberdruck von 3,0 bar. Kein Wassereintritt.



Abb.89: Rohrverbindung der Saint Gobain Gussrohr GmbH, Typ Integral Muffenrohr, bei einem Außenüberdruck von 4,0 bar. Kein Wassereintritt.

Tabelle 16: Rohrverbindungen vom Typ Integral Muffenrohr Standard, DN 150 der Saint-Gobain Gussrohr GmbH Die Höchstwerte geben den Höchstdruck des Wasserversorgungsnetzes wieder.

	Rohrverbindung 1	Rohrverbindung 2	Rohrverbindung 3	Mittelwert
Integral Muffenrohr Standard, DN 150	4,45 bar	4,27 bar	4,31 bar	4,34 bar

Bei den Rohrverbindungen der Saint Gobain Gussrohr GmbH, Typ Integral Muffenrohr, wurde bei einem maximal aufbringbaren Außenüberdruck von 4,34 bar (gemittelter Wert) kein Wassereintritt bzw. Versagen des Dichtelementes festgestellt.

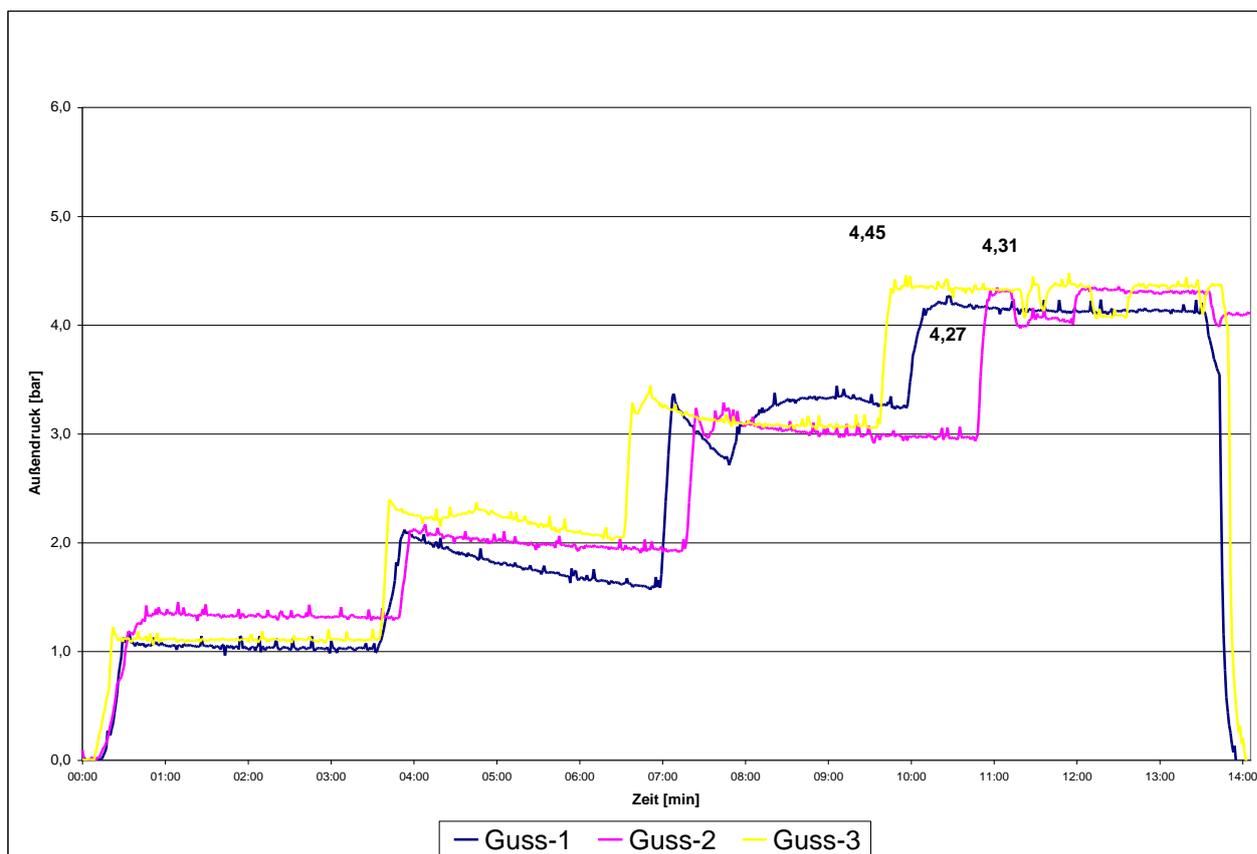


Abb. 90: Ergebnisse der Außendruckuntersuchungen an Rohrverbindungen vom Typ Integral Muffenrohr Standard, DN 150 der Saint-Gobain Gussrohr GmbH. Im Diagramm sind die Messwerte dreier Messungen aufgetragen. Die Höchstwerte geben den Höchstdruck des Wasserversorgungsnetzes wieder. Die sichtbaren Druckabfälle sind auf Undichtigkeiten im Versuchsstand zurückzuführen.

4.3 Kulturversuche an Rohrverbindungen

Wurzelwachstum verläuft in der Regel vergleichsweise langsam, im Substrat verborgen und auch nicht grundsätzlich in Richtung der zu untersuchenden Rohrverbindungen. Das zeigen insbesondere die durchgeführten Pflanzversuche im mittelformatigen Maßstab (vgl. Kapitel 3.3.4.1). Auch nach mehrjährigem Wachstum müssen die Wurzeln nicht zwangsläufig durch den Ringspalt in den Ringraum der Rohrverbindungen einwachsen. Mit Blick auf die Prüfung von Rohrverbindungen gegenüber Wurzelwachstum stellen die in Kapitel 3.3.4.2 und 3.3.4.3 beschriebenen Versuchsansätze mit Vertikalen und Horizontalen Versuchen aus Australien Möglichkeiten dar, innerhalb vergleichsweise kurzer Zeit (bis zu 32 Monate) Wurzelwachstum in den Ringräumen herbeizuführen.

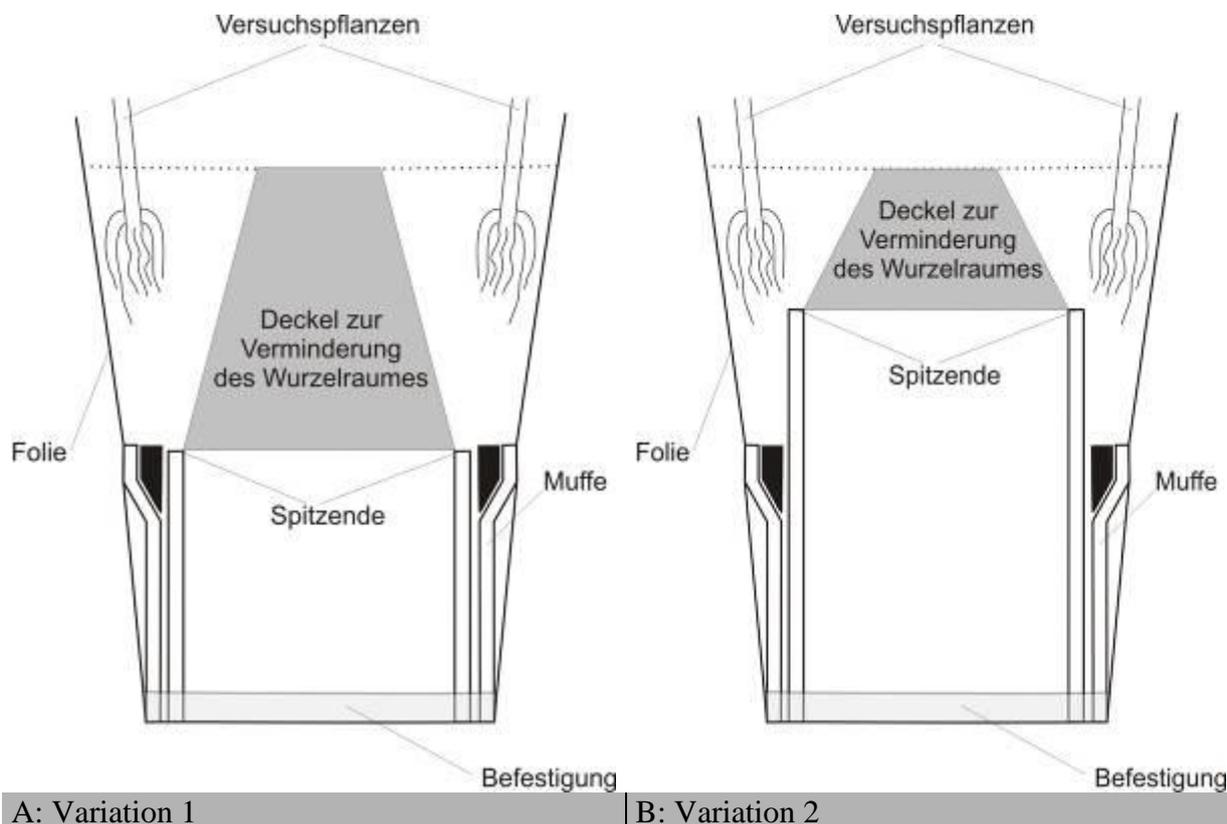
Die vom CSIRO und australischen Rohrherstellern favorisierten und nach 32 Monaten zu Ergebnissen führenden Versuchsansätze waren die sogenannten Horizontalen Versuche (vgl. [54]). Die zuerst durchgeführten Vertikalen Versuche wurden in Australien nicht weiter verfolgt. Als Grund wurde der negative Einfluss des sich im Ringspalt der Rohrverbindungen ansammelnden Wasser aus der Bewässerung auf das Wurzelwachstum der eingesetzten Versuchspflanzen genannt. Zur Begründung: Die Wurzeln der beiden Versuchspflanzenarten Rye-Gras (*Lolium rigidum*) und Teebaumpflanzen (*Melaleuca armillaris*) wachsen nicht in

wassergesättigten Böden oder Hohlräumen, sondern benötigen auch einen Anteil an Bodenluft für ihr Wachstum.

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus Australien sowie den eigenen Versuchen mit mittelformatigen Versuchsansätzen (vgl. Kapitel 3.3.4.1) wurden Kulturversuche konzipiert, die in möglichst kurzer Zeit zu Ergebnisse führen sollen. Der Versuchsaufbau entspricht grundsätzlich den Vertikalen Versuchen des CSIRO, da mit diesem Versuchsaufbau das Wurzelvolumen minimiert werden kann und der Ringraum vor der Rohrverbindung in kurzer Zeit von Wurzeln erschlossen werden kann. Um dem negativen Einfluss des wassergefüllten Ringraumes auszuschließen, wurden als Versuchspflanzen Weiden (*Salix spec.*) eingesetzt. Viele Weiden (z.B. *Salix viminalis*, *Salix fragilis*, *Salix alba*) ertragen Böden mit hoch stehendem Grundwasser und gehören zu den wichtigsten Gehölzen der Auwälder und Ufergebüsche (vgl. [66]). Der Versuchsaufbau der sogenannten Outside-In-Versuche ist in Abb. 91 dargestellt. Mit Blick auf die senkrechte Verlegung von Abwasserleitungen in Kanalnetzen kann der gewählte Versuchsaufbau mit dem Ausschnitt eines Absturzbauwerkes verglichen werden. So werden beispielsweise Hausanschlussleitungen, die an tief liegenden Hauptkanälen angeschlossen werden, mit einer senkrecht bzw. fast senkrecht nach unten verlaufenden Falleitung, einem so genannten Schwanenhals verlegt.

Durch die Verwendung dieser speziellen Kulturgefäße, mit „Blumentöpfen“ aus Rohrverbindungen und Weiden als Versuchspflanzen, ist es möglich, die Abhängigkeit des Wurzelwachstums in Abhängigkeit der Eigenschaften unterschiedlichen Rohrverbindungstypen zu untersuchen. (vgl. Abb. 91 bis Abb. 94).

Die hier durchgeführten Versuchsreihen zeigen eine Möglichkeit, Wurzeleinwuchs bei einer insgesamt relativ kurzen Versuchsdauer und unter kontrollierten Bedingungen herbeizuführen. Die Beobachtung realer Schadensfälle zeigt aber, dass sich dieser Vorgang in der Regel über viele Jahre hinweg zieht und dass nicht jede Rohrverbindung in Baumnähe zwangsläufig von Wurzeln penetriert wird. In zwei parallel verlaufenden Versuchsreihen kamen dabei sowohl Verbindungen zum Einsatz, bei denen Spitz- und Glockenende bündig abschlossen (Variation 1, vgl. Abb. 91 A), als auch Verbindungen, bei denen das Spitzende über das Glockenende hinaus stand (Variation 2, vgl. Abb. 91 B). Dieser Ansatz sorgt dafür, dass bei einem Teil der Kulturgefäße ein Trichtereffekt eintritt, der die Wurzeln entlang des Spitzendes in Richtung des Dichtelements leiten kann.



A: Variation 1

B: Variation 2

Abb. 91: Längsschnitt der Kulturgefäße für die Outside-In-Versuche. Zur Verminderung des Wurzelraumes und der Versuchsdauer wurde eine Abdeckung oberhalb des Spitzendes angebracht. **A** Beispiel eines Kulturgefäßes, bei dem Spitzende und Muffe bündig abschließen, im weiteren auch als „Variation 1“ bezeichnet. **B** Beispiel eines Kulturgefäßes, bei dem ein Trichtereffekt eintritt, durch den die Wurzeln in Richtung des Dichtelements geleitet werden können, im weiteren auch als „Variation 2“ bezeichnet.

Durch das Einsetzen eines Deckels im Umfeld der Rohrverbindung sowie die Montage eines ringförmigen Mantels aus Folie um die Rohrverbindung (Pflanzgefäßränder) wurde der mögliche Wurzelraum auf ein Minimum eingeschränkt (vgl. Abb. 91). Die Rohrverbindungen wurden senkrecht aufgestellt, der verbleibende Ringspalt mit Substrat gefüllt und jedes so erstellte Pflanzgefäß mit jeweils vier Weidenstecklingen (*Salix alba*-hybr.) bepflanzt. (Abb. 92)

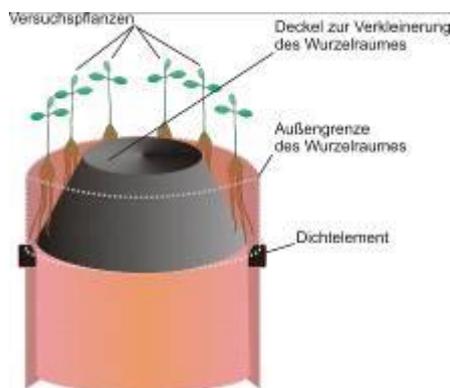


Abb. 92 Kulturgefäß zur Untersuchung der Durchwurzelung von Rohrverbindungen (vollständig zusammengesoben, Variation 1, vgl. Abb. 91).



Abb. 93: Kulturgefäße für die Outside-In-Versuche (Variation 1, vgl. Abb. 91a). **A** Zusammenfügen von Muffe und Spitzende. **B** Anbringen einer Kunststoffhaube (Blumentopf) zur Verminderung des Volumens. **C** Kulturgefäß nach Anbringen eines zweiten Gefäßes zur Erzeugung eines minimalen Wurzelraumes. **D** wie C, Ansicht von oben, hier ist der verbleibende Raum im Kulturgefäße deutlich erkennbar (Pfeile).

Das Versuchsprogramm umfasst insgesamt 54 Einzelversuche (9 Verbindungstypen mit je 6 Gefäßen). Während der Versuchsdauer wurde eine ausreichende Bewässerung der Pflanzen sichergestellt. Der Ausbau der ersten Versuchsansätze erfolgte nach 10 Monaten.



Abb. 94: Durchführung der Outside-In-Versuche. **A** Bepflanzung der Kulturgefäße. **B** Kontrolle der Versuchspflanzen nach Ablauf einer Zeit von 6 Monaten. **C** Öffnung eines Kulturgefäßes aus PVC-U. Die Rohrverbindung wurde längs aufgetrennt, ohne das Eintreten räumlicher Verlagerungen an den Wurzeln. **C** wie **D**, Öffnung eines Kulturgefäßes aus Keramik, ohne Beeinträchtigung der vorhandenen Wurzeln.

Die Pflanzgefäße wurden in vertikaler Lage ausgebaut. Hierbei wurden die Glockenenden mitsamt den sie umgebenden Mänteln und dem eingefüllten Substrat auf zwei gegenüber liegenden Seiten durchtrennt und die Hälften vom Spitzende abgelöst (Abb. 94 A und B). Diese Vorgehensweise ermöglichte eine Beobachtung des bis dahin erfolgten Wurzelwachstums im Bereich des Muffenspaltes, ohne die sich dort aufhaltenden Wurzeln versehentlich aus ihrer ursprünglichen Lage zu versetzen. Bis auf wenige Ausnahmen befanden sich die Versuchspflanzen zum Zeitpunkt des Ausbaus in einem insgesamt guten Zustand. Durch die Bestückung der Kulturgefäße mit jeweils vier Stecklingen konnten die Auswirkungen des Verlustes einzelner Pflanzen kompensiert werden. Der sichtbare, oberirdische Massezuwachs

während der Vegetationsperiode entsprach dem zu erwartenden Zuwachs von Weidenstecklingen während einer vergleichbaren Wachstumsperiode an natürlichem Standort.

An den geöffneten Rohrverbindungen wurde sichtbar, dass der überwiegende Teil der in Richtung der Dichtelemente wachsenden Wurzeln beim Kontakt mit dem Rohrmaterial am Glockenende sowie beim Kontakt mit dem Dichtungsmaterial von ihrer ursprünglichen Wuchsrichtung abgelenkt wurde (Abb. 95 A bis F und Abb. 96 A bis F). Diese Wurzeln wuchsen daraufhin an der Grenzfläche Rohrmaterial/Substrat bzw. an der Grenzfläche Rohrmaterial/Dichtungsmaterial entlang (Abb. 95 C und D und Abb. 96 E und F). Der Zwischenraum zwischen Spitz- und Glockenende war bei den getesteten Kunststoffrohren in allen Fällen bis auf wenige eingeschwemmte Bodenpartikel substratfrei. Die senkrecht zu der nun eingeschlagenen Wuchsrichtung ausgebildeten Seitenwurzeln wuchsen dann am Rohrmaterial in Richtung der Dichtelement weiter oder, im Falle des Wachstums entlang des Dichtungsmaterials, in den Zwickel zwischen der Dichtung und dem Spitzende ein (Abb. 97 A, B und F). Wenige Wurzeln befanden sich bereits unterhalb des Dichtungsmaterials, hatten dieses aber nicht völlig unterwandert (Abb. 96 B und D, kein Durchwuchs). Die sich in diesen Bereichen aufhaltenden Wurzeln, reagierten auf Grund des Anpressdruckes, der durch die Dichtung aufgebracht wird, mit der verstärkten Produktion von Festigungsgewebe (Abb. 95 C, D und E Abb. 96 C Abb. 97 C).



Abb. 95: Auswertung der Outside-In-Versuche **A** Rehau PVC KG SN 4, Variation 1. **B** Rehau PVC KG SN 4, plan - Variation 2. **C** Ostendorf PVC KG - Variation 1. Seitenwurzeln sind in Richtung des Dichtelementes gewachsen (Pfeil). **D** Ostendorf PVC KG - Variation 2. Seitenwurzeln sind in Richtung des Dichtelementes gewachsen (Pfeil). **E** Wavin PVC KG - Variation 1. Seitenwurzeln sind in Richtung des Dichtelementes gewachsen (Pfeil). **F** Wavin PVC KG - Variation 2.



Abb. 96: Auswertung der Outside-In-Versuche **A** Rehau PVC SN 8 - Variation 1. **B** Rehau PVC SN 8 - Variation 2. Die Wurzeln befinden sich in direkter Nähe zum Dichtelement (Pfeil). **C** Ostendorf KG 2000 PP - Variation 1. Wurzeln befinden sich unterhalb des Dichtelementes (Pfeil). **D** Ostendorf KG 2000 PP. Die Wurzeln befinden sich in direkter Nähe zum Dichtelement (Pfeil). **E** Rausisto SN 10 PP - Variation 1. **F** Rausisto SN 10 PP - Variation 2.



Abb. 97: Auswertung der Outside-In-Versuche Keramikrohre **A** Euroceramic Eurotop - Variation 1. Wurzeln befinden sich im Zwickel zwischen dem Dichtelement und dem Spitzende (Pfeil). **B** Euroceramic Eurotop - Variation 2. Wurzeln befinden sich unterhalb des Dichtelementes (Pfeil). **C** Euroceramic Eurotrade - Variation 1. Wurzeln befinden sich im Zwickel zwischen dem Dichtelement und dem Spitzende (Pfeil). **D** Euroceramic Eurotrade - Variation 2. **E** Steinzeug Cerafix L - Variation 1. **F** Steinzeug Cerafix L - Variation 2. Wurzeln befinden sich im äußeren Ringraum der Rohrverbindung (Pfeil).

Die ausgebauten Steinzeug- bzw. Keramikrohre zeigten auf Grund der Konstruktion ihrer Verbindungen ein von den PVC- und PP-Rohren teilweise abweichendes Bild. Der im Vergleich zu den getesteten Kunststoffverbindungen größere Muffenspalt wurde hier vollständig mit Substrat zugesetzt, welches im Laufe der Vegetationsperiode vollständig durchwurzelt wurde. Der im Vergleich zu den Ringspalten der Kunststoffrohre größere

Ringspalt der Rohre aus glasiertem Steinzeug sorgt dafür, dass das unverdichtete Substrat im Ringraum zwischen Spitzende und Muffe vollständig mit feinen Wurzeln durchdrungen wird und so ein Polster aus Wurzeln und Substrat bilden. Auch hier wurden Wurzeln angetroffen, die sich bereits zwischen der Elastomerdichtung und der Wandung des Spitzendes befanden. Das Wurzelwachstum in den Ringräumen der Rohrverbindung aus unglasiertem Steinzeug und einer Überschiebkupplung aus PP ist mit dem Wurzelwachstum in den Kunststoffrohrverbindungen vergleichbar. Durch den Ringspalt kann begrenzt Substrat eindringen. Der Ringraum wurde aber nicht vollständig ausgefüllt. Auch hier waren einige Wurzeln bereits zwischen Spitzenden und Elastomerdichtung gewachsen. Keine Wurzel hatte die Rohrverbindung bis dahin durchdrungen.

Zum jetzigen Zeitpunkt hat sich die gewählte senkrechte Versuchsanordnung bewährt. Innerhalb einer vergleichsweise kurzen Zeit konnte eine erste Wurzel-Dichtungs-Interaktionen provoziert werden. Beim Ausbau der Rohrverbindungen wurde in keinem Fall stehendes Wasser in den Ringräumen beobachtet. Stehendes Wasser hätte in diesen Bereichen ein anaerobes Milieu bilden können, welches je nach Pflanzenart bzw. -gattung auch Wurzelwachstum nachhaltig verhindern kann. Die Wurzeln der Weiden in allen Pflanzgefäßen waren vital und zeigten keine Anzeichen von Fäulnis.

In Anlehnung an die zuvor beschriebene Versuchsreihe findet seit dem Frühjahr 2005 ein weiterer, **alternativer Versuch** statt, mit dem die Interaktion zwischen Elastomerdichtungen und Wurzeln weitergehend untersucht werden soll. Während die Outside-In-Versuche eine Modifikationen der Rohrverbindungssituation weitgehend ausschließen, bietet die nachfolgend vorgestellte Methode eine direkte Einflussnahme auf die an der Ausbildung der Wurzelwerkes beteiligten Parameter. Dies schließt die Verwendung unterschiedlicher Substrate, Dichtungs- und Rohrwerkstoffe sowie die Veränderung des Anpressdruckes zwischen Rohrwerkstoff und Elastomerdichtung ein. Der Versuchsaufbau wurde so entworfen, dass die zu testenden Materialien mit wenigen Handgriffen eingesetzt werden können. Darüber hinaus vereinfacht die Konstruktion aus Acrylglas die Kontrolle des aktuellen Versuchsstatus. Die Apparatur erscheint geeignet, die Auswirkung von unterschiedlichen Anpressdrücken und Dichtungsprofilgeometrien in der Rohrverbindung auf die Art des Wurzelwachstums kontrolliert und reproduzierbar zu testen (vgl. Abb. 98).

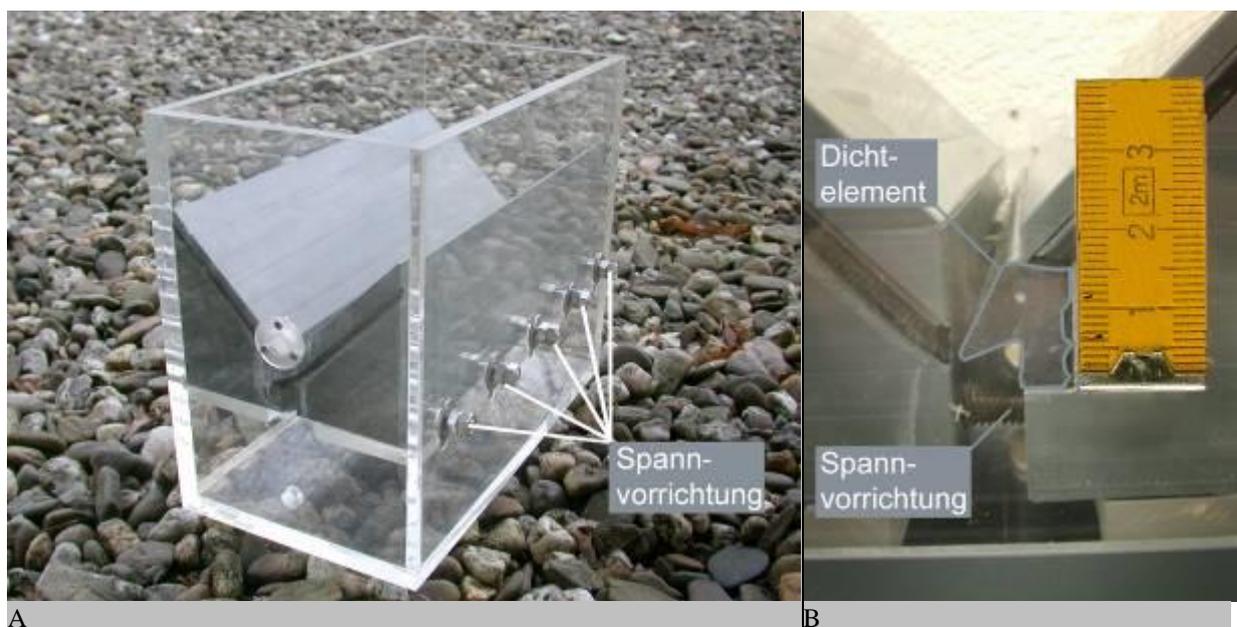


Abb. 98: Untersuchung des Wurzelwachstums an elastomeren Dichtelementen. **A** Seitenansicht der Vorrichtung. **B** Detail eines eingebauten Dichtungselementes. Der Querschnitt des Dichtelementes wurde für die Abbildung hervorgehoben.

Das Pflanzgefäß hat die Außenmaße von 320 x 250 x 170 mm (B-H-T) und ist aus klarem, 10 mm starkem Acrylglas angefertigt. Auf einer Höhe von 100 mm über dem Gefäßboden sind an den Innenseiten der Längswände zwei Stege mit einem Abstand von 30 mm zueinander angebracht. Diese Stege liegen auf ganzer Länge auf zwei Kunststoffblöcken mit den Maßen 300 x 100 x 70 mm, welche auf der dem Steg abgewandten Seite in einem Winkel von 45° abgeschrägt sind. An ihren Kopfseiten sind Dichtungslippen eingelassen, um das Wurzelwachstum zwischen Block und Gefäßwand zu verhindern. Einer der Blöcke ist mit einer Nut versehen, welche die zu testenden Dichtelemente aufnehmen kann. Unterhalb dieser eingelegten Dichtung befinden sich an jedem Block jeweils fünf Bohrungen zur Aufnahme von Gewindestangen (M8), mit denen die Blöcke miteinander verbunden und gegeneinander verspannbar sind. Die Enden der Gewindestangen wurden durch das Acrylglas geführt, so dass die gewünschte Vorspannung von außen auf die Kontaktfläche Kunststoffblock/Dichtungsmaterial aufgebracht werden kann. Der Pflanzraum oberhalb der Kunststoffblöcke besitzt ein Volumen von ca. 5 Litern. An den Kopfseiten des Gefäßes befinden sich, auf der Höhe der Kontaktfläche Kunststoffblock/Dichtungsmaterial, Abzugslöcher zur Drainage des Bodenkörpers.

Zur Verdunkelung des unteren Kompartiments der Apparatur wurde das Pflanzgefäß in eine passgenaue Form aus grauem Kunststoff und einer Höhe von 100 mm gestellt (vgl. Abb. 99). Dieser unterer Teil der Apparatur ist drainiert. Zum Ablauf des in die unteren Kammer fließenden Gießwassers, befindet sich an einer Kopfseite des Gefäßes ein Abzugsloch.



Abb. 99: Vorrichtung zur Untersuchung des Wurzelwachstums an elastomeren Dichtelementen. Kultur der Versuchspflanzen *Acer pseudoplatanus*.

Zur Sicherstellung einer dauerhaften Drainage im Pflanzraum oberhalb der Dichtlippe wurde nach dem Einsetzen einer Keildichtung jeweils von innen vor den Abzugslöchern im oberen Kompartiment eine Lage Feinkies aufgebracht. Die Vorspannung wurde so gewählt, dass die Dichtungslippe an das gegenüber liegende Kunststoffmaterial anschließt („handfest“). Danach wurden der Pflanzraum mit Substrat befüllt und zwei Berg-Ahorn Jungpflanzen (*Acer pseudoplatanus*) eingesetzt. Der so vorbereitete Versuchsaufbau steht seit dem 01.05.2005 unter ständiger Kontrolle auf dem Versuchsgelände des Botanischen Gartens der Ruhr-Universität Bochum.

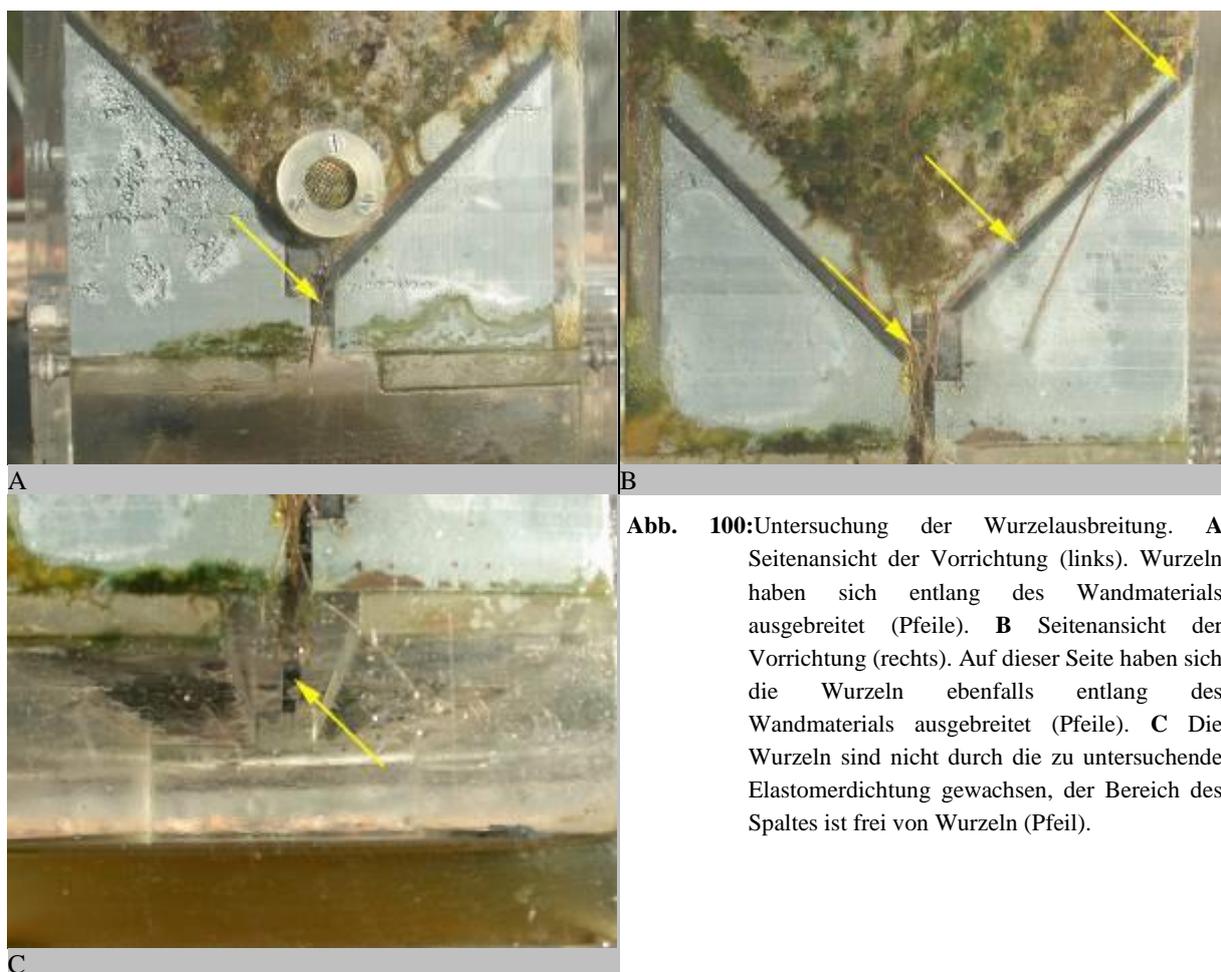


Abb. 100: Untersuchung der Wurzel ausbreitung. **A** Seitenansicht der Vorrichtung (links). Wurzeln haben sich entlang des Wandmaterials ausgebreitet (Pfeile). **B** Seitenansicht der Vorrichtung (rechts). Auf dieser Seite haben sich die Wurzeln ebenfalls entlang des Wandmaterials ausgebreitet (Pfeile). **C** Die Wurzeln sind nicht durch die zu untersuchende Elastomerdichtung gewachsen, der Bereich des Spaltes ist frei von Wurzeln (Pfeil).

Die eingesetzten Pflanzen zeigen einen ihrem Alter entsprechenden, normalen Zuwachs. Bereits im Sommer 2005 zeigten sich an den Kopfseiten des Pflanzgefäßes erste Wurzeln. Einige dieser Wurzeln bogen nach dem Kontakt mit dem Wandmaterial in Richtung Gefäßboden ab und wuchsen entlang der seitlich angebrachten Dichtungslippen herab. Diese lassen bauartbedingt einen Spalt zwischen den Kunststoffblöcken frei, den die Wurzeln dazu nutzten, ihr Wachstum an dem Wandmaterial entlang, weiter in Richtung des Gefäßbodens fortzuführen.

Zum Zeitpunkt der letzten Kontrolle im Herbst 2006 hatten die Pflanzen bereits damit begonnen, ihr Laub abzuwerfen und sind in die Phase der Winterruhe eingekehrt. Dementsprechend haben die Wurzeln ebenfalls ihre Wachstumsgeschwindigkeit auf ein Minimum herabgesenkt und verbleiben vorerst im aktuell dargestellten Zustand.

Auf Grund der Erkenntnisse aus den ausgebauten Outside-In-Versuchen wurde auf den Ausbau der Versuchsanordnung verzichtet. Es ist davon auszugehen, dass sich hier ebenfalls einige der neu gebildeten Wurzeln im Bereich des Dichtungsmaterials aufhalten. Ein Durchtritt der Wurzeln konnte nicht beobachtet werden. Auf Grund der relativ kurzen Standzeit dieses Versuchansatzes ist davon auszugehen, dass zu einem späteren Zeitpunkt aussagekräftigere Ergebnisse gewonnen werden können. Die Versuchsdauer wird daher über einen Zeitraum einer weiteren Vegetationsperiode verlängert.

4.4 Untersuchung der Verbindungsgeometrie

Das Wurzelwachstum in den Rohrverbindungen wird unter anderem durch die Rohrverbindungsgeometrie beeinflusst. Die Untersuchungen in [1] haben gezeigt, dass es in der Regel erst dann zu einer Durchwurzelung eines Dichtelementes kommt, wenn die Spalten und Räume im außerhalb des Rohres befindlichen Teil der Rohrverbindung von Wurzeln ausgefüllt sind. Erst die Wurzelmasse, die sich durch monate- oder jahrelanges Wachstum in den Spalten der Rohrverbindung angehäuft hat, bietet in vielen Fällen das Widerlager, das es den Wurzeln ermöglicht, den Anpressdruck des Dichtelementes zu überwinden.

Grundsätzlich können die Bereiche vor dem Dichtmittel durch die Begriffe Ringraum und Ringspalt beschrieben werden. Beispielhaft ist in Abb. 101 die Rohrverbindungsgeometrie zweier unterschiedlicher Rohrverbindungen dargestellt. Die Rohrverbindungen wurden in Längsrichtung aufgeschnitten. Der **Ringspalt** (in Abb. 101 mit **1** gekennzeichnet) bildet die Eintrittsöffnung in den **Ringraum** (in Abb. 101 mit **2** gekennzeichnet). Darüber hinaus begrenzt der Ringspalt den Ringraum nach Außen. Die Größe des Ringspaltes wird - bezogen auf die Schnittfläche - in mm angegeben. Die Größe des Ringraums wird - bezogen auf die Schnittfläche - in mm² angegeben.

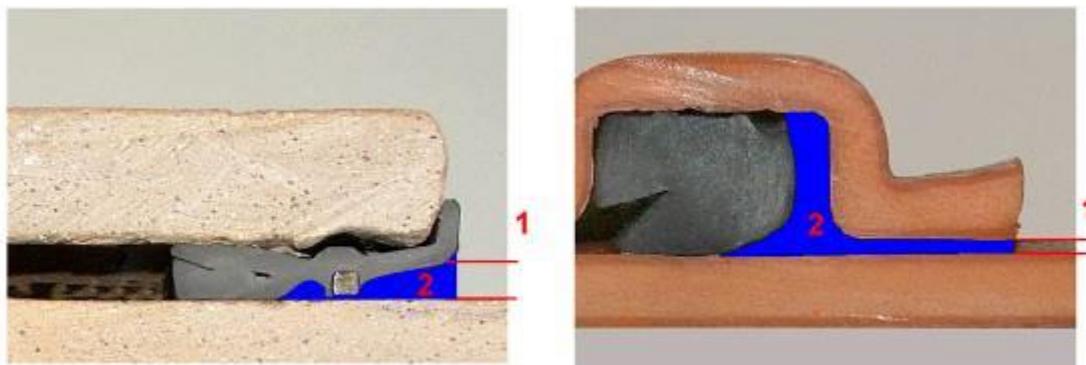


Abb. 101: Definition der Begriffe äußerer Ringspalt (1) und Ringraum (2) bei unterschiedlichem Verbindungstypen.

Im Rahmen des Vorhabens wurde die Geometrie von 11 Rohrverbindungen DN 150 untersucht und dokumentiert, dabei bildet die Beschreibung der Verbindungsgeometrie einen Schwerpunkt. Die Größe des Ringspaltes kann einen Einfluss auf den Verlauf von Wurzeleinwuchsfällen haben (s. Kapitel 4.3).

Die Ringspaltmaße wurden an zusammengesteckten Rohrverbindungen ermittelt. Als Messmittel wurden sogenannte Fühlerlehren und eine Schieblehre eingesetzt. Mit Hilfe der Fühlerlehren konnten die Ringspalte der Rohre aus PVC-U und PP ermittelt werden. Hierbei ist zu beachten, dass die Fühlerlehren jeweils ein festes Maß besitzen und in 1/20 mm – Stufen zur Verfügung stehen. Es wurde das Maß derjenigen Fühlerlehre genommen, bei dem diese Fühlerlehre schlüpfend, d.h. mit einem leichten aber fühlbaren Widerstand in den Ringspalt eingeführt werden konnte. Der Ringspalt der Steinzeug- und Gusseisen-Verbindungen wurde mit der Schieblehre gemessen. Sowohl mit den Fühlerlehren als auch der Schieblehre wurden jeweils drei Messungen am Rohrumfang durchgeführt und ein Mittelwert gebildet (vgl. Tabelle 17).

Die Ringräume wurden anhand skaliertes Photos von in Längsrichtung aufgeschnittenen Rohrverbindungen ermittelt (Abb. 102 B bis Abb. 111 B). In die Berechnung der Ringraumfläche ging jeweils der Bereich vom Ringspalt, der die Grenze der Muffe oder Überschiebkupplung zum anstehenden Boden bzw. zur Rohrbettung bildet, bis zur Anpressdruckfläche der Elastomerdichtung ein (vgl. Abb. 101, blaue Fläche).

Grundsätzlich waren Unterschiede zwischen den einzelnen Rohrwerkstoffen erkennbar. Bei den Rohren aus dem Werkstoff PVC-U variierten der Mittelwerte der Ringspalte zwischen 0,3 und 0,7 mm. Für den Werkstoff PP wurden Ringspalte im Mittel von 0,3 mm ermittelt. Bei diesen beiden Rohrwerkstoffen waren die Größe der Ringspalte grundsätzlich kleiner als die maximale Höhe der sich dahinter befindenden Ringräume. Bei den Rohren aus dem Werkstoff Steinzeug wurden im Rahmen der Versuche im Mittel Ringspalte zwischen 3,7 und 7,0 mm. Für die Rohrverbindungen aus dem Werkstoff GGG wurden im Mittel Ringspalte in Höhe von 0,8 mm gemessen. Die Größen der Ringspalte und Ringräume der untersuchten Rohrverbindungen sind in Tabelle 17 zusammengefasst. Die Photoaufnahmen der Einzelmessungen werden anschließend dargestellt.

Tabelle 17: Größe des äußeren Ringspalt und des Ringraumes bei den ausgewählten Rohrverbindungssystemen.

Werkstoff	Produktbezeichnung	Ringspalt [mm]	Ringraum [mm²]
PVC-U	PVC KG, DN 160 Gebr. Ostendorf GmbH & Co KG	0,7 mm	38 mm ²
	PVC-KG, DN 150 Wavin GmbH	0,4 mm	23 mm ²
	Awadukt SN4 PVC KG, DN/OD 160 Rehau AG + Co	0,3 mm	33 mm ²
	Awadukt PVC SN8, DN/OD 160 Rehau AG + Co	0,3 mm	12 mm ²
PP	Awadukt SN4 PP KG, DN/OD 160 Rehau AG + Co	0,6 mm	28 mm ²
	Rausisto SN10 PP KG, DN/OD 160 Rehau AG + Co	0,3 mm	14 mm ²
	PP KG-2000, DN 150 Gebr. Ostendorf GmbH & Co KG	0,6 mm	54 mm ²
Steinzeug, glasiert	Cerafix, Steckmuffe L, DN 150 Deutsche Steinzeug GmbH	7,0 mm	117 mm ²
	Eurotrade, Steckmuffe L, DN 150 Euroceramic GmbH	4,0 mm	83 mm ²
Steinzeug, unglasiert	Eurotop, DN 150 Euroceramic GmbH	3,7 mm	26 mm ²
GGG, Duktiles Gussrohr	Tyton, DN 150 Saint-Gobain Gussrohr GmbH	0,8 mm	37 mm ²

4.4.1 Keramik-/Steinzeugrohre

a) Cerafix DN 150 Steckmuffe L, Deutsche Steinzeug GmbH

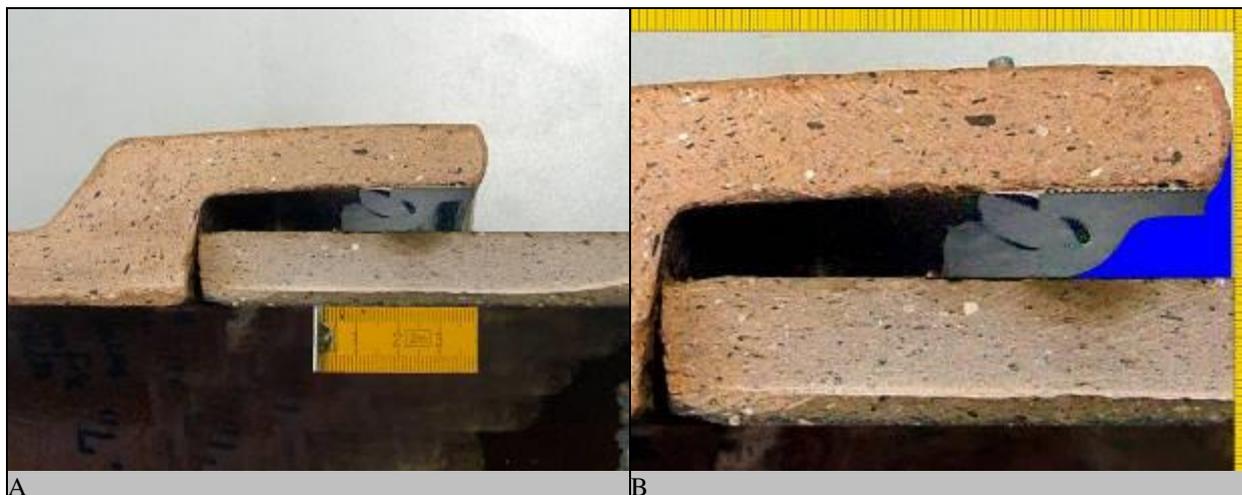


Abb. 102: Untersuchung der Verbindungsgeometrie. Rohrverbindung Steinzeug Cerafix DN 150. **A** Längsschnitt durch die Rohrverbindung. **B** Detail des Dichtelementes. Ringspalt = 7,0 mm. Der blau gekennzeichnete Raum vor dem Dichtelement hat im Längsschnitt eine Fläche von 117 mm².

b) Eurotrade DN 150, Euroceramic GmbH

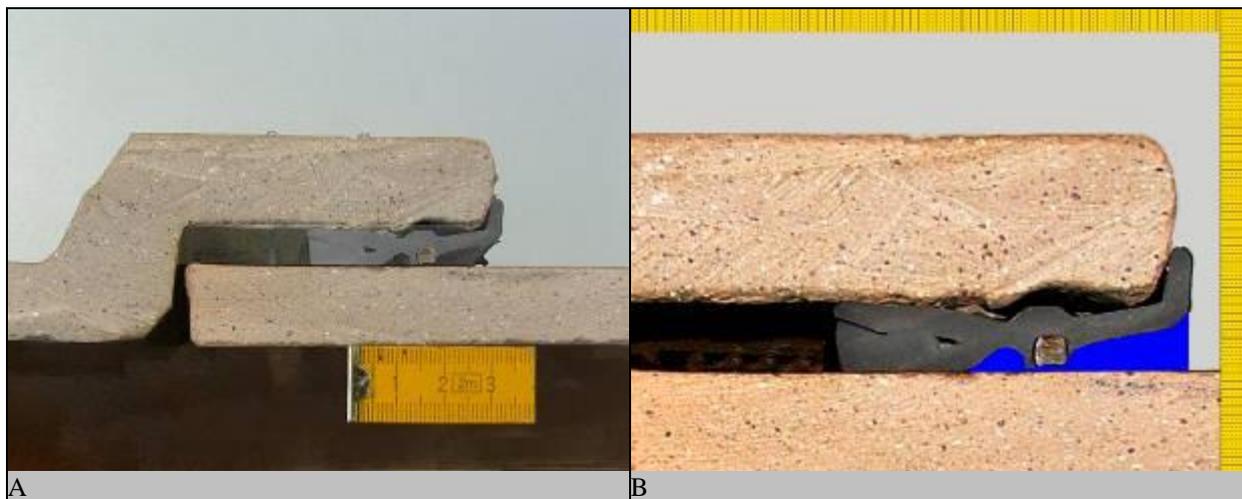


Abb. 103: Untersuchung der Verbindungsgeometrie. Rohrverbindung Euroceramic Eurotrade DN 150. **A** Längsschnitt durch die Rohrverbindung. **B** Detail des Dichtelementes. Ringspalt = 4,0 mm. Der blau gekennzeichnete Raum vor dem Dichtelement hat im Längsschnitt eine Fläche von 83 mm².

c) Eurotop Überschiebkupplung, DN 150, Euroceramic GmbH

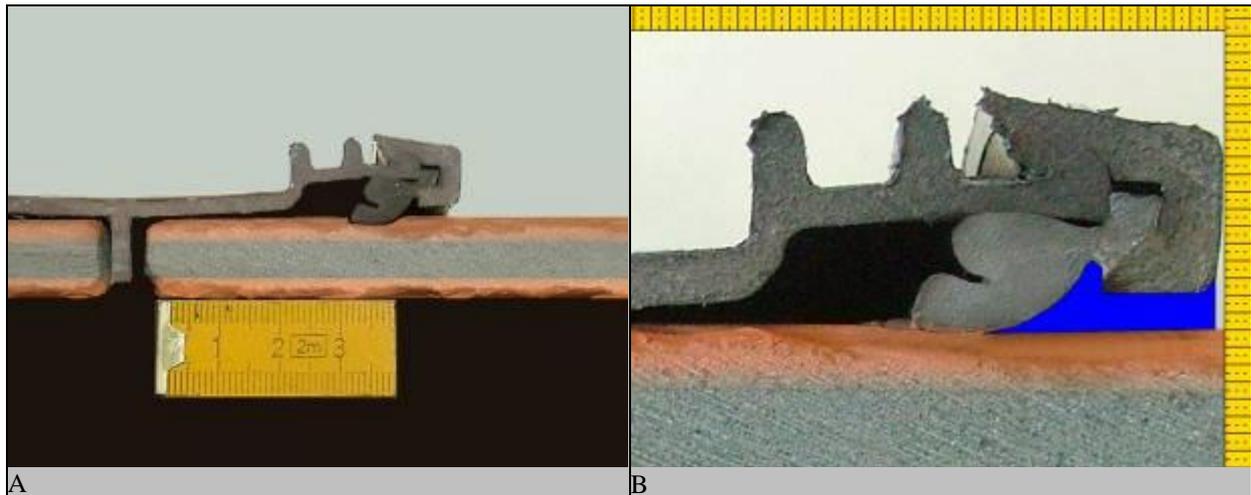


Abb. 104: Untersuchung der Verbindungsgeometrie. Rohrverbindung Euroceramic Eurotop, DN 150. **A** Längsschnitt durch die Rohrverbindung. **B**. Detail des Dichtelementes. Ringspalt = 3,7 mm. Der blau gekennzeichnete Raum vor dem Dichtelement hat im Längsschnitt eine Fläche von 26,34 mm².

4.4.2 Rohre aus PVC-U

a) KG-PVC DN 160, Ostendorf GmbH & Co. KG

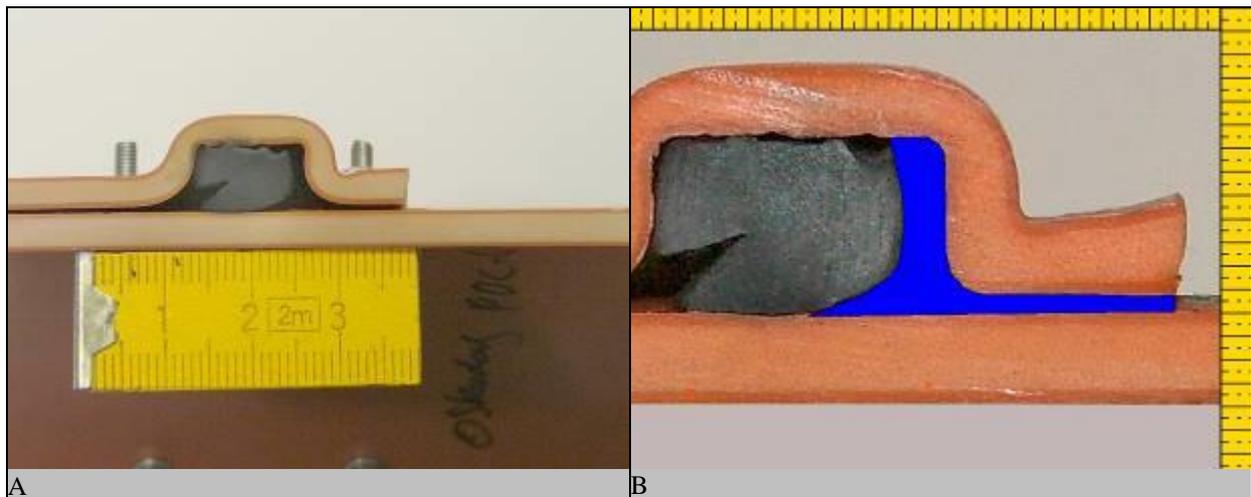


Abb. 105: Untersuchung der Verbindungsgeometrie. Rohrverbindung Ostendorf KG-PVC DN 160. **A** Längsschnitt durch die Rohrverbindung. **B** Detail des Dichtelementes. Ringspalt = 0,7 mm. Der blau gekennzeichnete Raum vor dem Dichtelement hat im Längsschnitt eine Fläche von 38 mm².

b) Awadukt SN4 PVC, DN/OD 160, Rehau AG + Co

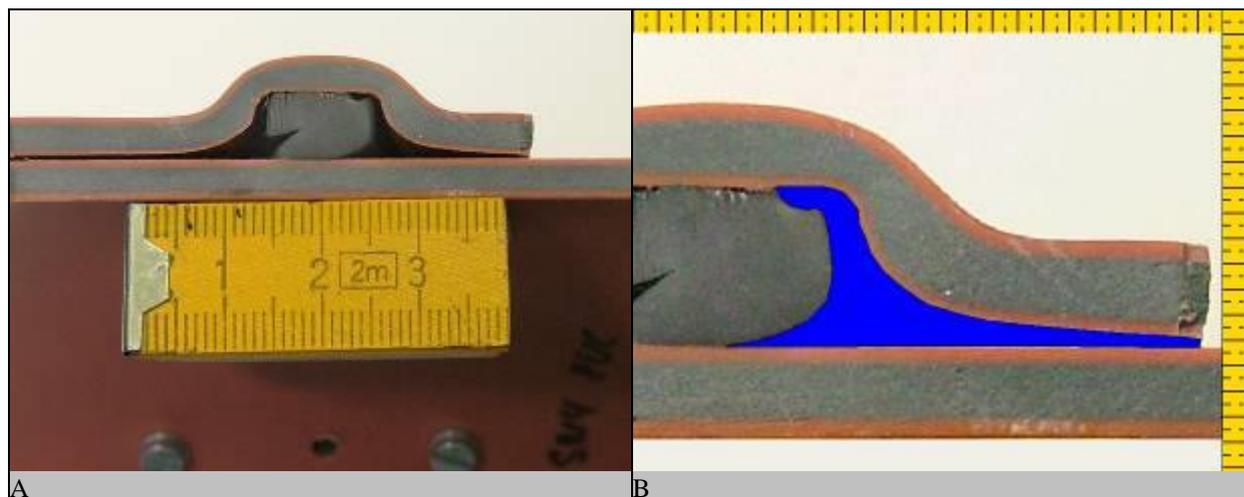


Abb. 106: Untersuchung der Verbindungsgeometrie. Rohrverbindung Awadukt SN4 PVC DN/OD 160. **A** Längsschnitt durch die Rohrverbindung. **B** Detail des Dichtelementes. Ringspalt = 0,3 mm. Der blau gekennzeichnete Raum vor dem Dichtelement hat eine Fläche von 33 mm².

c) KG- PVC, DN 150, GmbH Kunststoffrohrsysteme

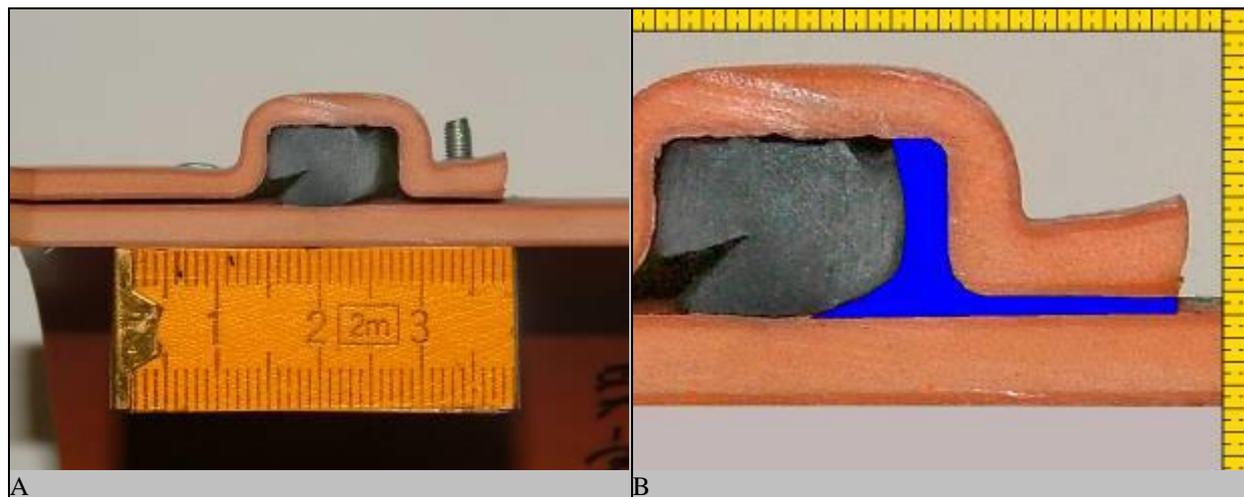


Abb. 107: Untersuchung der Verbindungsgeometrie. Rohrverbindung Wavin KG-PVC DN 150. **A** Längsschnitt durch die Rohrverbindung. **B** Detail des Dichtelementes. Ringspalt = 0,4 mm. Der blau gekennzeichnete Raum vor dem Dichtelement hat eine Fläche von 23 mm².

d) Awadukt PVC SN8, DN/OD 160, Rehau AG + Co

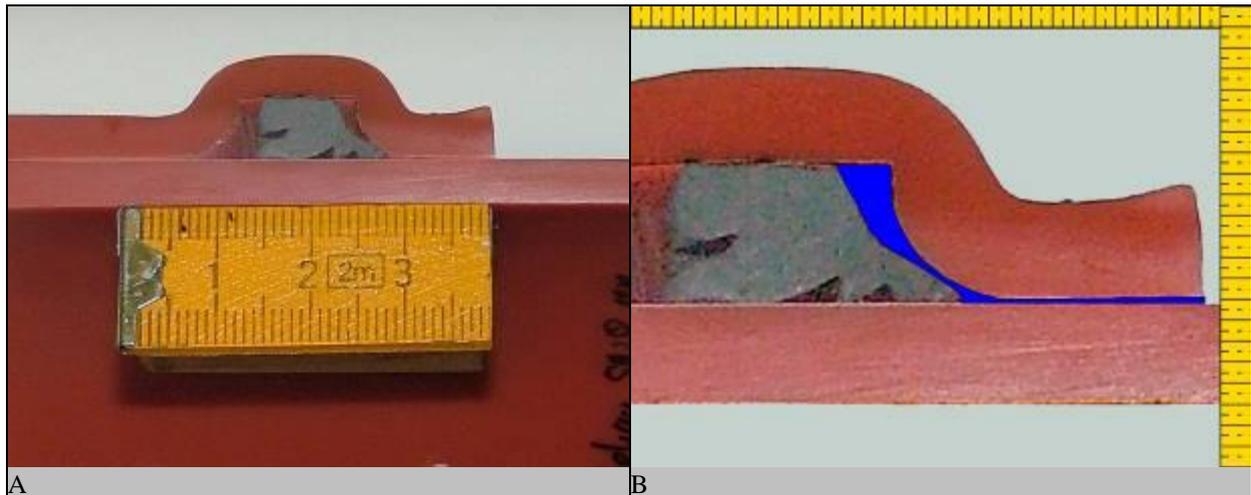


Abb. 108: Untersuchung der Verbindungsgeometrie. Rohrverbindung Rehau Awadukt PVC SN8 DN/OD 160. **A** Längsschnitt durch die Rohrverbindung. **B** Detail des Dichtelementes. Ringspalt = 0,3 mm. Der blau gekennzeichnete Raum vor dem Dichtelement hat eine Fläche von 12 mm².

4.4.3 Rohre aus PP

a) KG-2000, DN 150, Gebr. Ostendorf GmbH & Co KG

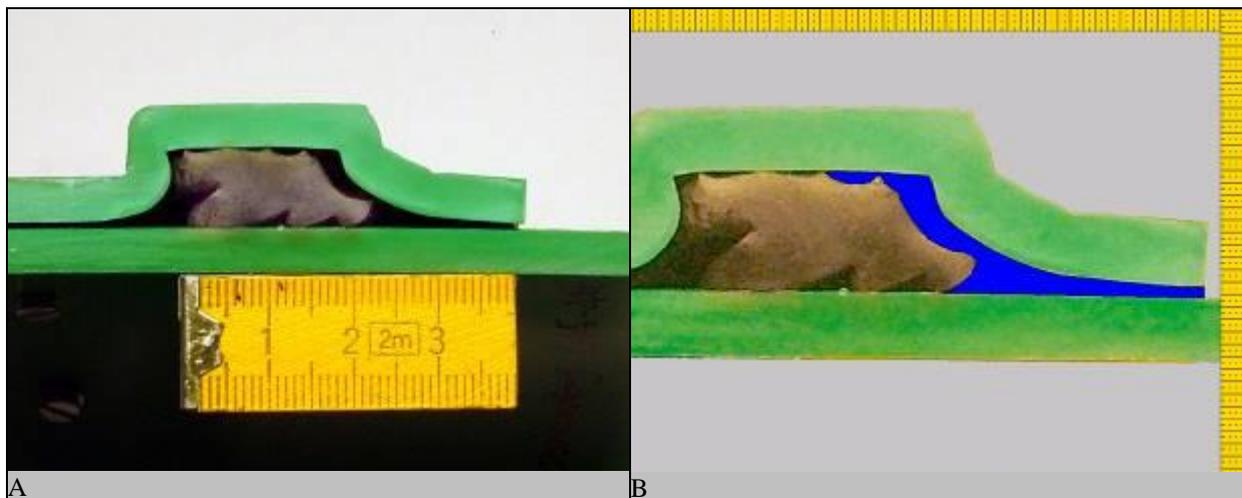


Abb. 109: Untersuchung der Verbindungsgeometrie. Rohrverbindung Ostendorf KG-2000 DN 150. **A** Längsschnitt durch die Rohrverbindung. **B** Detail Dichtelement. Ringspalt = 0,6 mm. Der blau gekennzeichnete Raum vor dem Dichtelement hat eine Fläche von 54 mm².

b) Awadukt SN4 PP, DN/OD 160, Rehau AG + Co

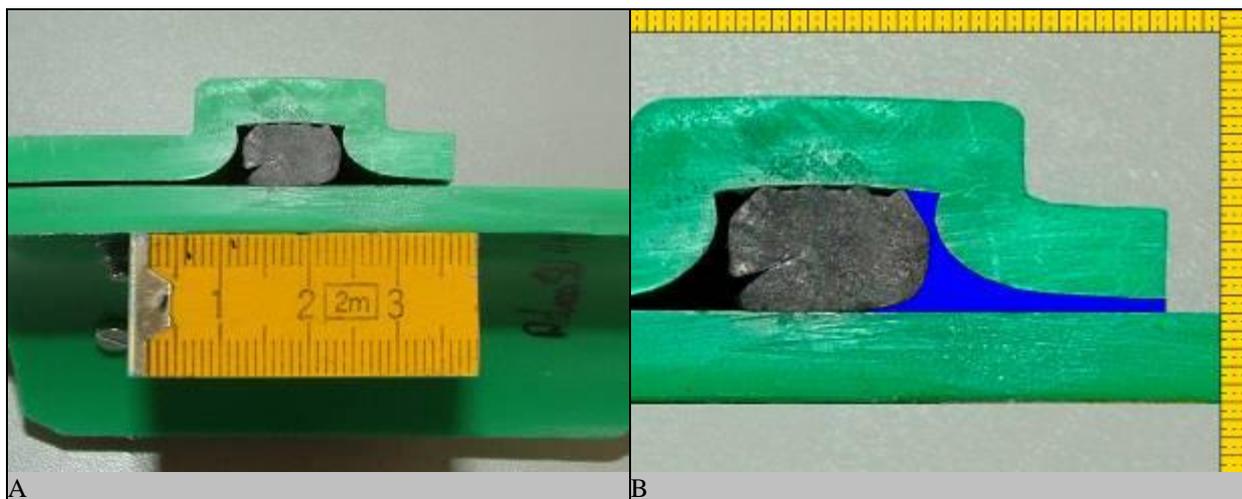


Abb. 110: Untersuchung der Verbindungsgeometrie. Rohrverbindung Rehau Awadukt SN4 PP. **A** Längsschnitt durch die Rohrverbindung. **B** Detail Dichtelement. Ringspalt = 0,6 mm. Der blau gekennzeichnete Raum vor dem Dichtelement hat eine Fläche von 28 mm².

c) *Rausisto SN 10 PP, DN/OD 160, Rehau AG + Co*

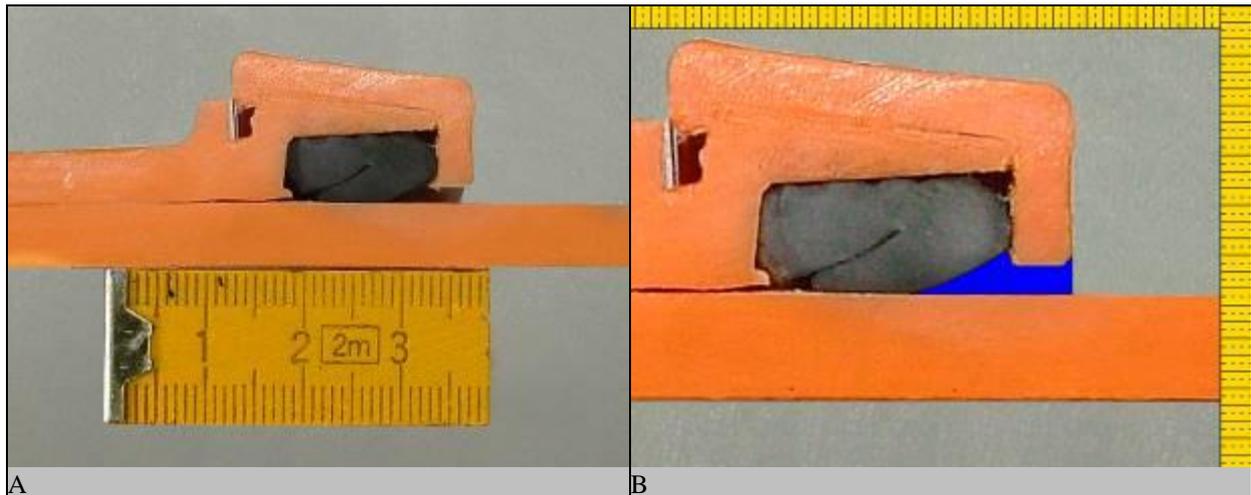


Abb. 111: Untersuchung der Verbindungsgeometrie. Rohrverbindung Rausisto SN 10 PP, DN/OD 160. **A** Längsschnitt durch die Rohrverbindung. **B** Detail Dichtelement. Ringspalt = 0,3 mm. Der blau gekennzeichnete Raum vor dem Dichtelement hat eine Fläche von 14 mm².

4.4.4 Rohre aus duktilem Gusseisen

Integral, DN 150, Saint Gobain AG

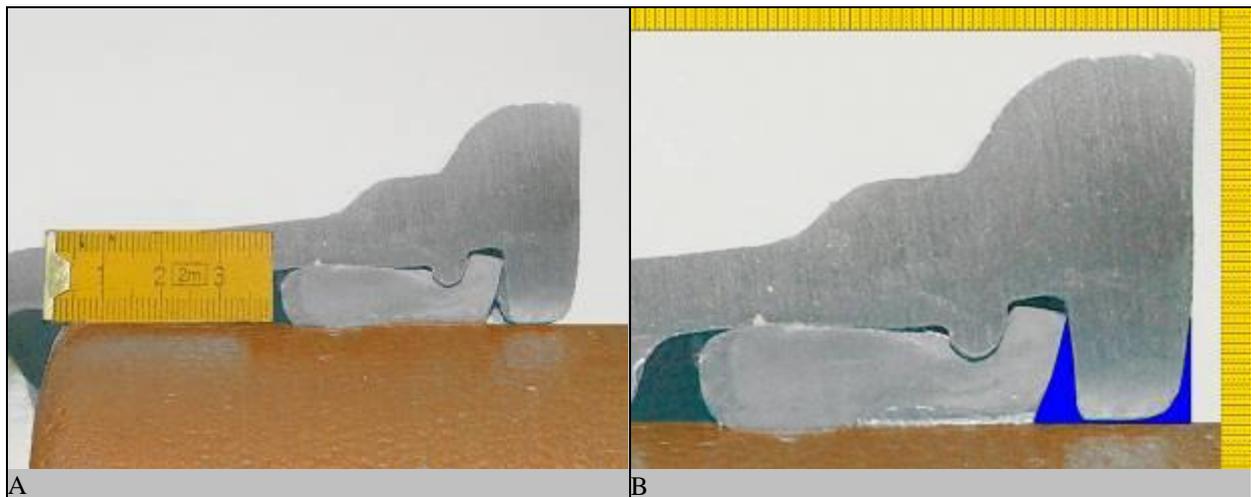


Abb. 112: Untersuchung der Verbindungsgeometrie. Rohrverbindung Gussrohr Tyton, DN 150. **A** Längsschnitt durch die Rohrverbindung. **B** Detail Dichtelement. Ringspalt = 0,8 mm. Der blau gekennzeichnete Raum vor dem Dichtelement hat eine Fläche von 37 mm².

4.5 Zusammenfassung: Wurzelfestigkeit von Rohrverbindungen

Schwerpunkt der Untersuchungen an Rohrverbindungen DN 150 waren kleinformatische Pflanzversuche an Rohrverbindungen sowie ingenieurtechnische Versuche zur Ermittlung des Anpressdrucks, der jeweiligen Rohrverbindungsgeometrie und der Widerstandsfähigkeit unter Außenwasserdruck. Die Untersuchungen wurden an marktgängigen Rohrprodukten im Nennweitenbereich DN 150 durchgeführt. Zum Einsatz kamen Steckverbindungen für Rohre aus Steinzeug, PVC, PP und GGG (vgl. Tabelle 4).

Die Ergebnisse der kleinformatischen Pflanzversuche nach einer Versuchszeit von 10 Monaten können wie folgt zusammengefasst werden:

Eine Durchwurzelung war bei keiner getesteten Rohrverbindung festzustellen. Jedoch zeigt die Tatsache, dass vereinzelt Wurzeln angetroffen wurden, die sich bereits unterhalb des Dichtungsmaterials befanden, dass das Eindringen von Wurzeln in den Muffenspalt und zum Teil auch der erste Ansatz zum Überwinden der Dichtelemente bei jeder getesteten Art von Rohrverbindung möglich erscheint.

Es konnte beobachtet werden, dass dieser Vorgang grundsätzlich unabhängig vom Ringspalt eintrat. Unterschiede im Wurzelbild konnten trotzdem in Abhängigkeit vom Ringspalt festgestellt werden. Bei den Rohrverbindungen mit einem Ringspalt, der das Eindringen von Boden behindert, wurden mehrere „Haupt“-Wurzeln angetroffen, die sich im Ringraum verzweigten. Die Verzweigungen erfolgten nicht nur in den freien Ringraum, sondern auch in Richtung der Elastomerdichtung bzw. in den Zwickel zwischen Spitzende und Elastomerdichtung. Grundsätzlich ist das Wurzelwachstum im Ringraum somit unabhängig vom Vorhandensein von Substrat im Muffenspalt. Die Überbrückung substratfreier Bereiche stellt für Wurzeln kein Problem dar.

Bei den Rohrverbindungen mit einem großen Ringspalt wird das Wurzelwachstum insbesondere durch das eingedrungene Substrat beeinflusst. In diesem unverdichteten Substrat bildet sich ein Geflecht aus Feinwurzeln und das Substrat wird in Kombination mit den Wurzeln wie ein Kissen zusammengehalten. Aber auch hier waren erste Wurzeln in den Zwickel zwischen Elastomerdichtung und Spitzende gewachsen. Wie sich das unterschiedliche Wurzelwachstum auf das Durchdringen der Rohrverbindungen auswirkt, wird der Ausbau weiterer Versuchsansätze in den Jahren 2007 und 2008 zeigen.

Nach einer Versuchszeit von 10 Monaten konnte im ersten Schritt der Einfluss der Rohrgeometrien auf das Wurzelwachstum zur Beurteilung des Wurzelbildes und zum Erreichen des Ringraumes herangezogen werden. Ein direkter Zusammenhang zwischen den untersuchten Anpressdrücken, Anpressdruckflächen, Außenwasserdruckwiderständen und dem Einwuchs von Wurzeln durch die Rohrverbindung kann zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht hergestellt werden. Die Ergebnisse zu diesen ingenieurtechnischen Untersuchungen sind in Tabelle 18 zusammengefasst.

Tabelle 18: Untersuchungen an Rohrverbindungen: Zusammenfassung der Ergebnisse

Werkst.	Rohrverbindung	Hersteller	Anpressdrücke [bar], ohne Scherlast		Anpressdrücke [bar], mit Scherlast		Rohrverbindungsgeometrie Ringspalt			max. Außendruck [bar]	
			Einzelwerte	Mittelwert	Einzelwerte	Mittelwert	Ringspalt Einzelwerte	Ringspalt Mittelwert [mm]	Ringraum volumen [mm ²]	Einzelwerte	Mittelwert
Steinzeug	Cerafix, Steckmuffe L	Dt. Steinzeug	5,3	3,0	0,4	0,2	12,0	11,7	117	1,42	1,06
			2,6		0,1		11,4			0,80	
			1,0		0,2		11,6			0,96	
	Eurotrade	Euroceramic	2,3	1,97	1,1	0,4	8,0	7,9	83	2,22	2,17
			1,1		0,1		8,5			2,06	
			1,1		0,1		7,3			2,23	
	Eurotop	Euroceramic	3,7	2,5	4,3	2,0	6,5	6,1	26	1,18	1,17
			1,7		1,5		5,8			1,15	
			2,0		0,1		6,1			1,17	
PVC	KG-PVC DN 160	Ostendorf	4,4	4,5	3,1	3,1	1,6	1,4	38	3,74	3,68 ⁽¹⁾
			4,4		2,9		1,6			3,42	
			4,8		3,3		1,0			3,88	
	Awadukt SN4 PVC DN/OD 160	Rehau AG	10,7	7,8	9,0	6,3	0,7	0,7	33	4,03	3,73 ⁽²⁾
			4,5		2,4		0,9			3,79	
			8,1		7,5		0,5			3,63	
	KG-PVC DN 150	Wavin GmbH	4,8	4,1	3,9	3,7	0,7	0,8	23	2,14	3,18 ⁽³⁾
			3,3		4,2		1,0			3,51	
			4,1		3,0		0,7			3,89	
	Awadukt SN8 PVC, DN/OD 160	Rehau AG	5,4	3,8	2,0	1,7	0,6	0,6	12	4,42	> 4,24 ⁽⁴⁾
			3,1		1,3		0,7			4,28	
			2,8		1,7		0,5			4,03	
PP	KG 2000 DN 150	Gebr. Ostendorf GmbH	4,8	4,7	2,8	3,2	1,2	1,2	54	4,69	> 4,68 ⁽⁴⁾
			4,1		3,2		0,9			4,54	
			5,1		3,6		1,4			4,81	
	Awadukt SN4 PP DN/OD 160	Rehau AG	4,1	5,1	3,5	3,8	0,5	0,6	28	4,40	> 4,31 ⁽⁴⁾
			6,2		4,4		0,5			4,27	
			5,1		3,4		0,7			4,26	
	Rausisto SN 10 PP, DN/OD 160	Rehau AG	9,1	6,5	8,9	6,3	0,8	0,7	14	4,90	> 4,86 ⁽⁴⁾
			3,7		3,4		0,9			4,86	
			6,6		6,5		0,2			4,82	
GGG	Integral, DN 150	Saint-Gobain	24,8	22,2	21,2	17,5	1,2	0,8	37	-	> 4,34 ⁽⁴⁾
			23,9		20,4		0,9			-	
			17,8		10,8		0,4			-	

⁽¹⁾:Beulen der Spitzendes (vgl. Abb.54) ⁽²⁾:Einbeulen des Spitzendes bis zum Bruch (vgl. Abb.59) ⁽³⁾:Beulen des Spitzendes (vgl. Abb.74) ⁽⁴⁾: Maximaldruck des Versorgungsnetzes
kein Versagen der Rohrverbindung

5 Weiterführende Untersuchungen zum Wurzelwachstum

Rohrverbindungen stellen für Wurzeln das letzte Hindernis dar, um Rohrleitungen vor Wurzeleinwuchs zu schützen. Bis dahin müssen die Wurzeln oftmals einen weiten Weg vom Baum zum Leitungsgraben und bis zur Rohrleitung bzw. der Rohrverbindung zurücklegen. Die Ausbildung der Wurzeln wird dabei von der Baumart und den Randbedingungen im Boden beeinflusst. Die in diesem Kapitel beschriebenen weiterführenden Untersuchungen zielen darauf ab, diese Vorgänge in Zukunft besser zu verstehen. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden folgende Aspekte betrachtet:

- Einfluss der **Korngröße und Porenräume** auf das Wurzelwachstum,
- Einfluss von **Porenraumunterschieden** auf das Wurzelwachstum
- **Regenerationsfähigkeit** von Wurzeln,
- **Wurzeldruck** von Gymnospermen und Angiospermen
- Erstellen eines **Bestimmungsschlüssels** für die schnelle Ermittlung des schadensverursachenden Baumes
- **Sauerstoffversorgung** im Bereich der Rohrverbindungen
- Einfluss des **Rohrwerkstoffs** auf das Wurzelwachstum

5.1 Einfluss der Korngröße

Wie bereits in Kapitel 3.3.2 beschrieben, kann die Wachstumsrichtung von Wurzeln durch den Einsatz von Substraten manipuliert werden. Um diesen Effekt im Kanalbau zu nutzen, können zwei unterschiedliche Maßnahmen getroffen werden. Zum einen können im Bereich des Leitungsgrabens Räume geschaffen werden, in denen Wurzelwachstum erwünscht ist, und zum anderen können in Leitungsnähe Bereiche geschaffen werden, in denen kein Wurzelwachstum möglich ist. Auch die Kombination beider Maßnahmen ist denkbar.

Aus der Beobachtung heraus, dass Wurzeln ein locker verdichtetes Substrat einem stark verdichteten Substrat vorziehen, entstand die Arbeitshypothese, dass es für das Gesamtporenvolumen eines Substrates Grenzwerte geben muss, die das Wurzelwachstum sowohl positiv als auch negativ begrenzen. Zur Überprüfung dieser Annahme wurde ein Versuchsaufbau bestehend aus 32 Pflanzbehältern (jeweils 7,5l Volumen) angesetzt. In den Versuchen wurden insgesamt acht Quarzsand- und Quarzkiesgemische in den Korngrößenbereichen 0,063 – 0,25 mm, 0,125 – 0,4 mm, 0,2 – 0,6 mm, 0,4 - 0,8 mm, 0,7 - 1,2 mm, 1,0 – 2,0 mm, 2,0 – 3,0 mm und 3,0 – 6,0 mm eingesetzt. Pro Versuchsansatz wurden die Substrate jeweils aus zwei unterschiedlichen Körnungen in insgesamt 5 Lagen übereinander in die Pflanzgefäße geschichtet (Schichtdicke jeweils 40mm). Pro Substrat wurden jeweils 8 Pflanzbehälter befüllt (vgl. Tabelle 19).

Tabelle 19: Zusammensetzung der verwendeten „Körnungsmischungen“ (Angaben in mm).

	Korngröße
„Substrat 1“	0,063 – 0,25 und 0,7 – 1,2
„Substrat 2“	0,125 – 0,4 und 1,0 – 2,0
„Substrat 3“	0,2 – 0,6 und 2,0 – 3,0
„Substrat 4“	0,4 – 0,8 und 3,0 – 6,0

Nach dem Befüllen wurden bewurzelte Weidenstecklinge (*Salix spec.*) in die Pflanzgefäße eingesetzt. Anschließend wurde ein automatisches Bewässerungssystem angeschlossen. Zur zusätzlichen Absicherung gegen Austrocknung wurden die Töpfe mit einem Vlies abgedeckt (Abb. 118 A). Versuchsbeginn war der 11.10.2005. Zu diesem Zeitpunkt befanden sich die eingebauten Versuchspflanzen in einem der Vegetationsperiode entsprechendem Zustand und hatten bereits damit begonnen ihr Laub abzuwerfen. Der gute Allgemeinzustand der Pflanzen zeigte sich, neben einem normal ausgebildeten Wurzelwerk, an der reichlichen Ausbildung von Erneuerungsknospen am Spross.

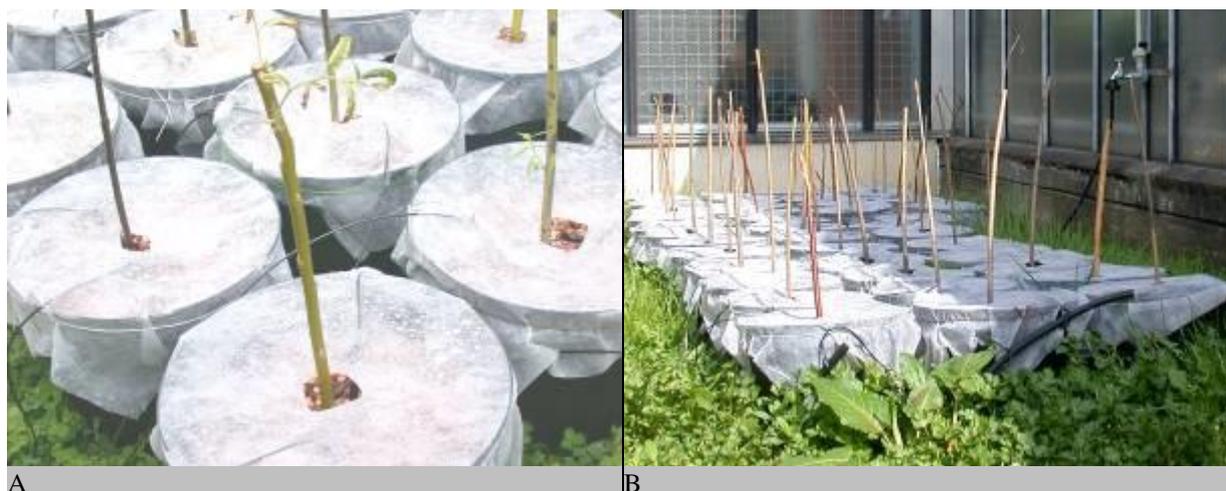


Abb. 113: Untersuchung zum Wurzelwachstum in Substraten unterschiedlicher Korngröße. A Pflanzgefäße zu Beginn der Untersuchung. Zum Schutz vor Austrocknung wurden die Gefäße mit Vlies abgedeckt und mit einer Bewässerungseinrichtung ausgestattet. B. Pflanzgefäße bei Ende der Untersuchung, die Stecklinge hatten ihr Wachstum eingestellt und das Laub verloren.

Trotz der Frosthärte der Weidenstecklinge und der ständigen Kontrolle des Versuchsaufbaus trieben die Pflanzen im darauf folgenden Frühjahr nicht erneut aus. Der Versuch wurde daher am 18.04.2006 abgebrochen (Abb.46 B).

Der Ausbau der Pflanzgefäße zeigte, dass die eingesetzten Weidenstecklinge nur in sehr begrenztem Umfang neue Wurzeln im Substrat gebildet hatten. Die oberirdischen Teile der Pflanzen wiesen deutliche Spuren von Frost-Trocknis auf. Daraus folgt, dass die Ursache für das Scheitern der Versuchsreihe deren Ansatz zu einem, bezogen auf die Vegetationsperiode, ungünstigen Zeitpunkt war. Die Wiederaufnahme dieser Untersuchung wurde daher für das Frühjahr 2007 angesetzt.

5.2 Einfluss der Porenräume auf den Wurzelwuchs

Die beobachtete Barrierewirkung hoch verdichteter Substrate auf wachsende Wurzeln führte zur Arbeitshypothese, Baumwurzeln durch den Einsatz eines entsprechenden Materials von unterirdisch verlegten Leitungen fernzuhalten. Zur tiefergehenden Überprüfung dieser Hypothese wurde das Tonmineral Bentonit eingesetzt. Bentonit besitzt eine so geringe Partikelgröße, dass die für das Wurzelwachstum erforderlichen Porenräume nicht vorkommen. Darüber hinaus ist dieses Material in der Lage, Wasser dauerhaft zu binden. Auf Grund der hohen Saugspannung des Bentonits steht dieses gebundene Wasser Wurzeln in der Regel nicht zur Verfügung. Die dem Bentonit zugesprochenen, bodenverbessernden und damit den Pflanzenwuchs fördernden Eigenschaften beziehen sich auf Bentonit / Erds substrat Mischungen. Sie beruht vor allem auf der Erhöhung der Ionen-Austauschkapazität des Bodens durch die Bildung stabiler Ton/Humus-Komplexe und dem bereits angesprochenen Wasserhaltevermögen des Minerals. In der hier vorgestellten Versuchsreihe wurde das Bentonit in seiner Reinform eingesetzt. Mit dem in Abb. 114 dargestellten Versuchsaufbau sollte das Wuchsverhalten der Wurzeln an der Dichtegrenze Substrat/Bentonit beobachtet werden, um daraus den möglichen Schutz von Rohrleitungen oder Rohrverbindungen besser beurteilen zu können.

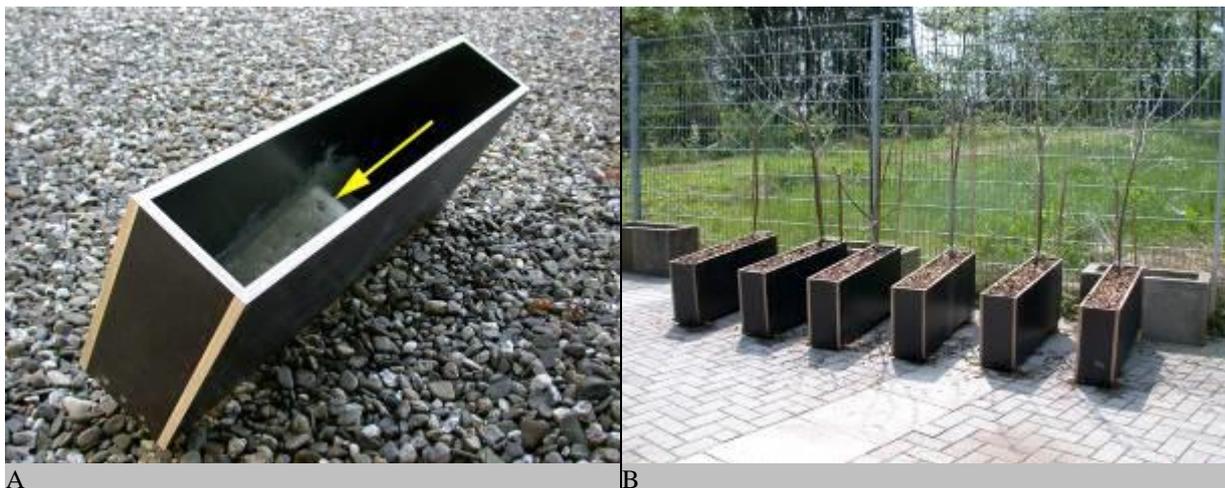


Abb. 114: Untersuchung des Einflusses des Porenraumes auf das Wachstum von Wurzeln. **A** Kulturgefäß aus Sperrholz. **B** Kultur der Versuchspflanzen im Botanischen Garten der Ruhr-Universität Bochum.

Für die Versuche wurden 6 Pflanzkisten aus Fahrzeugbauplatten (19 mm; Birkenfurniersperrholz) mit den Außenmaßen 1000 x 400 x 200 mm (= Volumen ca. 58 Liter) hergestellt. An den Stirnseiten der Behälter wurden bodennah Abflusslöcher eingelassen. Mittig auf den Gefäßböden wurde jeweils ein ca. 150 mm hoher, keilförmiger Hügel aus aufgeschlämmtem Bentonit aufgebracht (vgl. Abb. 114). Vor dem anschließenden Befüllen der Pflanzkisten mit Substrat wurde jeweils an beiden Stirninnenseiten eine Drainageschicht aus Grobkies vor den Abflussöffnungen aufgeschüttet. In die so vorbereiteten Pflanzgefäße wurde jeweils zu einer Seite des Bentonithügels eine mehrjährige, wurzelnackte Pappel (*Populus alba* var. *nivea*) gepflanzt. Zur Erzeugung eines Feuchtigkeitsgradienten, dem die Wurzeln während ihres Wachstums folgen sollten, wurden die bepflanzt Kisten mit einem Gefälle von 15° aufgestellt. Die Versuchsdauer betrug 180 Tage (Mai-Oktober 2006). Insgesamt wurden vier der sechs Pflanzkisten geöffnet, die Standzeit der zwei verbleibenden Behälter wird um eine Vegetationsperiode verlängert.



Abb. 115: Untersuchung des Einflusses des Porenraumes auf das Wachstum von Wurzeln. **A** Geöffnetes Kulturgefäß mit Bodenkörper aus Bentonit. **B** Der Ausbau des Bentonits erfolgte durch Ausspülen mit Leitungswasser. Dabei bleibt der Großteil der Wurzeln ohne Lageveränderungen erhalten.

Zum Ausbau der Pflanzbehälter wurden diese über die Längsseite gekippt und in eine leicht geneigte Position gebracht. Dadurch konnte das plötzliche Absinken der oberen

Substratschichten verhindert werden. Nach der anschließenden Demontage je einer Seitenwand wurde das Bodenprofil sichtbar (vgl. Abb. 115 A), an dem zunächst der Fortschritt des Wurzelwachstums nachvollzogen werden konnte. Durch das behutsame Herausspülen des Bentonits konnte daraufhin das Wuchsverhalten der Wurzeln an der Grenzfläche Substrat/Bentonit beobachtet werden (vgl. Abb. 115 B). An den geöffneten Pflanzkisten wurde sichtbar, dass die Wurzeln dem Feuchtigkeitsgradienten gefolgt waren. Während die Wurzeln der oberen Bodenschichten ungehindert in Längsrichtung des Gefäßes wachsen konnten, trafen die tiefer gelegenen Wurzeln während dessen auf die eingesetzte Barriere aus Bentonit.



Abb. 116: Untersuchung des Einflusses des Porenraumes auf das Wachstum von Wurzeln. **A** Im Bodenkörper aus Bentonit traten Fissuren auf, die zum Teil mit Komposterde gefüllt waren. **B** Aus der Komposterde (Füllung des Kulturgefäßes) waren Wurzeln in das Bentonit gewachsen. **C** und **D** Innerhalb des Bentonits haben sich Wurzeln ausgebreitet (Pfeile).

Der Großteil der Pappelwurzeln zeigte das von ihnen erwartete Verhalten und wuchs an der Grenzfläche Substrat/Bentonit substratseitig am Bentonit entlang (vgl. Abb. 116 A und D). Stellenweise wurden jedoch Wurzeln angetroffen, die bis zu einer Tiefe von ca. 100 mm in das Bentonit eingewachsen waren (vgl. Abb. 116 B und C). Wenngleich ihre Anzahl gemessen an der Gesamtmenge der sich an der Grenzfläche aufhaltenden Wurzeln gering war, so muss an dieser Stelle über die möglichen Ursachen des Einwuchses diskutiert werden. Im Gegensatz zur Vorgehensweise bei einer älteren Untersuchung [67], bei der kein Einwuchs in das Bentonit beobachtet werden konnte, wurde das Bentonit bei dem hier vorgestellten Versuchsaufbau vor

dem Einbau aufgeschlämmt. D.h. das Bentonit wurde mit Hilfe eines Mörtelmischers mit Wasser durchmischt bis es eine plastische Konsistenz hatte. Denkbar ist, dass durch diese Einbauweise das Auftreten von Quellungs- und Schrumpfrissen begünstigt wurde. Diese Fissuren ebneten den Wurzeln den Weg in das Bentonit, wobei durch das Gießwasser eingespültes Substrat das Wurzelwachstum zusätzlich gefördert haben könnte.

Trotz des beobachteten Einwuchses können derzeit keine Aussagen über die maximal mögliche Einwurzelungstiefe in das Tonmineral getroffen werden. Der Ausbau der ausstehenden Versuchscontainer wird zeigen, in wie weit das Bentonit durchwurzelt werden kann und es wird erwartet, dass sich dann exaktere Rückschlüsse auf die Barrierefähigkeit von Bentonit ziehen lassen. In zusätzlichen Versuchsreihen sollte parallel dazu die Wirksamkeit von Pipe-Joint-Umschalungen mit weiteren, zu diesem Zweck geeignet erscheinenden Materialien getestet werden.

5.3 Regenerationsfähigkeit von Wurzeln

Die Beobachtung von Schadensfällen hat gezeigt, dass nicht zwangsläufig der relativ zur Schadensstelle nahestehende Baum, sondern in einigen Fällen das Gehölz, welches zum Zeitpunkt der Rohrverlegung durch die Ausschachtungsarbeiten an seinem Wurzelwerk verletzt wurde, der Schadensverursacher war. Auffällig häufig sind Laubbäume an Schadensfällen beteiligt, während Schäden verursacht durch Wurzeln von Nadelgehölzen vergleichsweise selten auftreten. Die Fähigkeit zur Regeneration von Wurzeln ist bei verschiedenen Baumarten unterschiedlich ausgeprägt. So sind beispielsweise die oberirdischen Teile der Gymnospermen im Allgemeinen sehr viel schlechter in der Lage zu regenerieren als die der Angiospermen. Dies führte zur Arbeitshypothese, dass das Regenerationsvermögen der verschiedenen Baumarten ein Maß für deren „Gefährlichkeit“ darstellen kann.

Zur Überprüfung der hier aufgestellten Hypothese wurden zwei Versuchsreihen mit insgesamt 24 Jungpflanzen angesetzt. Die Testreihe mit Gymnospermen umfasste die Arten *Ginkgo biloba*, *Pinus nigra* & *P. mugo*, *Thuja plicata* und *Taxus baccata*. Die Testreihe mit Angiospermen umfasste die Arten *Ailanthus altissima* und *Acer pyramidalis*.

Bei den Pflanzen wurde jeweils der Wurzelballen halbseitig entfernt (Wurzelrückschnitt, vgl. Abb. 117) und anschließend wieder in die Pflanzgefäße aus Kunststoff mit einem Volumen von 4 Litern eingesetzt. Das Auffüllen der Pflanzgefäße erfolgte mit dem Originalsubstrat. Von jeder Art wurden vier Exemplare auf diese Weise präpariert. Zur Minimierung der Gefahr von Windwurf und zur Verhinderung des Aufheizens der schwarzen Kulturgefäße wurden die so vorbereiteten Pflanzen mitsamt Pflanzgefäßen in den Boden eingelassen. Während der Dauer des Versuches wurden die Pflanzen kontinuierlich bewässert. Der Ausbau der Versuchsreihen erfolgte nach 12 (Gymnospermae) bzw. 10 Monaten (Angiospermae).

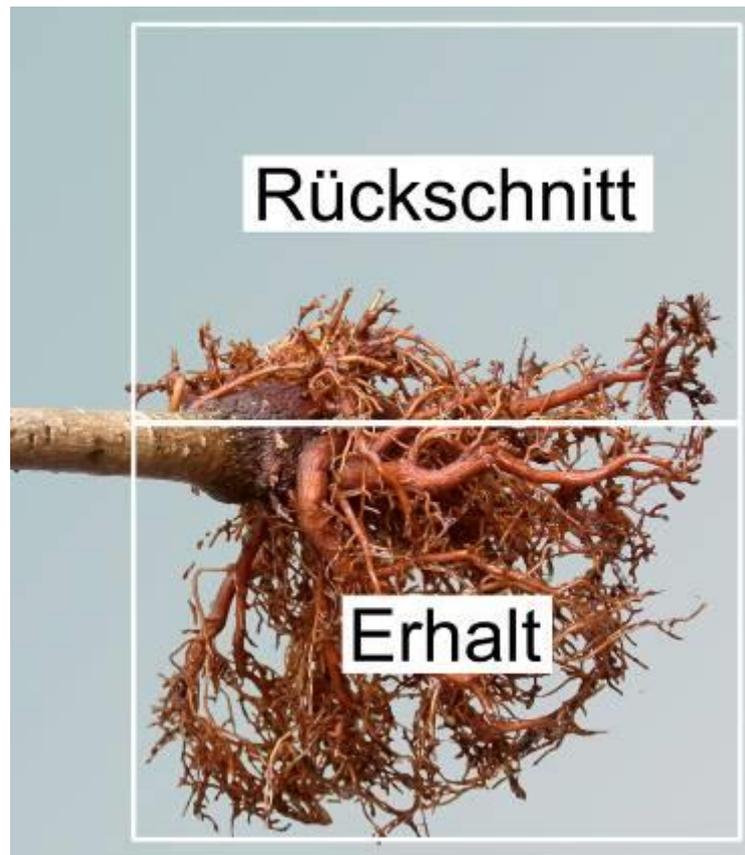


Abb. 117: Halbseitiger Rückschnitt des Wurzelballens zur Untersuchung des Regenerationsverhaltens unterschiedlicher Arten. *Ginkgo Biloba*

Bei Versuchsende befanden sich 22 der 24 eingesetzten Pflanzen in einem sehr guten Zustand. Lediglich jeweils ein Exemplar der Gattung *Pinus* und *Taxus* sind während der Versuchsdauer eingegangen. Die nach der Entnahme aus den Pflanzgefäßen sichtbaren Wurzelballen zeigten einen insgesamt mitunter hohen Durchwurzelungsgrad (Abb. 118 bis Abb. 123). Oberflächlich betrachtet war bei vielen Exemplaren kein Unterschied zwischen den jeweiligen präparierten bzw. nicht präparierten Hälften erkennbar. Erst nach Freispülen der Wurzeln konnten die durch den Wurzelrückschnitt verursachten Effekte untersucht und die Lage der ehemaligen Schnittebene eindeutig nachvollzogen werden (vgl. Abb. 118 bis Abb. 123).



Abb. 118: Untersuchung zur Regeneration der Wurzeln unterschiedlicher Pflanzengruppen. **A** Spitzahorn (*Acer platanoides*). **B** Der Neuaustrieb der Wurzeln von *Acer platanoides* ist deutlich zu erkennen (Pfeile).



Abb. 119: Untersuchung zur Regeneration der Wurzeln unterschiedlicher Pflanzengruppen. **A** *Ailanthus altissima*. **B** Der Neuaustrieb der Wurzeln des Götterbaumes (*Ailanthus altissima*) ist deutlich zu erkennen (Pfeile).



Abb. 120: Untersuchung zur Regeneration der Wurzeln unterschiedlicher Pflanzengruppen. **A** *Ginkgo biloba*. **B** Der Neuaustrieb der Wurzeln ist deutlich zu erkennen (Pfeile).



Abb. 121: Untersuchung zur Regeneration der Wurzeln unterschiedlicher Pflanzengruppen. **A** Lebensbaum *Thuja plicata*. **B** Der Neuaustrieb der Wurzeln ist deutlich zu erkennen (Pfeile).



Abb. 122: Untersuchung zur Regeneration der Wurzeln unterschiedlicher Pflanzengruppen. **A** Kiefer *Pinus spec.* **B** Neuaustrieb der Wurzeln von *Pinus spec.* Der Neuaustrieb ist nur minimal erfolgt. (Pfeil)



Abb. 123: Untersuchung zur Regeneration der Wurzeln unterschiedlicher Pflanzengruppen. **A** Eibe, *Taxus baccata*. **B** Der Neuaustrieb ist nur minimal erfolgt. (Pfeile)

Die Auswertung der Versuchsreihen bezüglich des Regenerationsverhaltens aus Bäumen unterschiedlicher Verwandtschaftsgruppen hat gezeigt, dass die eingesetzten Pflanzen auf den Rückschnitt der Wurzeln unterschiedlich reagiert haben. Ein Teil zeigte ein deutliches Regenerationsvermögen (*Thuja*, *Ginkgo*, *Acer*, *Ailanthus*, vgl (Abb. 118 bis Abb. 121)). Andere Pflanzen zeigten hingegen ein ausgesprochen geringes bzw. kein Regenerationsvermögen (*Taxus*, *Pinus* (Abb. 122 und Abb. 123)). Gemessen an der Anzahl neu gebildeter Wurzeln ergibt sich eine aufsteigende Reihenfolge, angefangen mit *Taxus* und *Pinus* über *Ginkgo* und *Ailanthus* bis hin zu *Acer* und *Thuja*. Die Ursache für dieses unterschiedliche Verhalten ist demnach nicht großgruppenspezifisch, sondern unterliegt den Eigenschaften der jeweiligen

Gattung. Das bei *Thuja* beobachtete größte Regenerationsvermögen, im Vergleich zu den anderen hier getesteten Arten, steht im Einklang mit der Beobachtung, dass Nadelbäume im Gegensatz zu Laubbäumen in der Regel eine extensivere Stockbewurzelung aufweisen. Das bei *Taxus* und *Pinus* beobachtete, fehlende Regenerationsvermögen zeigt aber, dass dieses Verhalten nicht mit dieser Veranlagung zusammenhängt. Die dieser Untersuchung zu Grunde liegende Annahme muss also dahin gehend abgewandelt werden, als dass nicht alle Gymnospermenwurzeln grundsätzlich ein geringeres Regenerationsvermögen aufweisen als Angiospermenwurzeln.

5.4 Wurzeldruck von Gymnospermen und Angiospermen

Im Rahmen von [1] wurde bereits der Wurzeldruck an Erbsenkeimlingen und an Eichenkeimlingen ermittelt. Darauf aufbauend wurden ergänzende Versuche an Keimwurzeln von Nadelbäumen (Gymnospermen) und Laubbäumen (Angiospermen) durchgeführt. Die Versuche sollten, analog zu den Versuchen zur Regenerationsfähigkeit von Wurzeln unterschiedlicher Baumarten (vgl. 5.3), zur Beschreibung der Eigenschaften der Wurzelsysteme von Angiospermen und Gymnospermen beitragen. Aus der Gruppe der Gymnospermen wurden die Messungen an Keimwurzeln von Pinie (*Pinus pinea*) und Araukarien (Chilenische Schmucktanne) (*Araucaria araucana*) sowie aus der Gruppe der Angiospermen an Keimwurzeln von Eichen (*Quercus robur*) und Scheinakazien (*Robinia pseudoacacia*) durchgeführt.

Die in die kreisförmigen Löcher der Druckplatten aus Gips eingesetzten Keimlinge hatten Keimwurzeln einer Länge von 12 bis 25 mm. Die Wurzelspitzen wurden so in den Beginn der kanalförmigen Aussparungen gesetzt, dass ihnen für ihr Weiterwachsen nur der konische Kanal zur Verfügung stand (Abb. 124 A). Die Wurzeln können durch den engen Kontakt der auf einer Acryl-Glas-Platte liegenden Druckfolie mit der Druckplatte den in der Platte vorhandenen Kanal nicht verlassen (Abb. 124 B). Die weiterführenden Aussparungen sind konisch zulaufend geformt, so dass im Verlauf des fortschreitenden Wachstums der Wurzelspitze Druck gegen die Druckfolie gemessen werden kann (vgl. Abb. 124)

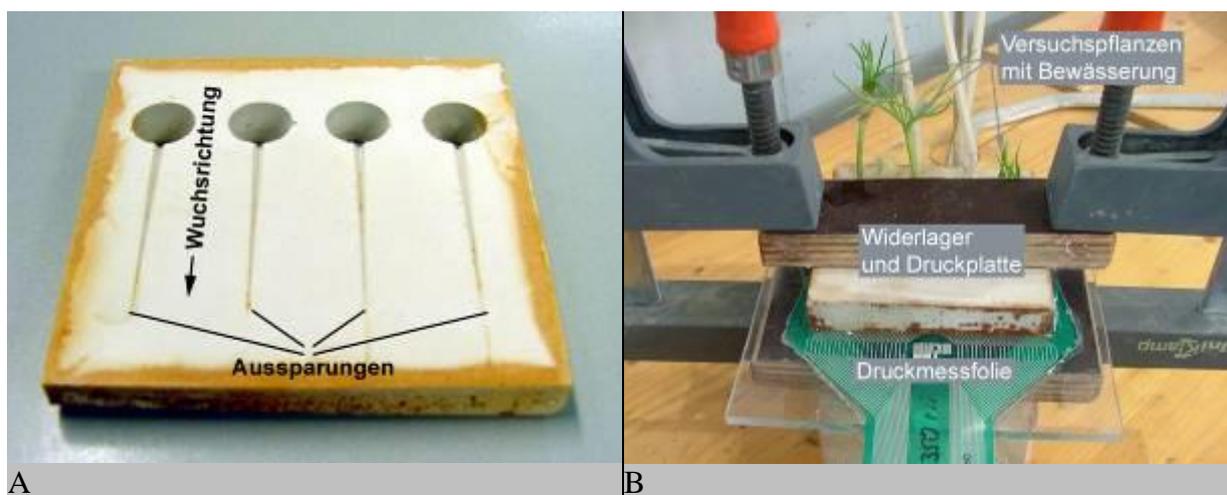


Abb. 124: Versuchsaufbau für Druckmessungen an Wurzeln. **A** Druckplatte aus Gips. Die braune Färbung wird durch Oxidation der Gussform ausgelöst, die als äußere Begrenzung bei Herstellung der Platten eingesetzt wurde und hat keine Auswirkungen auf den Verlauf der Versuche. **B** Versuchsaufbau zur Messung des Wurzeldruckes.

Für die direkte Erfassung des von der Wurzel aufgebrachten Drucks wird die Druckfolie mit einer Druckplatte bedeckt und als Widerlager fest gespannt. Der Druck, den die Wurzeln während ihres Wachstums aufbringen, wird von der Druckfolie erfasst und die entstehenden Spannungen mit Hilfe eines Messsystems räumlich aufgelöst. Die Messungen finden im Bereich einer Fläche von 84 x 84 mm statt. Die eingesetzten Druckfolien mit einer Dicke von ca. 0,3 mm haben nach Herstellerangaben einen Messbereich bis 350 PSI und lassen somit Messungen bis 24 bar zu. Die Daten werden in einer Matrix von 44x44 Messpunkten aufgenommen und visualisiert. Die Ergebnisse der Druckmessungen für Pinie (Abb. 125), Araucarie (Abb. 126), Eiche (Abb. 127) und Robinie (Abb. 128) sind im folgenden zusammengefasst dargestellt. Die Druckverläufe entlang der eingesetzten Druckfolien sind in Abb. 124 bis Abb. 127 dargestellt.

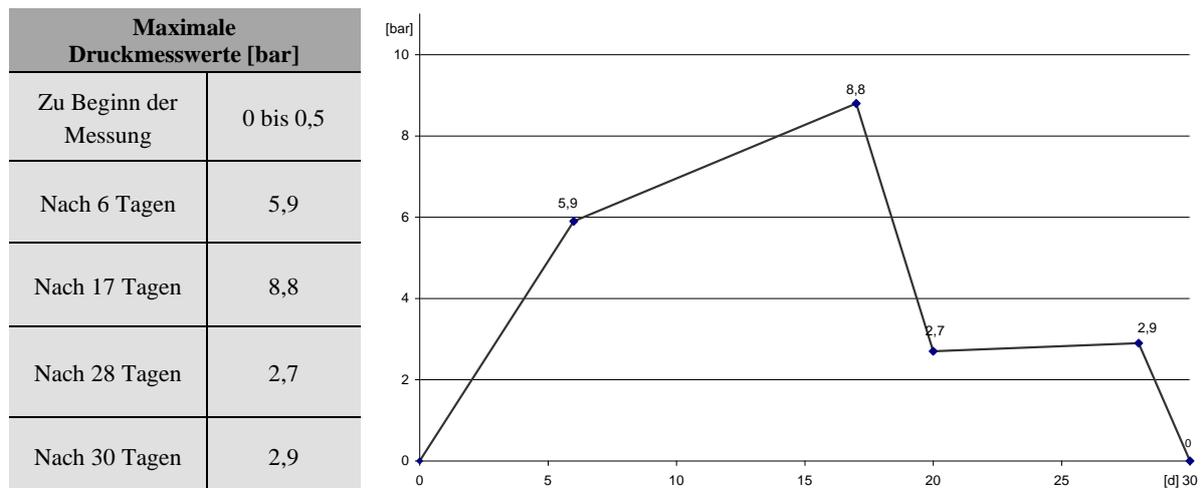


Abb. 125: Übersicht der maximalen Druckmesswerte im zeitlichen Verlauf. Pinus Pinea.

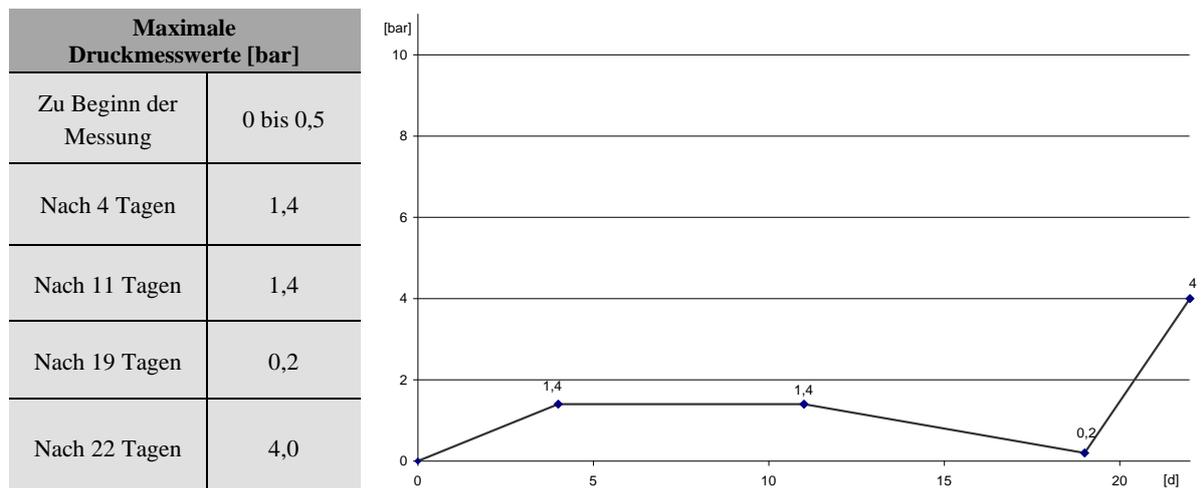


Abb. 126: Übersicht der maximalen Druckmesswerte im zeitlichen Verlauf. Araucaria araucana.

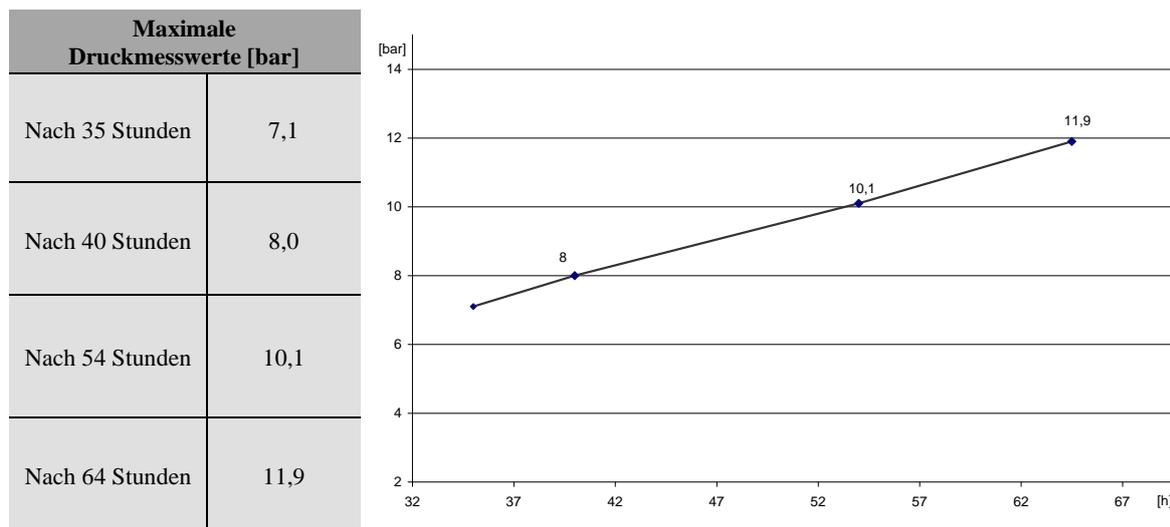


Abb. 127: Übersicht der maximalen Druckmesswerte im zeitlichen Verlauf. *Quercus robur*.

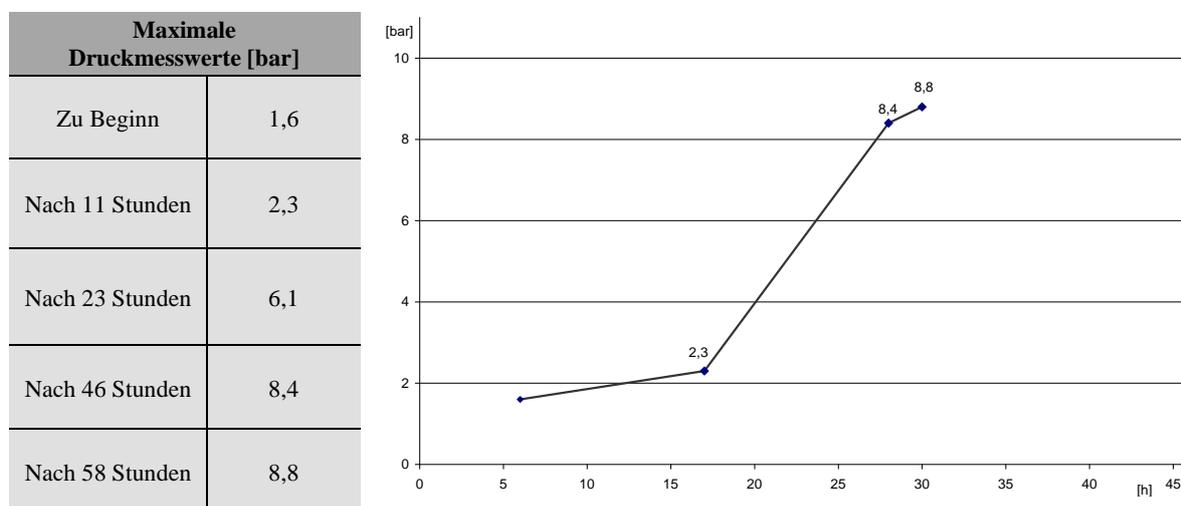


Abb. 128: Übersicht der maximalen Druckmesswerte im zeitlichen Verlauf. *Robinia pseudoacacia*.

Grundsätzlich konnte bei allen vier Baumarten Wurzeldruck in radialer Richtung gemessen werden. An den Keimwurzeln von Pinien (*Pinus Pinea*) wurde ein maximaler Druck in Höhe von 8,8 bar gemessen (vgl. Abb. 125). Der maximale Wurzeldruck an den Keimwurzeln von Araucarie (*Araucaria araucana*) (vgl. Abb. 126), als zweiter Vertreter der Gruppe der Gymnospermen, betrug 4,0 bar. Für die beiden Vertreter der Angiospermen wurden folgende maximalen Wurzeldrücke gemessen: Eiche (*Quercus robur*) 11,9 bar (vgl. Abb. 127) und Robinie (*Robinia pseudoacacia*) 8,8 bar. (vgl. Abb. 128). In ihrer Tendenz erscheinen die Wurzeldrücke der Keimwurzeln von Gymnospermen kleiner zu sein als die Wurzeldrücke von Keimwurzeln der Angiospermen. Dies kann als ein Hinweis gewertet werden, warum die Wurzeln von Gymnospermen seltener in Abwasserkanäle einwachsen als die Wurzeln von Angiospermen.

Grundsätzlich stellen die untersuchten Wurzeln Primärwurzeln dar. Diese enthalten nur geringe Anteile verholzten Gewebes. Es ist denkbar, dass bei einer vergleichbaren Messung an verholzten, mehrjährigen Wurzeln bei Auftreten von Quellungsvorgängen höhere Messwerte aufgenommen werden können.

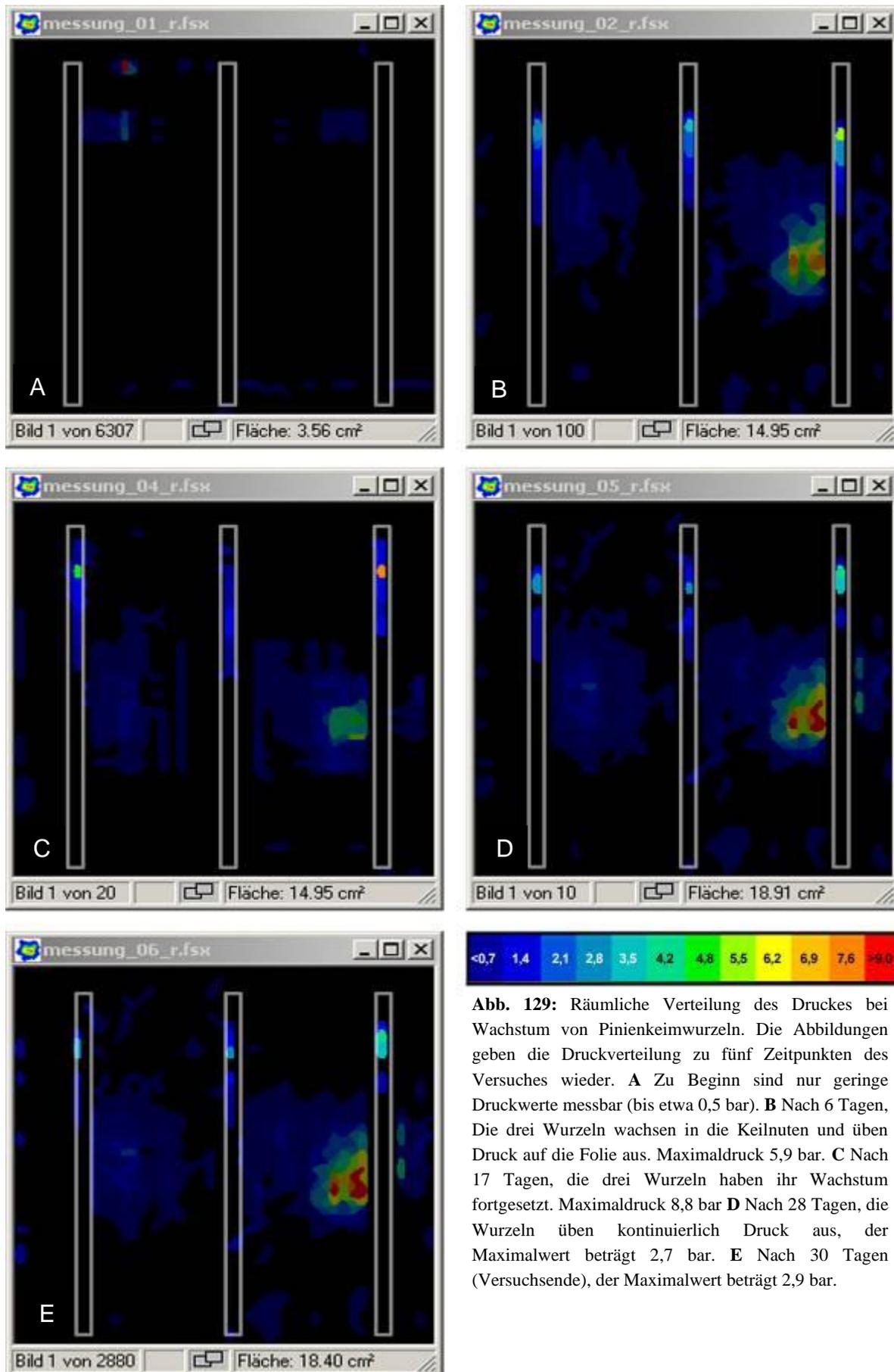


Abb. 129: Räumliche Verteilung des Druckes bei Wachstum von Pinienkeimwurzeln. Die Abbildungen geben die Druckverteilung zu fünf Zeitpunkten des Versuches wieder. **A** Zu Beginn sind nur geringe Druckwerte messbar (bis etwa 0,5 bar). **B** Nach 6 Tagen, Die drei Wurzeln wachsen in die Keilnuten und üben Druck auf die Folie aus. Maximaldruck 5,9 bar. **C** Nach 17 Tagen, die drei Wurzeln haben ihr Wachstum fortgesetzt. Maximaldruck 8,8 bar **D** Nach 28 Tagen, die Wurzeln üben kontinuierlich Druck aus, der Maximalwert beträgt 2,7 bar. **E** Nach 30 Tagen (Versuchsende), der Maximalwert beträgt 2,9 bar.

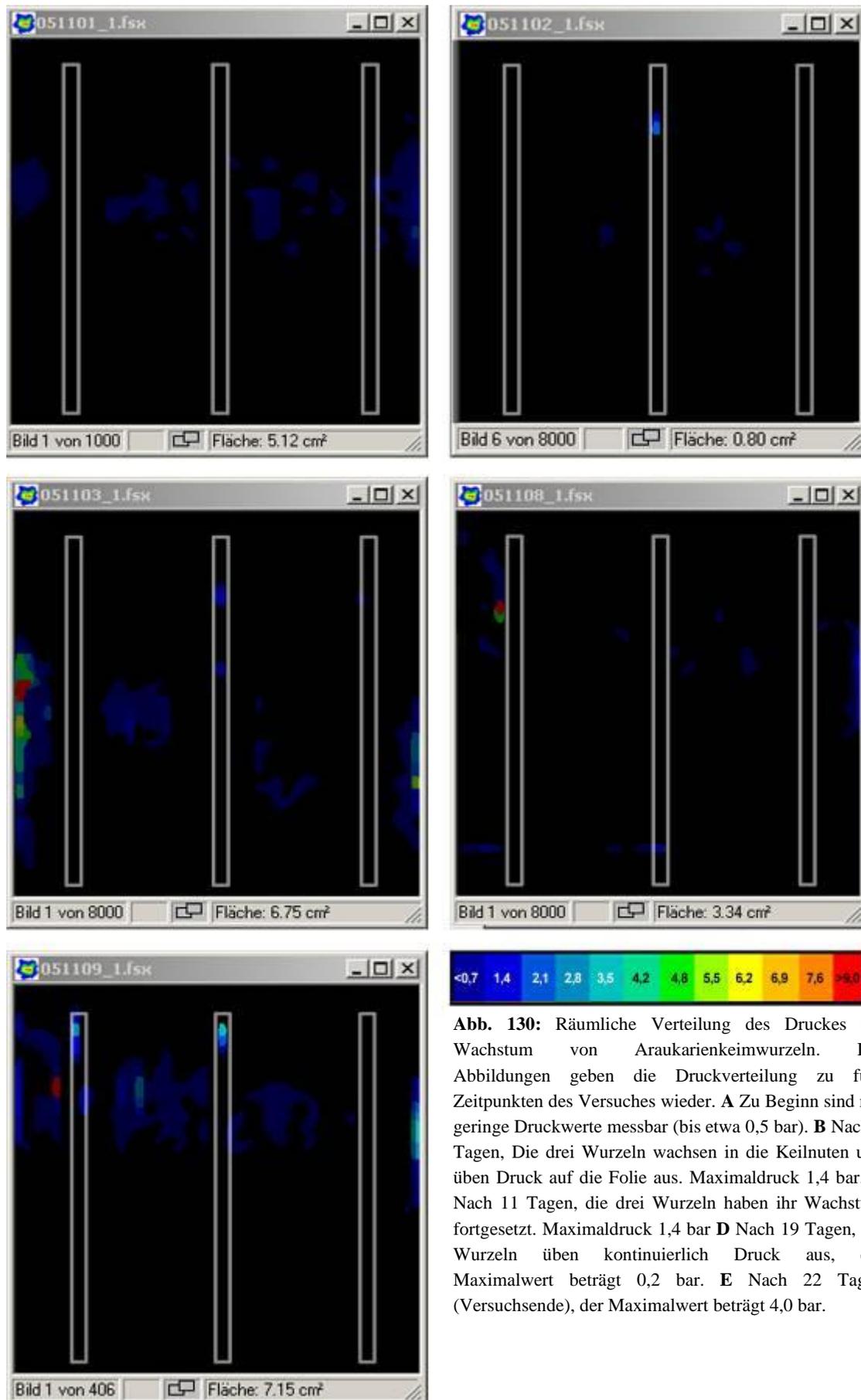


Abb. 130: Räumliche Verteilung des Druckes bei Wachstum von Araukarienkeimwurzeln. Die Abbildungen geben die Druckverteilung zu fünf Zeitpunkten des Versuches wieder. **A** Zu Beginn sind nur geringe Druckwerte messbar (bis etwa 0,5 bar). **B** Nach 4 Tagen, Die drei Wurzeln wachsen in die Keilnuten und üben Druck auf die Folie aus. Maximaldruck 1,4 bar. **C** Nach 11 Tagen, die drei Wurzeln haben ihr Wachstum fortgesetzt. Maximaldruck 1,4 bar **D** Nach 19 Tagen, die Wurzeln üben kontinuierlich Druck aus, der Maximalwert beträgt 0,2 bar. **E** Nach 22 Tagen (Versuchsende), der Maximalwert beträgt 4,0 bar.

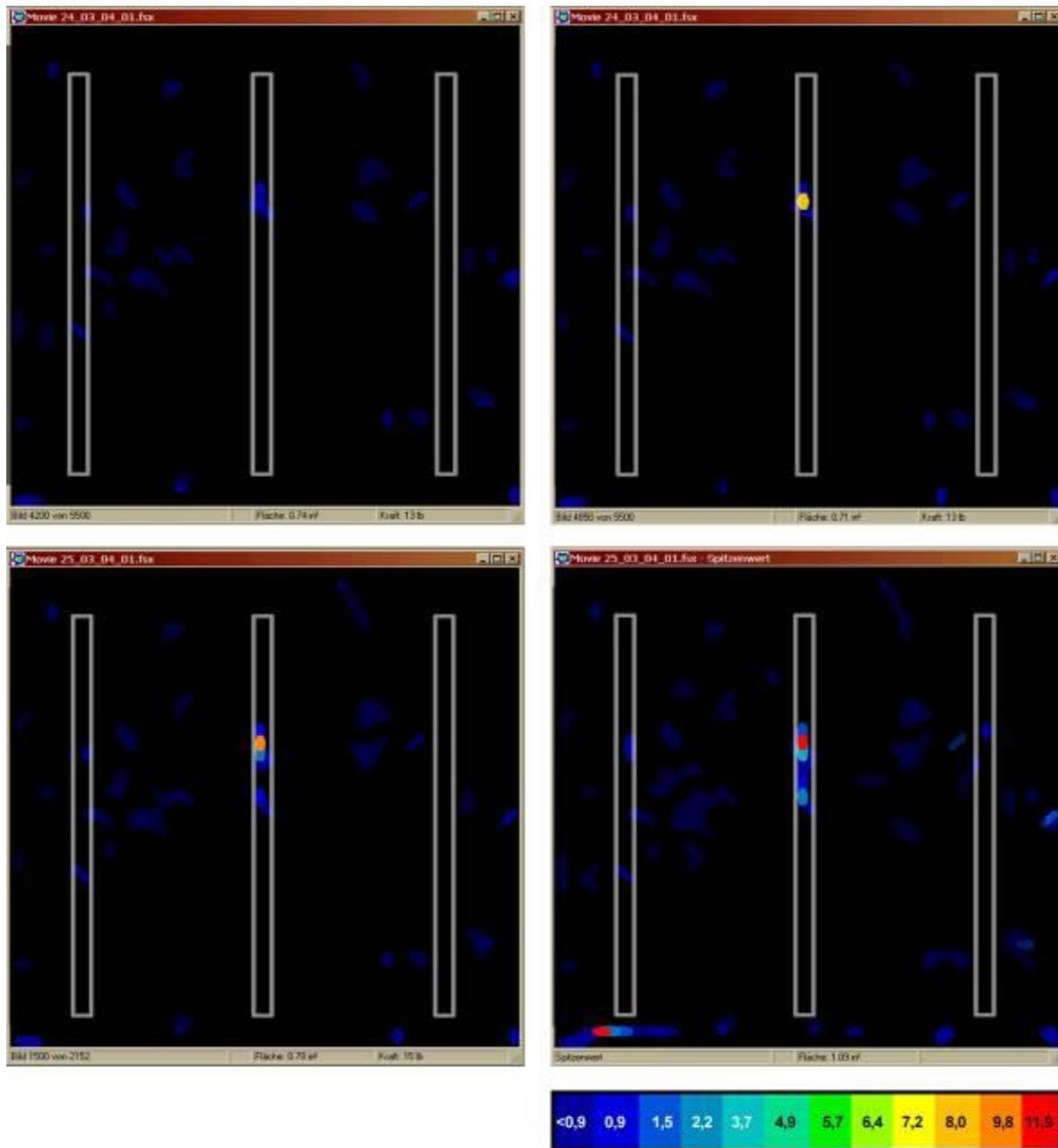


Abb. 131: Räumliche Verteilung des Druckes bei Wachstum von Eichenkeimwurzeln. Die Abbildungen geben die Druckverteilung zu vier Zeitpunkten des Versuches wieder. **A** Nach 35 Stunden sind Druckwerte von 7,1 bar messbar. **B** Nach 35 Stunden wurden 8,0 bar nachgewiesen. **C** Nach 54 Stunden, die Wurzeln haben ihr Wachstum fortgesetzt. Maximaldruck 10,1 bar **D** Nach 64 Stunden: Die Wurzeln üben kontinuierlich Druck aus, der Maximalwert beträgt 11,9 bar. (Versuchsende).

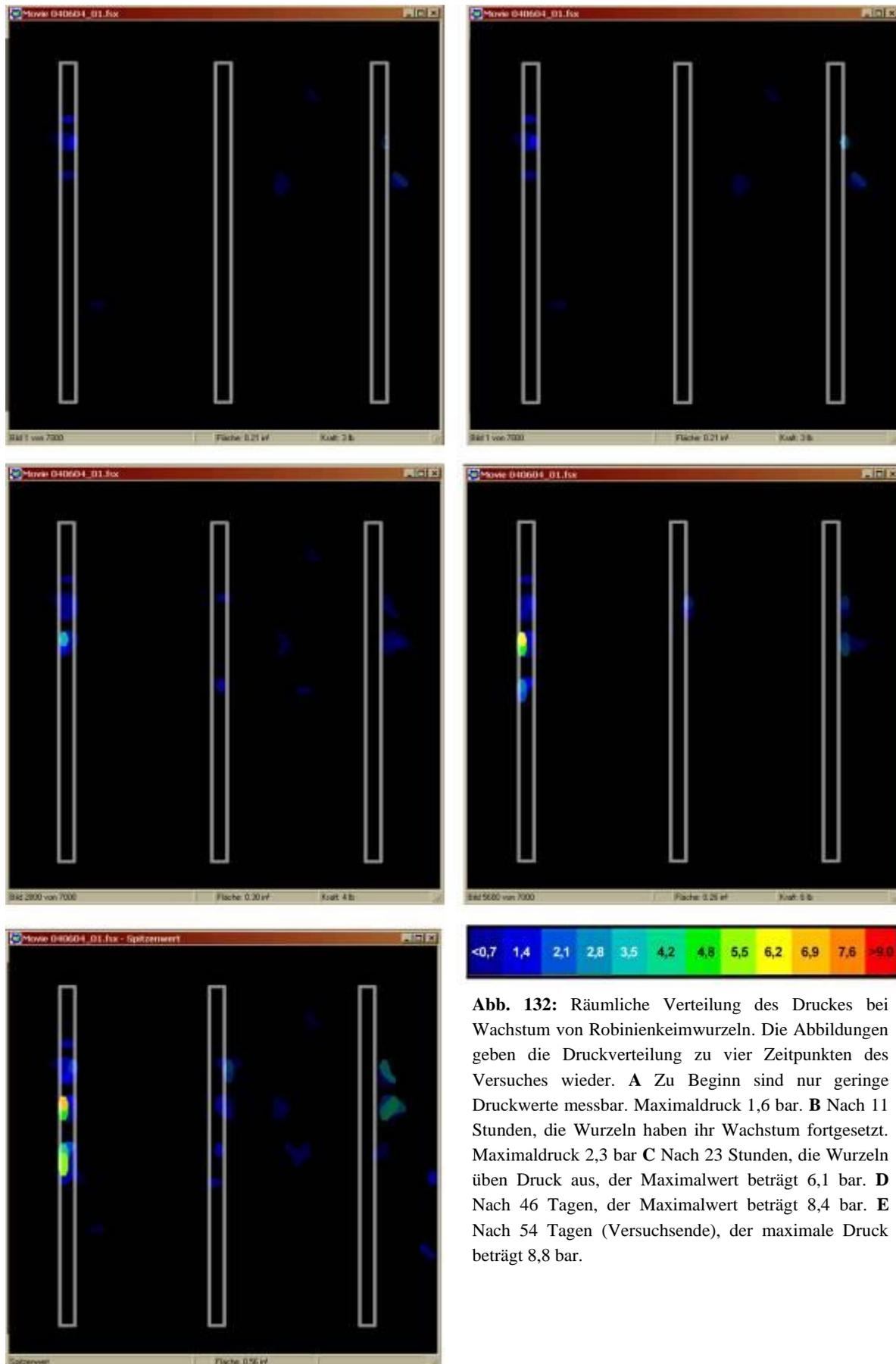


Abb. 132: Räumliche Verteilung des Druckes bei Wachstum von Robinienkeimwurzeln. Die Abbildungen geben die Druckverteilung zu vier Zeitpunkten des Versuches wieder. **A** Zu Beginn sind nur geringe Druckwerte messbar. Maximaldruck 1,6 bar. **B** Nach 11 Stunden, die Wurzeln haben ihr Wachstum fortgesetzt. Maximaldruck 2,3 bar **C** Nach 23 Stunden, die Wurzeln üben Druck aus, der Maximalwert beträgt 6,1 bar. **D** Nach 46 Tagen, der Maximalwert beträgt 8,4 bar. **E** Nach 54 Tagen (Versuchsende), der maximale Druck beträgt 8,8 bar.

5.5 Erstellung eines Bestimmungsschlüssels und Erweiterung der bestehenden anatomischen Datenbank

Im Rahmen von Schadensfällen in Abwasserleitungen durch einwachsende Wurzeln ist in der Regel der Schadensverursacher, das heißt der Baum bzw. der Besitzer des Baumes für den entstandenen Schaden verantwortlich. Die Identifizierung des Schaden verursachenden Baumes kann anhand von aus dem Kanal entnommenen Wurzeln erfolgen.

Pflanzen lassen sich bereits mit dem bloßen Auge anhand verschiedener vegetativer und generativer Merkmale unterscheiden. Auch Wurzeln bieten individuelle anatomische Merkmale, die zur sicheren Identifizierung einer Art ausreichen. In der Literatur finden sich allerdings nur wenige Ansätze zur Differenzierung von Baumarten anhand ihrer Wurzelanatomie. Die publizierten Angaben sind bei der Identifizierung von Wurzelquerschnitten nützlich, reichen aber zur sicheren Bestimmung nicht aus. Eigene Beobachtungen an Wurzelquerschnitten und der Vergleich mit Angaben in der Literatur haben gezeigt, dass die Wurzelanatomie verschiedener Individuen ein und derselben Art mitunter stark variieren kann. Insbesondere Umwelteinflüsse wie Licht, Wärme, Wasser, Luft, Nährstoffe und das umgebende Substrat wirken modifizierend auf die Wurzelanatomie und können zu unterschiedlichen Kontinuitäten bzw. zum Wegfall einiger Merkmale führen. Entscheidend ist aber auch, in welcher Entfernung von der Wurzelspitze der Schnitt erfolgt. Bei einem Schnitt durch die Wurzel sind deshalb nicht immer alle bestimmungsrelevanten Merkmale vorhanden.

Bei der Klärung von Schadensfällen liegen oft nur geringe Mengen an geeignetem Wurzelmaterial vor, zudem sind weitere Proben meist nicht zu beschaffen. Beide Umstände unterstreichen die Notwendigkeit eines Bestimmungsschlüssels, mit dessen Hilfe eine einfache und sichere Identifikation der gesuchten Baumart möglich ist. Im Rahmen einer Diplomarbeit, angefertigt am Lehrstuhl für Spezielle Botanik der Ruhr-Universität Bochum, wurde daher ein Bestimmungsschlüssel erstellt, der die unterschiedliche Anatomie von Wurzeln in primären und sekundären Entwicklungsstadien berücksichtigt (vgl. [68]). Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung umfasste dieser neun, häufig in Stadtgebieten anzutreffende Baumarten. In der vorliegenden Untersuchung wurde dieser um die wurzelanatomischen Merkmale von weiteren dreizehn Baumarten erweitert, so dass jetzt ein Bestimmungsschlüssel für insgesamt 22 Baumarten vorliegt (vgl. Tabelle 20). Das Pflanzenmaterial stammt aus dem Botanischen Garten der Ruhr-Universität Bochum. Die Proben wurden entsprechend den verschiedenen Untersuchungsmethoden aufgearbeitet und anatomische Merkmale an Schnitten von mindestens fünf verschiedenen Wurzelstücken pro Art erfasst. Wo es möglich war, wurden Proben von verschiedenen Individuen genommen. Zusätzlich wurde das Material am Rasterelektronenmikroskop untersucht.

Tabelle 20: Liste der 22 untersuchten Baumarten.

Angiospermae („Laubbäume“)	Gymnospermae („Nadelgehölze“)
☐ <i>Acer pseudoplatanus</i> (Bergahorn)	☐ <i>Ginkgo biloba</i> (Fächerblattbaum)
☐ <i>Aesculus octandra</i> (Gelbe Rosskanstanie)	☐ <i>Larix decidua</i> (Europäische Lärche)
☐ <i>Coryllus colurna</i> (Baumhasel)	☐ <i>Taxus baccata</i> (Europäische Eibe)
☐ <i>Platanus orientalis</i> (Orient-Platane)	
☐ <i>Quercus robur</i> (Stieleiche)	
☐ <i>Quercus rubra</i> (Rot-Eiche)	
☐ <i>Robinia pseudoacacia</i> (Robinie)	
☐ <i>Tilia cordata</i> (Winterlinde)	
☐ <i>Acer campestre</i> (Feldahorn)	
☐ <i>Ailanthus altissima</i> (Götterbaum)	
☐ <i>Betula pendula</i> (Hängebirke)	
☐ <i>Catalpa bignonioides</i> (Trompetenbaum)	
☐ <i>Gleditsia triacanthos</i> (Amerikanische Gleditschie)	
☐ <i>Juglans regia</i> (Walnussbaum)	
☐ <i>Liquidambar styraciflua</i> (Amberbaum)	
☐ <i>Liriodendron tulipifera</i> (Tulpenbaum)	
☐ <i>Magnolia tripetala</i> (Schirmmagnolie)	
☐ <i>Salix caprea</i> (Salweide)	
☐ <i>Sorbus aucuparia</i> (Vogelbeere)	

Die Anatomie der Untersuchungsobjekte wurde zunächst detailliert beschrieben. Anschließend wurde aus den gewonnenen Daten ein Bestimmungsschlüssel für Wurzelquerschnitte in primären und sekundären Entwicklungszuständen sowie für Längsschnitte sekundärer Entwicklungsstadien erstellt. Grundlage für die Bestimmung ist die Kombination anatomischer Merkmale der unterschiedlichen Wurzelgewebe (vgl. Abb. 133 A und B). Zum besseren Verständnis soll an dieser Stelle der Aufbau einer Wurzel im primären und sekundären Entwicklungsstadium erläutert werden.

Die primäre Angiospermenwurzel ist von einer Epidermis (Rhizodermis) umgeben. Es folgt eine Exodermis und das Rindenparenchym. Sehr häufig kann eine Außenrinde von einer Innenrinde unterschieden werden. Die Endodermis bildet den inneren Abschluss der Rinde. Nach innen folgt der Zentralzylinder mit dem Perikambium (Perizykel) und den darin

eingebetteten Leitbündeln, welche radiär angeordnet sind. Die Xylemprimanen erzeugen zunächst Tracheiden, die sich zu Tracheen entwickeln können. Die Phloemelemente alternieren mit den Xylemelementen (vgl. Abb. 133 A).

Im sekundären Dickenwachstum ist die Angiospermenwurzel von einem perikambialen, mehrschichtigen Abschlussgewebe (Periderm) umgeben. Dieses gliedert sich (von außen nach innen) in das Phellem, das Phellogen und das Phelloderm. Darauf folgt der Perizykel, der Bereich des sekundären Phloems und das Kambium. Auf das Kambium folgt der Holzkörper der Wurzel (sekundäres Xylem). Es baut sich, wie das sekundäre Phloem, aus einer Vielzahl von Zellen unterschiedlicher Funktionen auf (vgl. Abb. 133 B).

Die gewonnenen Daten wurden zur Erstellung eines konventionellen und eines digitalen Bestimmungsschlüssels genutzt. Bei der Erstellung des digitalen Bestimmungsschlüssels kam eine spezielle Software zur Verarbeitung deskriptiver Daten zum Einsatz (DELTA; Division of Entomology Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation). Mit ihrer Hilfe kann beispielsweise ein vorhandener Datensatz mit weiteren Informationen, z.B. Abbildungen ergänzt werden. Zur Darstellung des Bestimmungsschlüssels kann der „DELTA-Editor“ Dateien in speziellen Formaten generieren, so dass diese in konventioneller Form vorliegen (RTF-Format) oder auch zur interaktiven Bestimmung genutzt werden können.

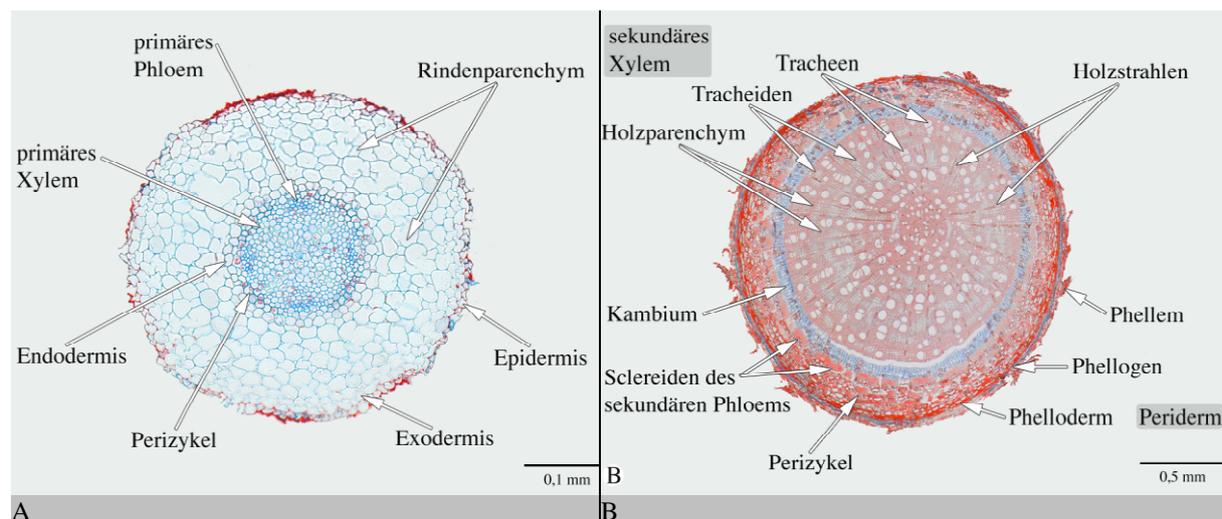


Abb. 133: Querschnitte von Angiospermenwurzeln. **A** Primärer Zustand. **B** Nach Eintreten des Sekundären Dickenwachstums.

Die Ergebnisse zeigen, dass auch die Leitgefäße im Holzkörper der Wurzeln über diagnostisch verwertbare Merkmale verfügen. Die Erweiterung des Bestimmungsschlüssels um diese Angaben erleichtert somit die Bestimmung der gesuchten Baumart anhand von Wurzelfragmenten bzw. stark beschädigten Wurzelteilen, wie sie aus dem Kontakt der Wurzeln mit stark belasteten Abwässern hervorgehen können. Erstmals wurden die angefertigten Wurzelquerschnitte vermessen. Diese zusätzlichen Daten vereinfachen die Bestimmung nahe verwandter Arten.

Zum jetzigen Zeitpunkt liegt der Bestimmungsschlüssel in drei miteinander kombinierbaren Teilen vor. Die Daten sind zentral abrufbar und können bei Bedarf jederzeit eingesetzt werden.

5.6 Sauerstoffversorgung im Bereich der Rohrverbindungen

Die Versiegelung von Flächen in der städtischen Umgebung hat oftmals eine Verminderung des Gasaustausches und insbesondere des Eintrages von Sauerstoff in den Boden zur Folge. Wurzeln sind, 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. Durch Verdichtung wird der Porenraum verringert. Dadurch wird die Menge an verfügbarem Sauerstoff geringer. Geringe Sauerstoffgehalte in der Bodenluft werden als Auslöser für Wachstumsdepression beschrieben. Auch ein Absterben von Wurzeln konnte beobachtet werden. (vgl. [44])

Die im Rahmen von [1] durchgeführten Aufgrabungen zeigten, dass Wurzeln insbesondere im Leitungsgraben von Ver- und Entsorgungsleitungen sowie entlang der Rohre und im Bereich der Rohrverbindungen vermehrt auftraten. Diese und weitere Beobachtungen führten zu dem Schluss, dass die Bedingungen in Leitungsgräben den Wurzeln einen optimaleren Lebensraum bieten, als der anstehende Boden und führten zur Formulierung folgender Modelle, die das Wurzelwachstum in Leitungsgräben beschreiben (vgl. [1]):

- Leckmodell
- Dichtefallenmodell
- Sauerstoffmodell
- Kombinationsmodell

Mit dem Leckmodell wird die in einigen deutschen Normen (z.B. DIN 4034 [69]) zugrunde gelegte Hypothese beschrieben, dass Wurzeln nur in undichte Abwasserleitungen und Kanäle einwachsen und insbesondere austretendes Abwasser das Wachstum von Wurzeln in Richtung der Undichtigkeit lenkt. Undichtigkeiten sind sicherlich als ein Grund zu nennen, dass Wurzeln in Abwasserleitungen einwachsen.

Aufgrund der durchgeführten Bodenuntersuchungen sowie der Betrachtung von Rohrverbindungsbereichen wurde weiterhin das Dichtefallenmodell entwickelt. Die Elastizität der Calyptra (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. Die Wurzeln werden somit in Bereichen mit geringerer Verdichtung gefangen.

Während das Leckmodell in der Fachwelt als unbestritten gilt und das Dichtefallenmodell aufgrund von Laborversuchen und Insitu-Untersuchungen bestätigt werden konnte, fehlen für die Verifizierung des Sauerstoffmodells gesicherte Erkenntnisse. Fraglich ist insbesondere auf welche Weise und in welchen Mengen Sauerstoff in die Leitungsgräben gelangt. Die folgenden, vereinfachten Diffusionswege sind dabei denkbar:

- Durch den anstehenden Boden oder die Überschüttung bis in die Leitungszone (vgl. Abb. 134, Ziffer 1)
- Entlang der Oberflächen von Schächten und Rohren bzw. durch das Bettungsmaterial von Schächten und Rohren (vgl. Abb. 134, Ziffer 2)
- Durch den Rohrwerkstoff bzw. die Rohrverbindung (vgl. Abb. 134), Ziffer 3)

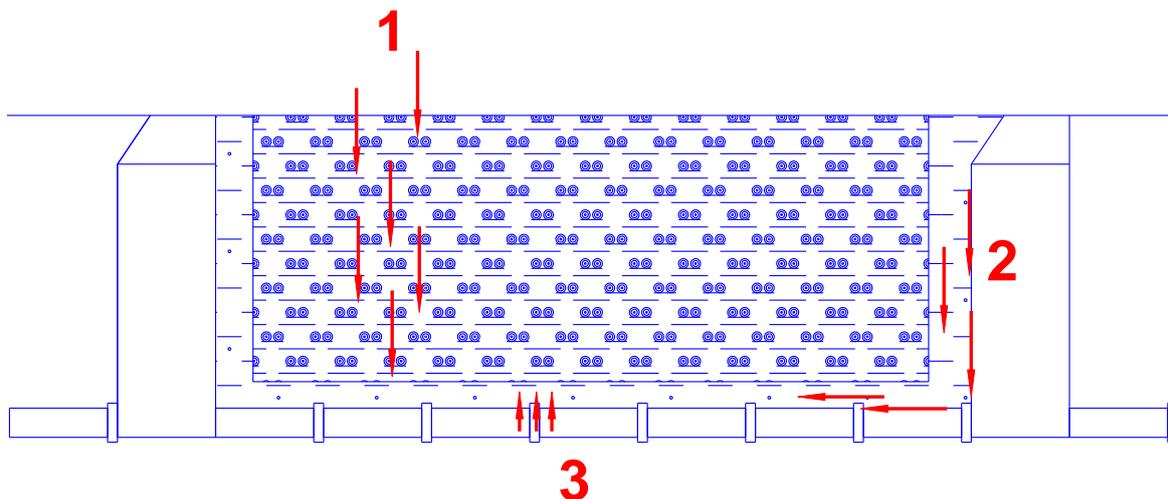


Abb. 134: Mögliche Luft-Diffusionswege in der Leitungszone. **1** Diffusion durch die Bodenoberfläche und den gesamten Bodenkörper. **2** Diffusion entlang des Bettungsmaterials von Schächten bis zum Bettungsmaterial der betreffenden Leitungen. Von dort ist eine Ausbreitung durch Diffusion entlang des Leitungsverlaufes denkbar. **3** Abhängig von Rohrwerkstoff bzw. dem Zustand der Leitung ist Gas-Permeation durch die Wandung der Leitung in das Bettungsmaterial der Leitung hinein möglich.

Die Versorgung der Wurzeln durch Diffusion entlang der Wege 1 und 2 hängt von den Bodeneigenschaften des anstehenden Bodens sowie des Bodens im Leitungsgraben, der Versiegelung der Oberfläche etc. ab. Die Diffusionsintensität durch die Rohrleitungen hängt dagegen vom Rohrdesign ab. Hier haben der Rohrwerkstoff, der Dichtungswerkstoff sowie die Rohroberflächen und –geometrien einen Einfluss.

Mögliche Hinweise für die unterschiedliche Sauerstoffversorgungen im Bereich von Rohrverbindungen können Unterschiede im Wuchsverhalten von Wurzeln im Bereich von Rohrverbindungen sein.

Vor diesem Hintergrund ergibt sich folgendes Arbeitsprogramm:

- 1) Abschätzung des Sauerstoffbedarfs von Wurzeln im Boden
- 2) Ermittlung der Diffusionsraten durch unterschiedliche Oberflächen (versiegelt, unversiegelt), durch unterschiedliche Böden bzw. Substrate
- 3) Einfluss von Bauteilen wie Schächte und Rohrleitungen auf den Sauerstoffeintrag in den Rohrgraben
- 4) Ermittlung der Diffusionsraten von Sauerstoff durch unterschiedliche Rohrwerkstoffe bzw. Rohrverbindungen

Eine erste Umfrage bei Forschungsinstituten, Universitäten, Fachhochschulen und Prüfinstituten zeigte, dass bisher keine Versuchseinrichtungen zu diesem Zweck entwickelt

worden sind. Lediglich durch den TÜV Südwest wurde ein Untersuchungs- und Prüfverfahren zur Klärung des Zusammenhangs zwischen Alterung und Undichtigkeit bei Dichtungswerkstoffen und –systemen in industriellen und öffentlichen Abwasserrohrleitungen entwickelt [70]. Die Gasdichtheit der Verbindungen stand dabei allerdings nicht im Zentrum der Betrachtung, sondern die Gaspermeation im Vorfeld eines Versagens durch Flüssigkeitsaustritt. Die Prüfeinrichtungen wurde nach Abschluss des Vorhabens komplett demontiert.

5.7 Einfluss des Rohrwerkstoffs auf das Wurzelwachstum

Die äußere Oberfläche von Leitungen hat einen Einfluss auf das Wachstum von Wurzeln. Abhängig von der Struktur des Bettungs- bzw. Verfüllmaterials können hier an der Grenze zur Leitungsoberfläche Räume auftreten, die eine Ausbreitung von Wurzeln in der Nähe von Leitungen ermöglichen. Bei Aufgrabungen wurden Wurzeln zum Teil im Scheitelbereich direkt auf der Oberflächen von Abwasserleitungen nachgewiesen (vgl. Abb. 135 A und B), [1].



Abb. 135: In einigen Fällen geht von der Oberfläche einer Leitung ein so starker Reiz aus, dass Wurzeln in direktem Kontakt zur Leitungsoberfläche wachsen **A:** Das Beispiel zeigt eine unglasierte Steinzeugleitung mit Überschiebkupplungen. Aus den umgebenden Bodenbereichen sind einige Baumwurzeln in das Bettungs- bzw. Verfüllmaterial der Abwasserleitung gewachsen und befinden sich im Bereich des Scheitels eng anliegend auf der Leitungsoberfläche. **B** Wurzeln haben im direkten Kontakt mit der äußeren Leitungsoberfläche der unglasierten Leitung ihr Wachstum fortgesetzt.

Die Auswertung der Outside-In-Versuche (vgl. Kapitel 4.3) hat ergeben, dass das Wuchsverhalten der Wurzeln durch die geometrischen Eigenschaften der Leitungskomponenten

wie beispielsweise Ringspalten und Ringräume beeinflusst wird. Wurzeln weichen unabhängig vom betrachteten Rohrwerkstoff von der eingeschlagenen Wuchsrichtung ab und wachsen am Rohrmaterial oder am Dichtelement weiter (Abb. 95 C und D, Abb. 96 E und F, wie auch Abb. 97 A, B und F). Im Rahmen der durchgeführten Versuche konnte direkte Einflüsse der Oberflächeneigenschaften unterschiedlicher Rohrwerkstoffe wie beispielsweise Rauigkeit, Porosität etc. auf das Wurzelwachstum nicht nachgewiesen werden.

6 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 des abgeschlossenen Forschungsvorhabens „Wurzeleinwuchs in Abwasserleitungen und –kanäle – Ursachen, Prüfung und Vermeidung -“ [1] 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.

Im Rahmen des abgeschlossenen Vorhabens (vgl. [1]) 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.

Vor diesem Hintergrund war es **Ziel** des Ergänzungsvorhabens, die weiterhin offenen Fragestellungen hinsichtlich der **Interaktion Rohr/Boden/Wurzel** zu klären. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Wuchsvorgänge von Wurzeln in einem Rohr-Boden-System nicht auf einfache Weise beschrieben werden können, da Wurzeln als lebende Organismen auf ihre Umwelt reagieren. Hinzu kommt, dass sich Wurzeln unterschiedlicher Baumarten bei gleichen Umweltbedingungen auch unterschiedlich verhalten können.

Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens werden nachfolgend zunächst mit Blick auf die Interaktion von Wurzeln mit dem Boden (**Wurzel-Boden-Interaktion**) zusammengefasst. Die Unterschiede im Wuchsverhalten unterschiedlicher Baumarten werden anschließend unter der

Überschrift **Charakteristika unterschiedlicher Wurzelsysteme** beschrieben. Einen besonderen Schwerpunkt bildeten darüber hinaus die Interaktion von Wurzeln mit den unterschiedlichen Rohrverbindungen DN 150 und mögliche mechanische Versuche zum Nachweis der Wurzelfestigkeit. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind abschließend im Abschnitt **Wurzel - Rohrverbindung - Interaktion** zusammengefasst.

6.1 Wurzel – Boden - Interaktion

Die Ergebnisse aus [1] zeigten, dass insbesondere der Leitungsgraben von Rohren der Ver- und Entsorgung einen für Wurzeln attraktiven Raum darstellt. Als Gründe können Verdichtungsunterschiede, ausreichender Porenraum und eine ausreichende Durchlüftung angegeben werden. Darüber hinaus stellte in den untersuchten Fällen Bodenwasser keinen Mangelfaktor dar. Aus Sicht von Netzbetreibern ist Wurzelwachstum im Leitungsgraben ein unerwünschter Nebeneffekt, der sich durch die Wahl eines Bettungsmittels ergeben kann.

Die beobachtete Barrierewirkung hoch verdichteter Substrate auf wachsende Wurzeln führte zur Arbeitshypothese, Baumwurzeln durch den Einsatz eines entsprechenden Materials von unterirdisch verlegten Leitungen fernzuhalten. Erste Pflanzversuche mit dem Tonmineral Bentonit zeigten bereits in [1], dass Wurzelwachstum auf gut belüftete Substrate begrenzt werden kann. Die im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Versuche mit Bentonit als Wurzelbarriere zeigten ein von den ersten Versuchen leicht abweichendes Ergebnis. Während bei den ersten Versuchen das Bentonit trocken eingebaut wurde, erfolgte der hier durchgeführte Einbau in aufgeschlammter Form. Entsprechend den beschriebenen Effekten von Dichtegrenzen auf das Wurzelwachstum zeigte der Großteil der Pappelwurzeln das von ihnen erwartete Verhalten und wuchs an der Grenzfläche Substrat/Bentonit substratseitig am Bentonit entlang. Stellenweise wurden jedoch Wurzeln angetroffen, die bis zu einer Tiefe von ca. 100mm in das Bentonit eingewachsen waren. Wenngleich ihre Anzahl gemessen an der Gesamtmenge der sich an der Grenzfläche aufhaltenden Wurzeln gering war, so muss an dieser Stelle über die möglichen Ursachen des Einwuchses diskutiert werden. Denkbar ist, dass durch diese Einbauweise das Auftreten von Quellungs- und Schrumpfungsrissen begünstigt wurde. Diese Fissuren ebneten den Wurzeln den Weg in das Bentonit, wobei durch das Wasser eingespültes Substrat das Wurzelwachstum zusätzlich gefördert haben könnte.

6.2 Charakteristika unterschiedlicher Wurzelsysteme

Die Beobachtung von Schadensfällen im Rahmen von [1] sowie die konkrete Suche nach Schäden an Abwasserkanälen und –leitungen durch Gymnospermen (Nadelbäume) im Rahmen dieses Projektes hat ergeben, dass Nadelbäume nur in Ausnahmefällen einwachsen. Das führte zu der Arbeitshypothese, dass sich das Wurzelwachstum von Gymnospermen und Angiospermen (Laubbäume) insbesondere durch ihr Regenerationsverhalten nach einem Wurzelrückschnitt unterscheidet.

Die Fähigkeit zur Regeneration von Wurzeln ist bei verschiedenen Baumarten unterschiedlich ausgeprägt. So sind beispielsweise die oberirdischen Teile der Gymnospermen im Allgemeinen sehr viel schlechter in der Lage zu regenerieren als die der Angiospermen. Dies führte zur Arbeitshypothese, dass das Regenerationsvermögen der verschiedenen Baumarten ein Maß für deren „Gefährlichkeit“ darstellen kann. Die Auswertung der Versuchsreihen bezüglich des

Regenerationsverhalten aus Bäumen unterschiedlicher Verwandtschaftsgruppen hat gezeigt, dass die eingesetzten Pflanzen auf den Rückschnitt der Wurzeln unterschiedlich reagiert haben. Ein Teil zeigte ein deutliches Regenerationsvermögen (*Thuja*, *Ginkgo*, *Acer*, *Ailanthus* (vgl. Abb. 118 bis Abb. 121)), andere Pflanzen zeigten hingegen ein ausgesprochen geringes bzw. kein Regenerationsvermögen (*Taxus*, *Pinus* (vgl. Abb. 122 und Abb. 123)). Gemessen an der Anzahl neu gebildeter Wurzeln ergibt sich eine aufsteigende Reihenfolge, angefangen mit *Taxus* (*Eibe*) und *Pinus* (*Kiefer*) über *Ginkgo* (*Ginkgo*) und *Ailanthus* (*Götterbaum*) bis hin zu *Acer* (*Ahorn*) und *Thuja* (*Lebensbaum*). Die Ursache für dieses unterschiedliche Verhalten ist demnach nicht großgruppenspezifisch, sondern unterliegt den Eigenschaften der jeweiligen Gattung. So ist bei Erneuerungsmaßnahmen zu berücksichtigen, dass nicht allein die Auswahl der Großgruppe „nacktsamige Pflanzen“ zur Verhinderungen von Wurzeleinwüchsen ausreicht. Beispielsweise zeigten *Ginkgo* und *Thuja* ein deutliches Regenerationsverhalten, welches belegt, dass Verletzungen an diesen Wurzeln z.B. infolge von Baumaßnahmen, zu einem verstärkten Wachstum in der Nähe von Leitungen führen kann.

Mögliche Auswirkungen der Unterschiede im anatomischen Aufbau der Wurzeln wurde mit Hilfe von Wurzeldruckmessungen an Primärwurzeln untersucht. Grundsätzlich wurde bei Gymnospermenwurzeln ein kleinerer Wurzeldruck als bei Angiospermenwurzeln gemessen (vgl. Kapitel 5.4). Die Wurzeldrücke von Gymnospermen variierten zwischen 4,0 bar für Araukarienwurzeln (*Araucaria araucana*.) und 8,8 bar für Pinienwurzeln (*Pinus pinea*). Auch die Wurzeldrücke von Angiospermen variierten in einem Bereich von ca. 4,0 bar. Als Untergrenze wurde hier der Wert von 8,8 bar bei Robinienwurzeln und als Obergrenze der Wert von 11,9 bar bei Eichenwurzeln gemessen. Mit Blick auf die nur in Ausnahmefällen einwachsenden Gymnospermenwurzeln, können die geringeren Wurzeldruckwerte eine mögliche Erklärung des Phänomens darstellen.

6.3 Wurzel – Rohrverbindung - Interaktion

Steckverbindungen mit Elastomeren als Dichtmittel stellen die gängigste technische Lösung der Verbindung von Kanalisationsrohren dar. Sie bieten gegenüber anderen Systemen den Vorteil, dass sie auch unter schwierigen Baustellenbedingungen vergleichsweise einfach herzustellen sind.

Die Entwicklung dieser Verbindungen wurde in den letzten Jahrzehnten unter bautechnischen Gesichtspunkten vorangetrieben und optimiert. Zur Prüfung von Rohrverbindungen werden in Laborversuchen Belastungssituationen, wie sie im Rohrgraben auftreten können, simuliert und so die Rohr- und Rohrverbindungsqualität sichergestellt. In Rohrverbindungen einwachsende und zu Undichtigkeiten führende Wurzeln stellen eine bis jetzt undefinierte Belastung für Rohrverbindungen dar.

Der Lastfall Wurzelwachstum wurde erstmals im Rahmen von [1] beschrieben. Es wurde ersichtlich, dass Wurzeln nicht nur in nach dem Stand der Technik undichte Rohrverbindungen einwachsen, sondern auch nach den a. a. R. d. T. „dichte“ Rohrverbindungen überwinden und die Hypothese „Dichte Rohrverbindung gleich wurzelfeste Rohrverbindung“ nicht zutrifft. Ergebnisse von Untersuchungen in Schweden [48] und Australien [54] bestätigen diese Beobachtungen. Mit welchen Strategien die Wurzeln eine Rohrverbindung überwinden

könnten, wurde bereits in [3] beschrieben. Eine besondere Bedeutung kommt dem verwendeten Rohrwerkstoff, der geometrischen Ausführung der Rohrverbindung und der eingesetzten Elastomerdichtung zu. Die Summe der Eigenschaften dieser Einzelkomponenten beeinflusst das Wuchsverhalten der Wurzeln im Bereich der Rohrverbindungen, so dass die Wurzelfestigkeit von Rohrverbindungen beispielsweise nicht allein durch den Vergleich von Anpressdruck und Wurzeldruck beurteilt werden kann (vgl. auch [1]).

Grundsätzlich können die Bereiche vor dem Dichtmittel durch die Begriffe Ringraum und Ringspalt beschrieben werden. Der **Ringspalt** bildet die Eintrittsöffnung in den **Ringraum**. Darüber hinaus begrenzt der Ringspalt den Ringraum nach Außen. Die Größe des Ringspalt es wird - bezogen auf die Schnittfläche - in mm angegeben. Die Größe des Ringraums wird - bezogen auf die Schnittfläche - in mm² angegeben. Die Gefahr von Wurzeleinwuchs in gesteckte Rohrverbindungen steigt, sobald Wurzeln in den äußeren Ringraum der Rohrverbindung eingedrungen sind. So wurde bereits in [1] beschrieben, dass die Geometrieigenschaften der Rohrverbindungen wie Ringraum bzw. Ringspalt und die Oberflächenstruktur des Rohrwerkstoffes das Auffinden des äußeren Ringraums durch Wurzeln beeinflussen. Im Rahmen der jetzt durchgeführten Untersuchungen wurden die Ringspalten von Rohrverbindungen vermessen. Bei den Kunststoffrohren aus den Werkstoffen PP (Polypropylen) und PVC (Polyvinylchlorid) wurden Ringspalte von 0,3 bis 0,7 mm gemessen. Bei Rohren aus den Werkstoffen Steinzeug und GGG (duktiler Gusseisen) haben die Ringspalte eine Höhe zwischen 4,0 und 7,0 mm. Wurzelwuchs konnte sowohl in die Ringspalte und Ringräume aller Rohrverbindungen festgestellt werden.

Jedoch konnten Unterschiede beim Durchwurzelungsverhalten von Rohrverbindungen mit geringem und solchen mit großem Ringspalt festgestellt werden. Die Outside-In-Versuche haben gezeigt, dass durch geringe Ringspalte kein Substrat in Ringräume eindringt, wohl aber in Rohrverbindung mit großen Ringspalten. Dies führte zu Unterschieden in der Ausbildung von neuen Wurzeln in den jeweiligen Räumen. Während die in die engspaltigen Ringräume der Kunststoffrohrverbindungen eingewachsenen Wurzeln wenige, aber meist dickere Nebenwurzeln bildeten, zeigten die im mit porenreichem Boden gefüllten Ringraum der Steinzeugrohrverbindungen eingedrungenen Wurzeln einen hohen Verzweigungsgrad mit einem dichten Feinwurzelsbesatz (vgl. Abb. 97 A bis F).

Aufgrund dieser Beobachtungen können jetzt grundsätzlich zwei mögliche Mechanismen beschrieben werden, wie gesteckte Rohrverbindungen mit Elastomerdichtungen von Wurzeln durchdrungen werden:

1. Einzelne Wurzeln wachsen in den Zwickel der Elastomerdichtung ein, heben die Elastomerdichtung an und verzweigen sich. Die neu gebildeten Seitenwurzeln wachsen dann in den geschaffenen Zwischenraum ein. In Abhängigkeit vom Anpressdruck und der Anpressfläche kann die Rohrverbindung versagen.
2. Der äußere Ringraum ist mit porenreichem, unverdichtetem Boden gefüllt. In diesem Substrat bilden die Wurzeln ein dichtes Geflecht aus Feinwurzeln. Es entsteht ein kompakter Bodenkörper, der durch die Feinwurzeln zusammengehalten wird. Nach und nach beginnen die Wurzeln mit Ihrem Dickenwachstum. Das Wurzel-Boden-Polster wirkt dabei wie ein Druckkissen. Der von ihm ausgeübte Druck überträgt

sich auf die Elastomerdichtung, so dass diese im Zwickel minimal angehoben wird und sich die Wurzeln so neuen Raum erschließen.

Für die Entwicklung wurzelfester Rohrverbindungen liegt es nahe, den o.a. Wirkmechanismen nicht allein durch hohe Anpressdrücke der Dichtung mit den verbundenen bauverfahrenstechnischen Schwierigkeiten entgegenzuwirken. Auch die geometrische Ausbildung der äußeren und inneren Rohrverbindungsgeometrie sowie die Eigenschaften der eingebauten Böden sind mit Blick auf die Verringerung von Wurzeleinwuchs in die produktspezifische Bewertung einzubeziehen.

7 Ausblick

Die im Rahmen des Projektes eingesetzten Versuchseinrichtungen zur Prüfung der Wurzelfestigkeit von Rohrverbindungen bieten vielfältige Möglichkeiten, die Wurzelfestigkeit von Rohrverbindungen zuverlässiger zu bewerten. Im Rahmen der Versuche wurden Rohrverbindungen DN 150 genutzt, die bedingt durch ihren kleinen Querschnitt im Falle eines Wurzeleinwuchses in kurzer Zeit von den Wurzeln verstopft werden können. Darüber hinaus werden Rohre in diesem Nennweitenbereich für Hausanschlussleitungen genutzt und liegen häufig in der Nähe von Bäumen. Als Versuchspflanzen wurden Weiden eingesetzt, die nachweislich in Rohrverbindungen einwachsen (vgl. [1]) und schnell Wurzeln bilden. Die Auswertung erfolgte durch zerstörendes Öffnen der Versuchsgefäße. Mit Blick auf ein Nachweisverfahren für die Wurzelfestigkeit von Rohrverbindungen sollte der hier eingesetzte Versuchsaufbau und die Art der Auswertung sowie die erzielten Ergebnisse spätestens nach Beendigung der Versuchsreihen diskutiert werden. Offene Fragen sind beispielsweise die zu wählenden Versuchszeiten (Monate oder Jahre) und die optimierte bzw. standardisierte Lagerung der Versuchspflanzungen. Mit standardisierten Versuchen könnten zum einen verschiedene Rohrverbindungssysteme vergleichend untersucht und die Entwicklung wurzelfester Rohrverbindungssysteme unterstützt werden. Eine Erweiterung standardisierter Prüfmethoden auf weitere Produkte, wie beispielsweise Rohre mit größeren Nennweiten oder Hausanschlussstutzen, bietet sich dann an.

Die im Rahmen von [1] durchgeführten Aufgrabungen sowie die durchgeführten Wurzelbestimmungen durch die RUB führten zu dem Schluss, dass Gymnospermen (Nadelbäume) nur sehr selten in Abwasserkanäle und –leitungen einwachsen. Die anatomische Datenbank zur schnellen Bestimmung von Wurzelquerschnitten stellte dabei ein leistungsfähiges Werkzeug zur Identifikation des schadenverursachenden Baumes dar und erlaubte eine schnelle und kostengünstige Analyse von Wurzelschnitten. Vor diesem Hintergrund wurden Versuche zur Bestimmung des Wurzeldrucks sowie der Regenerationsfähigkeit unterschiedlicher Baumarten durchgeführt. Es zeigten sich deutliche Unterschiede im Verhalten unterschiedlicher Baumarten. Diese beispielhafte Vorgehensweise stellt einen möglichen Weg dar, die erste Beurteilung von Wurzeln und Wurzelsystemen unterschiedlicher Baumarten erlauben kann. So scheint jetzt die Beurteilung des Gefährdungspotentials von Netzen in Abhängigkeit von der Baumart möglich. Weitergehende Untersuchungen zum Verhalten von Wurzelsystemen zusammen mit der Auswertung von Geo-

Informations-Systemen durch Verschneidung von Netzdaten und Baumdaten stellen eine Möglichkeit dar, gefährdete Leitungssysteme zu identifizieren.

Darüber hinaus zeigten die Versuche mit Bentonit erneut, dass dieser Werkstoff die Gefahr eines Einwuchses verringern kann. Grundsätzlich sollte der Einsatz alternativer Bettungsmaterialien mit Blick auf eine Verhinderung von Wurzeln in Leitungsgräben untersucht werden. Dies erfolgt im Rahmen eines von der DBU – Deutsche Bundesstiftung Umwelt geförderten Forschungsvorhabens. Neben bentonithaltigen Bettungsmaterialien werden auch flüssige Bettungsmaterialien untersucht (vgl. [71]).

Durch den Bau und Betrieb unterirdischer Ver- und Entsorgungsnetze sowie durch Pflanzung und Pflege von Stadtgrün wird ein komfortables und sicheres Leben in Städten erst möglich. Beide Aufgaben sind daher als bedeutsam anzusehen. Die Unkenntnis von Netzbetreibern über das Wuchsverhalten von Wurzeln und deren Interaktion mit den Leitungsgräben und Leitungen der Ver- und Entsorgung führt allerdings wiederholt zu Konflikten zwischen Grünflächenämtern und Netzbetreibern. Neben den Schäden durch Wurzeln an Rohrleitungssystemen entstehen auch Schäden durch Tiefbauarbeiten an Wurzeln in den Leitungsgräben. Häufig werden auch Bäume in Unkenntnis von Leitungen der Ver- und Entsorgung in deren unmittelbarer Nähe gepflanzt. Die hier durchgeführten Versuche verbessern das Verständnis für die Wuchsvorgänge der Wurzeln im Boden und in der Rohrverbindung. Die Ergebnisse fließen direkt in die Arbeit der seit Mai 2006 tätigen DWA Arbeitsgruppe ES 3.6 „Baumstandorte, Kanäle und Leitungen“ ein. Das in diesem Rahmen zu erarbeitende Merkblatt verfolgt unter anderem das Ziel, insbesondere auf der Basis aktueller Forschungsergebnisse, konkrete Hinweise für den Umgang mit Wurzeln und Leitungen zu geben, um die o.a. Konflikte zwischen Netzbetreibern und Grünflächenämtern künftig zu vermeiden.

8 Literatur

- [1] STÜTZEL, TH.; BOSSELER, B.; BENNERSCHIEDT, C.; SCHMIEDENER, H.: „Wurzeleinwuchs in Abwasserleitungen- und -kanäle - Ursachen, Prüfung und Vermeidung“; IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur, in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Spezielle Botanik der Ruhr-Universität Bochum unter Beteiligung verschiedener NRW-Netzbetreiber im Auftrag des Umweltministeriums NRW (MUNLV), August 2004.
- [2] STÜTZEL, TH. & B. BOSSELER 2003: Ursachen des Wurzeleinwuchses in Kanälen; Gesellschaft zur Förderung des Lehrstuhls für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik an der Ruhr-Universität Bochum e.V., Tagungsband zum 21. Bochumer Workshop Siedlungswasserwirtschaft 2003
- [3] BOSSELER, B.; BENNERSCHIEDT, C.: Ökologische Auswirkungen von Wurzeleinwuchs in Abwasserkanäle und –leitungen und ökonomische Maßnahmen zur Schadensvermeidung und Sanierung - Projektendbericht, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur im Auftrag des MUNLV NRW, 2004
- [4] DIN 4060: Rohrverbindungen von Abwasserkanälen und –leitungen mit Elastomerdichtungen, 02 / 1998
- [5] DIN EN 1610: Verlegung und Prüfung von Abwasserleitungen und –kanälen, Deutsche Fassung EN 1610, 07 / 1997
- [6] BRAUNE, W.; LEMAN, A.; TAUBERT, H.: Pflanzenanatomisches Praktikum I. 5. Auflage, 1987. G. Fischer Verlag, Stuttgart.
- [7] SHIGO, A.L., Moderne Baumpflege - Grundlagen der Baumbiologie (Originaltitel: Modern Arboriculture). Deutsch von Rolf Kehr und Heinz Butin; Thalacker, Braunschweig 1994
- [8] MALEK, VON M., MOLITOR, W., PEBLER, K. ;Der Baumpfleger; Ulmer, 1999
- [9] BÖHM, W.: Methods of studying root systems, Ecol. Stud. 33, Springer-Verlag, 1979
- [10] 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
- [11] BOHNE, H.; HARTGE, K.H.: Auswirkungen der Gefügegeometrie auf den Wuchs von Getreidekeimlingen, Mitt. Dt. Bodenk. Ges. 34, S. 141-144, 1982
- [12] TAYLOR, H.M.; GARDNER, H.R.: Relative penetrating ability of different plant roots. Agron, J. 52, S.579-581, 1960
- [13] BARLEY, K.P.: The effects of mechanical stress on the growth of roots, J. Exptl. Bot. 13, S. 95-110, 1962
- [14] BARLEY, K.P.: Influence of soil strength on root growth, Soil Sci. 96, S. 175-180, 1963
- [15] BARLEY, K.P.; GREACEN, E.L.: Mechanical resistance as a soil factor influencing the growth of roots and underground shoots, Adv. Agron. 19, S. 1-43, 1967
- [16] DUMBECK, G. u. HARRACH, T.: Porenverteilung bei Bodenverdichtungen, Mitt. Dt. Bodenk. Ges. 43/I, S. 213-218, 1985
- [17] GRABLE, A.R.: Effects of compaction on contents and transmission of air in soils, in: Compaction of agricultural soils, ASAE Monographie, S. 154-164, 1971
- [18] LEBERT, M: Beurteilung und Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Ackerböden, Bayreuther Bodenkundl. Ber. 12, S. 133, 1989
- [19] VEIHMAYER, F.J.; HENDRICKSON, A.H.: Soil density and root penetration, Soil Sciences 65, S. 487-493, 1948

- [20] PRIHAR, J.K.; DEXTER, A.R.; DEVINE, O.J.: Tillage effects on soil temperature, soil water, and wheat growth in South Australia, *J. Soil Soc. Am.* 49, S. 1542-1547, 1985
- [21] PHILIPPS, R.; KIRKHAM, D.: Soil compaction in the field and corn growth, *Agron. J.* 54, S. 29-34, 1962
- [22] LOWRY, F.E.; TAYLOR, H.M.; HUCK, M.G.: Growth rate and yield of cotton as influenced by depth and bulk density of soil pans, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 34, S. 306-309, 1970
- [23] PETELKAU, H.: Durch Fahrwerke landwirtschaftlicher Mechanisierungsmittel verursachte Schadwirkungen und Vorschläge zur ihrer Verminderung, *Wiss. Beiträge Martin-Luther-Univ. Halle 11*, S. 106-119, 1987
- [24] TAYLOR, H.M.; RATLIFF, L.F.: Root elongation rates of cotton and peanut as a function of soil strength and water content, *Soil Sci.* 108, S. 113-119, 1969
- [25] ERMICH, D.; HOFMANN, B.; LANDMANN, R.: Körnungsarten- und feuchteabhängige Grenzwerte der Druckbelastung des Ackerbodens zur Minderung von Gefügeschäden bei der Saatbettbereitung zu Zuckerrüben, *Wiss. Beiträge Martin-Luther-Univ. Halle 31*, S. 27-36, 1982
- [26] DEXTER, A.R.: Model experiments on the behaviour of roots at the interface between a tilled seed-bed and a compacted sub-soil,
I: Effects of seed-bed aggregate size and sub-soil strength on roots, *Plant and Soil* 95, S. 12-133, 1986
II: Entry of pea and wheat roots into sub-soil cracks, *Plant and Soil* 95, S. 135-147, 1986
III: Entry of pea and wheat roots into cylindrical biopores, *Plant and Soil* 95, S. 149-161, 1986
- [27] BECHER, H.H.: Wasserspannungsabhängiger Eindringwiderstand eines Pelosols, *Geoderma* 21, S. 105 – 118, 1978
- [28] GREACEN, E.L.; BARLEY, K.P.; FARRELL, D.A.: The mechanics of root growth in soils with particular reference to the implications for root distribution, in: Whittington, *Root Growth*, S. 256-269. Butterworths, London, 1969
- [29] EHLERS, W.; KÖPCKE, U.; HESSE, U.; BÖHM, W.: Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil, *Soil Tillage Research* 3, S. 261-275, 1983
- [30] WHITELEY, G.M.; UTOMO, W.H.; DEXTER, A.R.: A comparison of penetrometer pressures and the pressures exerted by roots, *Plant and Soil* 61, S. 351-364, 1981
- [31] FREDE, H.G.: Der Gasaustausch des Bodens, *Göttinger Bodenkundliche Berichte* 87, 130 S., 1986
- [32] ZAUSIG, J.; HELL, U.; HORN, R.: Die Bedeutung der Aggregierung für den Gashaushalt im Intraaggregatporensystem, *Z. Pflanzenern. u. Bodenkd.* 153, S. 5-10, 1990
- [33] MARSCHNER, H.: Nährstoffdynamik in der Rhizosphäre, Eine Übersicht. *Berl. Deutsch. Bot. Ges.*, 98, 291-309, 1985
- [34] GLINSKI, G.; STEPNIIEWSKI, W.: Soil aeration and its role for plants, CRC-Press, Florida, 1985
- [35] GEISLER, G.: Der Lufthaushalt des Bodens in seiner Bedeutung für das Pflanzenwachstum, *Kali-Briefe* 14 (1), S. 61-78, 1978
- [36] VORDERBRÜGGE, Th.; SELIGE, Th.; HARRACH, T.: Einfluss von Verdichtungen und Vernässungen in Neulandböden auf Durchwurzelung und Ertrag, *Mitt. Dt. Bodenk. Ges.* 53, S. 311-316, 1987
- [37] RENGER, M.; STREBEL, O.; SPONAGEL, H.; WESSOLEK, G.: Wasser und Boden, *Ausg.* 36, S. 449-502, 1984

-
- [38] RICHTER, J.; GROSSGEBAUER, A.: Untersuchungen zum Bodenlufthaushalt in einem Bearbeitungsversuch, II. Gasdiffusionskoeffizienten als Strukturmaße für Böden, Z. Pflanzenern. und Bodenkd. 141, S. 181-202, 1978
- [39] FLÜHLER, H.: Sauerstoffdiffusion im Boden, Mitt. Schweiz. Anst. Forsten Versuchswesen, Band 39, Zürich, 1973
- [40] GRABBLE, A.J.; SIEMER, E.G.: Effects of bulk density, aggregate size and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots, Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 32, S. 180-186, 1968
- [41] DUNGER, W.: Tiere im Boden; Neue Brehm Bücherei; Ziemsen Verlag, Wittenberg, 1983
- [42] EHRSBERGER, R. (HG): Bodenmesofauna und Naturschutz. Bedeutung und Auswirkungen von anthropogenen Massnahmen (=Informationen zu Naturschutz und Landschaftspflege in Nordwestdeutschland, Bd 6); Naturschutzverband Niedersachsen, 1993
- [43] KUTSCHERA, L.: Wurzelatlas mitteleuropäischer Ackerunkräuter und Kulturpflanzen; DLG-Verlag Frankfurt am Main, 1960.
- [44] BALDER, H.: Die Wurzeln der Stadtbäume, Parey-Verlag, 1998
- [45] Reichwein, S.: Baumwurzeln unter Verkehrsflächen – Untersuchungen zu Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln und Ansätze zur Schadensbehebung und Schadensvermeidung. Beiträge zur räumlichen Planung, Heft 66, Hannover 2002; Institut für Grünplanung und Gartenarchitektur der Universität Hannover.
- [46] DIN EN 681: Werkstoff-Anforderungen für Rohrleitungs-Dichtungen für Anwendungen in der Wasserversorgung und Entwässerung Teile 1 bis 4, 10 / 2000
- [47] DIN EN 598: Rohre, Formstücke, Zubehörteile aus duktilem Gußeisen und ihre Verbindungen für die Abwasser-Entsorgung - Anforderungen und Prüfverfahren, Deutsche Fassung EN 598, 1994
- [48] RIDGERS, D.; ROLF, K.; STÅL, Ö.: Management and planning solutions to modern PVC- and concrete sewer pipes' lack of resistance to root penetration; Osnabrücker Baumpflegetage 2004
- [49] UNI BELL, PVC PIPE ASSOCIATION: Maintenance of PVC Sewer Pipe, UNI-TR-3-03. www.uni-bell.org.
- [50] Funke Kunststoffe GmbH: Langzeittest beweist! Fabekun-HS-Kanalrohre sind wurzelfest! Produktkatalog der Fa. Funke Kunststoffe GmbH.
- [51] AS 1260, Unplasticized PVC (UPVC), Pipes and Fittings for Drain Waste und Vent Applications; Australian/New Zealand Standard™, 1984, ungültig
- [52] NZS 7649, Unplasticized PVC sewer and drain pipe and fittings; New Zealand Standard NZS 7649, 1988
- [53] AS 1462 - Part 13, Methods for the determination of compression characteristics of a rubber ring joint for resistance to root penetration; Australian/New Zealand Standard™, 2006
- [54] BURN, L.S.: Elastomeric Pipe Joint Performance – Sewer & Stormwater Pipelines; Präsentation auf der Sitzung der COST C15 – Tagung in Brüssel, Februar 2005. unveröffentlicht
- [55] WHITTLE A.J., LU J.P., BURN L.S.: Performance of Elastomeric Joints for PVC Sewer Pipes; CSIRO – Australia, 1997
- [56] AS 1260: PVC-U pipes and fittings for drain, waste und vent application. Australian/New Zealand Standard™, 2002
- [57] DIN EN 1916: Rohre und Formstücke aus Beton, Stahlfaserbeton und Stahlbeton. Deutsche Fassung EN 1916: 2002

- [58] THOMA, W.: Entwicklung von Untersuchungs- und Prüfverfahren zur Klärung des Zusammenhangs zwischen Alterung und Undichtigkeit bei Dichtungswerkstoffen und –systemen in industriellen und öffentlichen Abwasserrohrleitungen; Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben des TÜV Südwest, BMBF 02-WK 9175/0, 1996
- [59] 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 1401-1:1998, 1998-12
- [60] DIN EN 1451-1, Kunststoff-Rohrleitungssysteme zum Ableiten von Abwasser (niedriger und hoher Temperatur) innerhalb der Gebäudestruktur - Polypropylen (PP) - Teil 1: Anforderungen an Rohre, Formstücke und das Rohrleitungssystem; Deutsche Fassung EN 1451-1:1998 :1999-03
- [61] DIN EN 295-3: Steinzeugrohre und Formstücke sowie Rohrverbindungen für Abwasserleitungen und -kanäle - Teil 3: Prüfverfahren (enthält Änderung A1:1998); Deutsche Fassung EN 295-3:1991 + A1:1998, 1999-02
- [62] STEINZEUG AG 2001. Steinzeughandbuch. Steinzeug AG, Eigenverlag, Köln
- [63] DIN EN 598: Rohre, Formstücke, Zubehörteile aus duktilem Gusseisen und ihre Verbindungen für die Abwasser-Entsorgung - Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung prEN 598, 2005
- [64] Firmeninformation der Firma Tekscan. www.tekscan.com
- [65] Stein, D.: Instandhaltung von Kanalisationen. 3. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin
- [66] Sitte, P. et al.: Strasburger – Lehrbuch der Botanik. 35. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, Berlin.
- [67] Wurzeleinwuchs in Abwasserleitungen und Kanäle - Beschreibung der Ursachen, Hinweise zur Vermeidung und Vorschläge zur Prüfung. Diplomarbeit Heiko Schmiedener, Lehrstuhl für Spezielle Botanik an der Ruhr-Universität Bochum, Dezember 2003, unveröffentlicht
- [68] Anatomische Merkmale als Parameter bei der Erfassung von Durchwurzelungsschäden. Diplomarbeit Markus Streckenbach, Lehrstuhl für Spezielle Botanik an der Ruhr-Universität Bochum, November 2004, unveröffentlicht
- [69] DIN V 4034-1, (Vornorm), Schächte aus Beton-, Stahlfaserbeton- und Stahlbetonfertigteilen für Abwasserleitungen und -kanäle - Typ 1 und Typ 2 - Teil 1: Anforderungen, Prüfung und Bewertung der Konformität, 2004-08
- [70] Forschungsvorhaben TÜV Südwest BMBF gefördertes Forschungsvorhaben 02-WK 9175/0, Entwicklung von Untersuchungs- und Prüfverfahren zur Klärung des Zusammenhangs zwischen Alterung und Undichtigkeit bei Dichtungswerkstoffen und – systemen in industriellen und öffentlichen Abwasserrohrleitungen, Filderstadt 1996.
- [71] IKT- Institut für Unterirdische Infrastruktur, Forschungsantrag Umweltsicherer Kanalbau durch wurzelfeste Bettung der Rohre – Pflanzversuche in Osnabrück, Fördermittelgeber: DBU - Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück, Antragstellung 2006