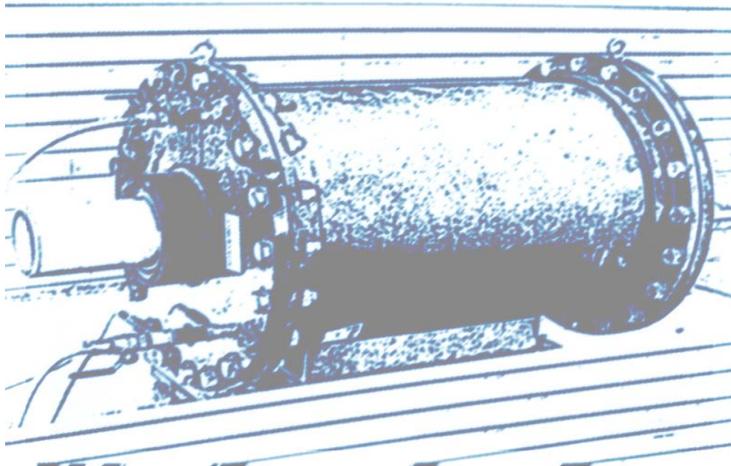


Wurzeleinwuchs in Abwasserleitungen und Kanäle „Ergänzungsvorhaben“, Kurzbericht



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

Gelsenkirchen, Juni 2007

Kurzbericht zum Forschungsvorhaben:

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

1	Hintergrund und Zielstellung	3
2	Naturwissenschaftlich-Technischer Hintergrund	4
2.1	<i>Grundlagen des Wurzelwachstums</i>	4
2.2	<i>Wurzelfestigkeit: Untersuchungen und Prüfverfahren</i>	5
2.3	<i>Wurzeldruck, Anpressdruck, Ringräume und Ringspalte</i>	7
3	Untersuchungen an Rohrverbindungen	8
3.1	<i>Untersuchungen zur Ermittlung des Anpressdrucks</i>	10
3.2	<i>Außendruckuntersuchung</i>	12
3.3	<i>Kulturversuche an Rohrverbindungen</i>	14
3.4	<i>Untersuchung der Verbindungsgeometrie</i>	17
4	Weiterführende Untersuchungen zum Wurzelwachstum	18
4.1	<i>Einfluss der Porenräume auf den Wurzelwuchs</i>	18
4.2	<i>Regenerationsfähigkeit von Wurzeln</i>	19
4.3	<i>Wurzeldruck von Gymnospermen und Angiospermen</i>	21
5	Schlussfolgerung	22
6	Ausblick	26
7	Literatur	28

1 Hintergrund und Zielstellung

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.

Im Rahmen des bereits abgeschlossenen Vorhabens [1] 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.

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.

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.

2 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.

2.1 Grundlagen des Wurzelwachstums

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. [6] 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 eigentliche Wachstumszone der Wurzel liegt nicht an deren Spitze, sondern kurz dahinter. In der sog. Initialenzonzone 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.

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).

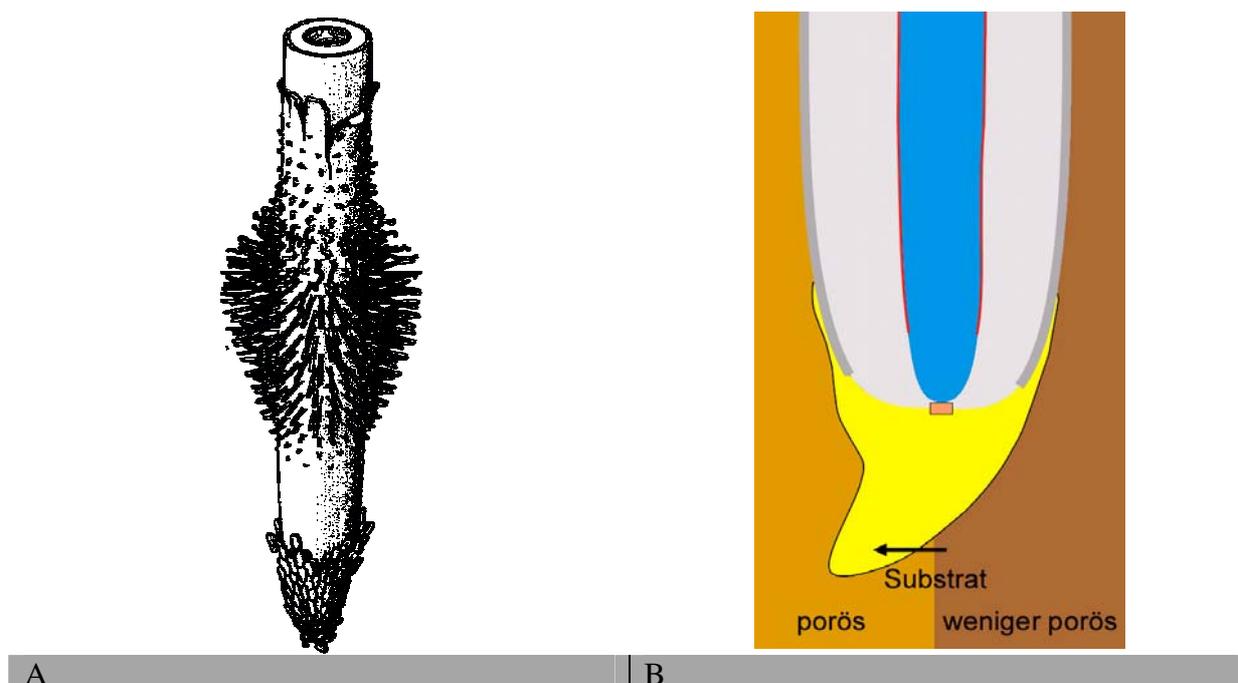


Abb. 1: Aufbau der Wurzelspitze. **A:** Längsansicht der Wurzelspitze. (aus [7]) **B:** Schematische Aufbau. Die Wurzelhaube (Calyptra, gelb) besteht aus abgestorbenen Zellen, die als Gleitmittel dienen. Ihre gelatinöse Struktur ermöglicht Änderungen der Wuchsrichtung. Die gallertige Wurzelhaube dringt vornehmlich in weniger dichten Boden (hellbraun) ein und führt bei weiterem Wachstum zu einer Richtungsänderung der gesamten Wurzel.

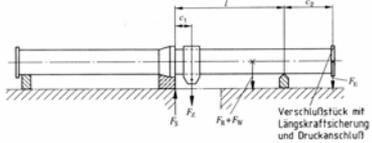
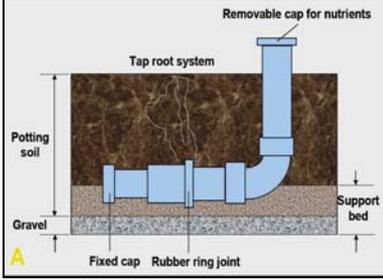
Wurzeln folgen häufig solchen Grenzflächen und aus diesem Grund oft Grabenwänden oder auch den Grenzflächen zwischen der Oberfläche von Rohren und dem Bettungsmaterial im Rohrgraben. Entscheidend ist, dass für die Wurzeln nicht der Verdichtungsgrad maßgeblich ist, wie er üblicherweise im Bauingenieurwesen 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.

2.2 Wurzelfestigkeit: Untersuchungen und Prüfverfahren

Die Ausbildung des Wurzelwerks von Bäumen hängt 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. [8]) 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.

In Tabelle 1 sind Untersuchungen zu den Ursachen von Wurzeleinwuchs und Verfahren zur Prüfung von Rohrverbindungen zusammengestellt. Ein universell anwendbares Testverfahren fehlt bislang.

Tabelle 1: Untersuchungen zur Wurzelfestigkeit von Rohrverbindungen (Beispiele)

Mechanischer Nachweis der Wurzelfestigkeit	Nachweis der Wurzelfestigkeit nach DIN 4060. (aus [9])	 <p>Verschlussstück mit Längskraftsicherung und Druckschliff</p> <p> F_R Eigengewicht des Verschlussstückes F_W Eigengewicht des Rohres F_S Scherlast F_W Gewicht des Wassers F_Z Zusatzlast l Abstand zwischen Elastomerdichtung und rechtem Auflager C_1 Abstand zwischen Elastomerdichtung und Lasteinleitungspunkt für F_Z C_2 Abstand zwischen rechtem Auflager und Lasteinleitungspunkt für F_Z </p>
Aufgrabungen im Leitungsnetz	Aufgrabungen in der Umgebung von verwurzelten Kanälen und Leitungen. (aus [1])	
Insitu-Versuche	Versuchsfeld mit zwei Haltungen aus Beton und PVC. (aus [10])	
Mittelformatige Laborversuche mit Grauerlen, Zitterpappeln und Ackerquecke	Versuche in Pflanzgefäßen mit ungefähren Abmessungen 1,0 x 1,0 x 1,0 m. (aus [11])	
Mittelformatige Laborversuche mit Ryegrass und Teebäumen	Versuche des CSIRO mit horizontal eingebauten Rohren. (aus [12])	
Kleinstversuche zur Bestimmung des Wurzeldrucks	Ermittlung des Wurzeldrucks mit Hilfe von drucksensitiven Folien. (aus [1])	

2.3 Wurzeldruck, 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

Minimale Anpressdrücke und Anpressdruckflächen für Rohrverbindungen werden nur in einigen wenigen Normen festgelegt. In Australien und Neuseeland wird in AS/NSZ 1260 (vgl. [13]) 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 [14]. 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 Wurzelldrücken, 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 Einwuchrisikos 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.

3 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 3).

Tabelle 3: Übersicht der ausgewählten Rohrprodukte im Nennweitenbereich DN 150.

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	

3.1 Untersuchungen zur Ermittlung des Anpressdrucks

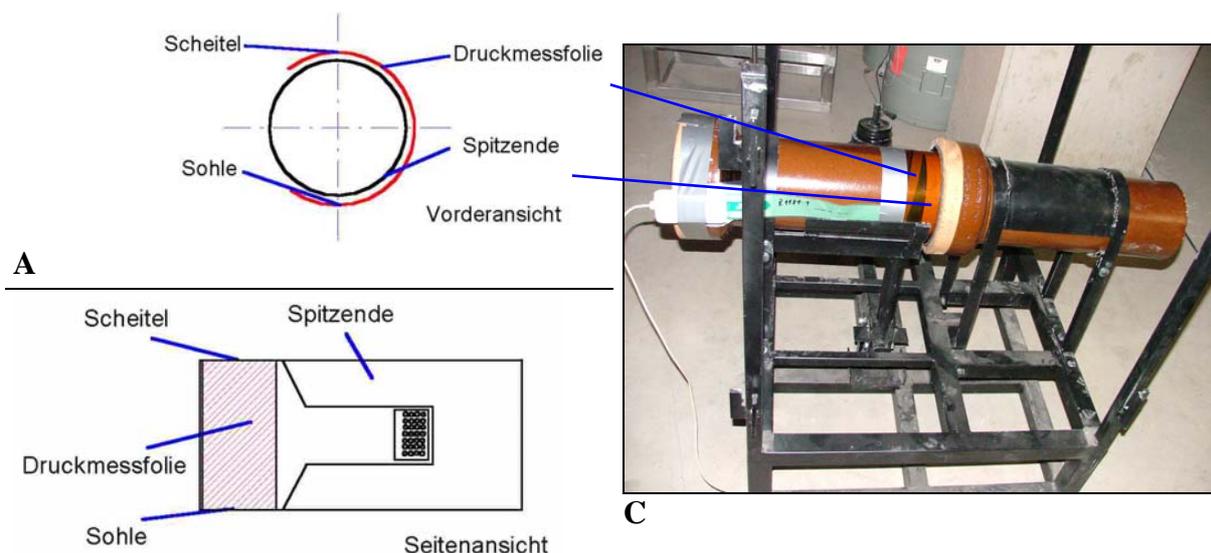
Zum Nachweis der Wurzelfestigkeit fordert DIN 4060 [4] unabhängig vom Rohrwerkstoff eine Scherlastprüfung, bei der das Zehnfache der Nennweite in Newton auf die Rohrverbindung aufzubringen und dann die Dichtheit der Rohrverbindung nachzuweisen ist. Diese Scherlast stellt die Mindestanforderung dar. Von 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 4 zu entnehmen.

So werden beispielsweise für den Werkstoff Steinzeug in DIN EN 295-3 [18] Scherlasten von 25 x DN bzw. für Rohre aus Duktilem Gusseisen nach DIN EN 598 [15] Scherlasten in Höhe von 30 x DN gefordert. Grundsätzlich ergibt sich die Höhe der Scherlasten jeweils proportional zum Rohrdurchmesser.

Tabelle 4: Nachweis der Wurzelfestigkeit von Rohrverbindungen aus unterschiedlichen Rohrwerkstoffen; Anforderungen der Normen.

Werkstoff	Produktnorm	Anforderung für die Scherlastprüfung
PVC-U	EN 1401-3 [16]	10 mal DN in [N]
PP	DIN EN 1451-1 [17]	10 mal DN in [N]
Keramik	DIN 295 Teil 5 [18, 19]	25 mal DN in [N]
Dukt. Gusseisen	DIN EN 598 [20]	30 mal DN in [N]

Scherlasten auf Rohrverbindungen haben eine Veränderung der Anpressdruckverteilungen im Rohrumfang zur Folge. Für die Bestimmung der Anpressdrücke sowie der korrespondierenden Dichtflächen wurden mit Druckmessfolien bestückte Rohrverbindungen in einem für Rohrquerschnitte bis ca. DN 150 konzipierten Scherlastversuchsstand untersucht. Die Position der Druckfolie ist in Abb. 2 A und B dargestellt. Eine in den Scherlastversuchsstand eingebaute Rohrverbindung mit Druckfolie zeigt Abb. 2 C. Beispielhaft ist in (vgl. Abb. 3) die Verteilung der Anpressdrücke und Anpressflächentiefe im Rohrumfang einer Rohrverbindung dargestellt.



B

Abb. 2: Messung des Anpressdruckes bei Einwirken einer Scherlast. **A** Druckfolie auf dem Spitzende einer Rohrverbindung, Querschnitt. **B** Druckfolie auf dem Spitzende einer Rohrverbindung, Ansicht. **C** In den Scherlastversuchsstand eingebaute Rohrverbindung aus Keramik.

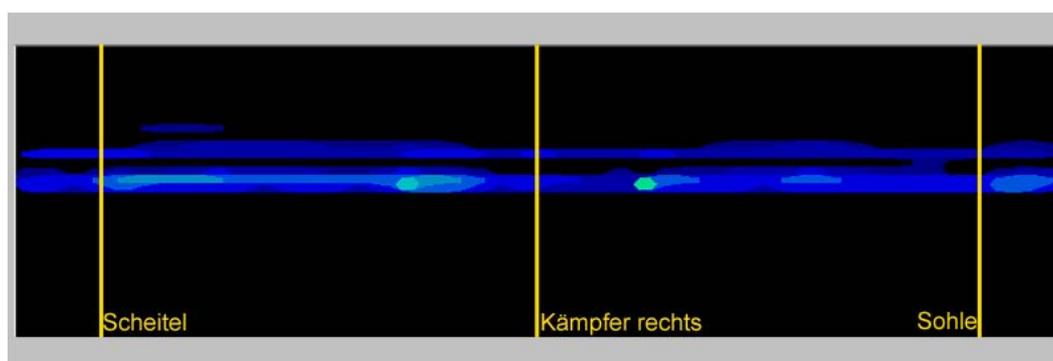


Abb. 3: Beispiel zur Messung des Anpressdrucks mittels Druckfolie an Rohrverbindungen DN 150.

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. [14]). 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.

3.2 Außendruckuntersuchung

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 3) 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. 4). Der Prüfraum wird an den Austrittsstellen der zu prüfenden Rohre durch zwei Dichtblasen abgeschlossen. Dabei werden die Dichtblasen mit einem Luftdruck von bis zu 7 bar von außen an die Rohrwandung angepresst.



Abb. 4 Vorrichtung zur Wasseraußendruckuntersuchung, bestehend aus einem Gusseisenrohr DN 600 mit Deckeln, die mit Einrichtungen zum Befüllen, Entlüften und zur Druckmessung versehen sind.

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 (vgl. Abb.5) sowie durch den ersten plötzlichen Abfall der Druckmesswerte (vgl. Abb. 6) erkennbar.



Abb.5: Wassereintritt bei einem Außenüberdruck von ca. 1,2 bar. Versagen des Dichtelementes.

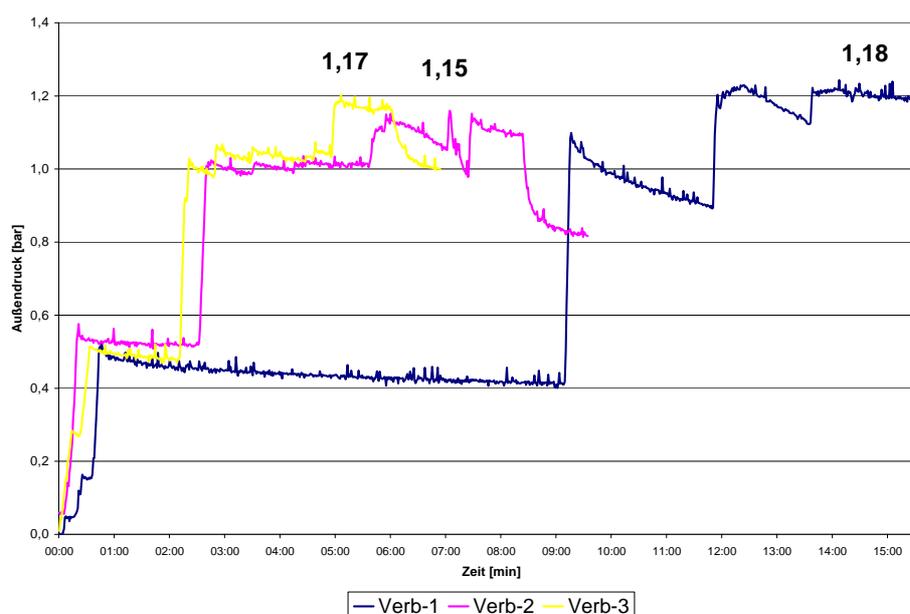


Abb. 6: Beispielergebnisse der Außendruckuntersuchungen an Rohrverbindungen DN150. Im Diagramm sind die Messwerte dreier Messungen aufgetragen. Die Höchstwerte geben den Versagensdruck bei den einzelnen Rohrverbindungen wieder.

3.3 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. Auch nach mehrjährigem Wachstum müssen die Wurzeln nicht zwangsläufig durch den Ringspalt in den Ringraum der Rohrverbindungen einwachsen.

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus Australien sowie den eigenen Versuchen mit mittelformatigen Versuchsansätzen 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 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. [21]). Der Versuchsaufbau der sogenannten Outside-In-Versuche ist in Abb. 7 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.

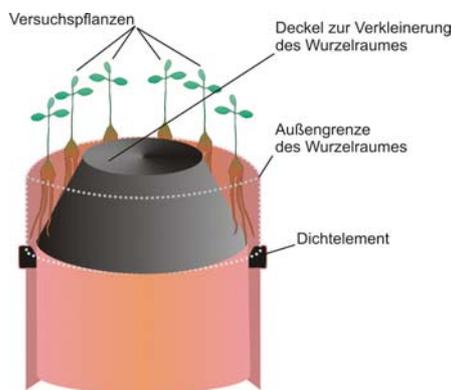


Abb. 7 Kulturgefäß zur Untersuchung der Durchwurzelung von Rohrverbindungen (vollständig zusammengeschoben).

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.

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. 8 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.



Abb. 8: 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. **D** wie **C**, Öffnung eines Kulturgefäßes aus Keramik, ohne Beeinträchtigung der vorhandenen Wurzeln.

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. Diese Wurzeln wuchsen daraufhin an der Grenzfläche Rohrmaterial/Substrat bzw. an der Grenzfläche Rohrmaterial/Dichtungsmaterial entlang. 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 Dichtelemente weiter oder, im Falle des Wachstums entlang des Dichtungsmaterials, in den Zwickel zwischen der Dichtung und dem Spitzende ein. Wenige Wurzeln befanden sich bereits unterhalb des Dichtungsmaterials, hatten dieses aber nicht völlig unterwandert (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.

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 Modifikationen der Rohrverbindingssituationen 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 Rohrverbinding auf die Art des Wurzelwachstums kontrolliert und reproduzierbar zu testen (vgl. Abb. 9).

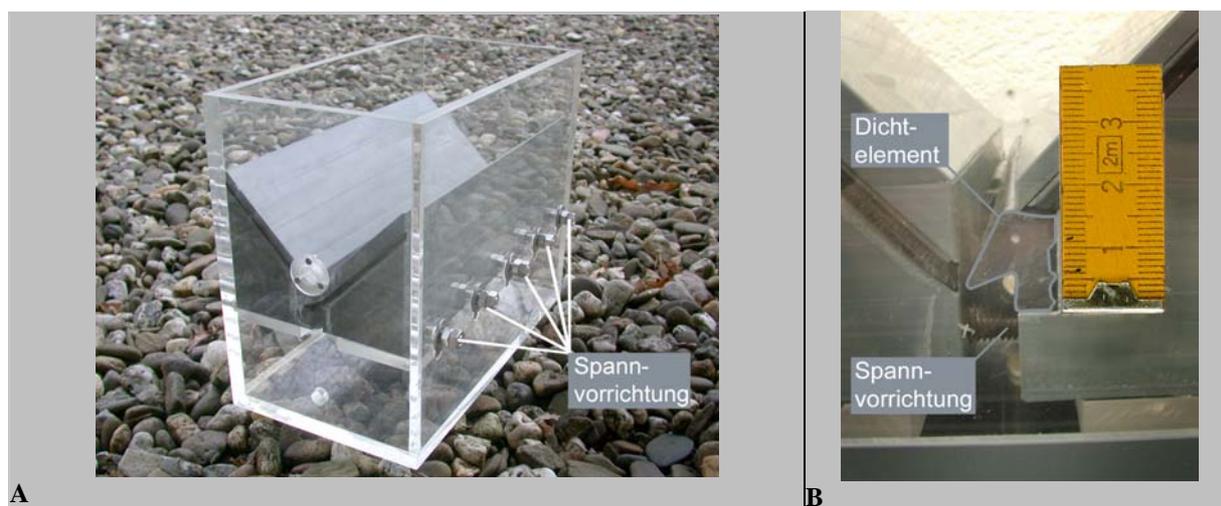


Abb. 9: Untersuchung des Wurzelwachstums an elastomeren Dichtelementen. **A** Seitenansicht der Vorrichtung. **B** Detail eines eingebauten Dichtungselementes. Der Querschnitt des Dichtelementes wurde für die Abbildung hervorgehoben.

3.4 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. 10 die Rohrverbindungsgeometrie zweier unterschiedlicher Rohrverbindungen dargestellt. Die Rohrverbindungen wurden in Längsrichtung aufgeschnitten. Der **Ringspalt** (in Abb. 10 mit **1** gekennzeichnet) bildet die Eintrittsöffnung in den **Ringraum** (in Abb. 10 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.

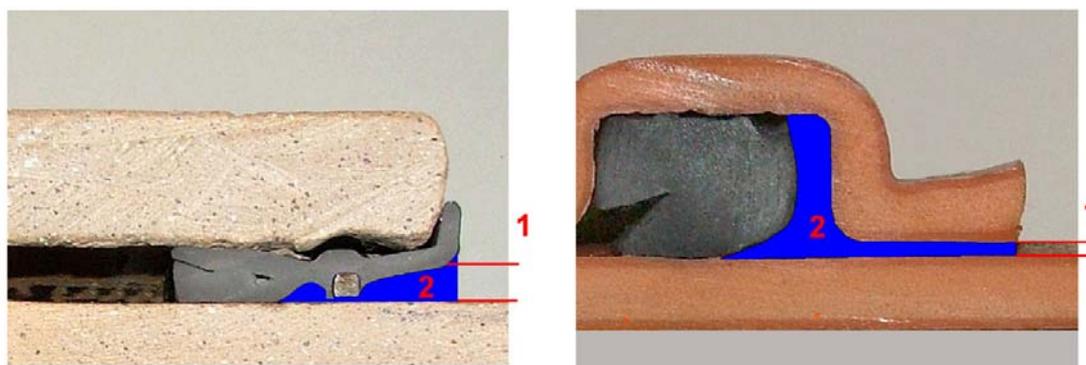


Abb. 10: Definition der Begriffe äußerer Ringspalt (1) und Ringraum (2) bei unterschiedlichen Verbindungstypen.

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.

4 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

Beispielhaft werden im Rahmen des Kurzberichtes die Ergebnisse der Untersuchungen über den Einfluss der *Porenraumunterschiede*, der *Regenerationsfähigkeit* von Wurzeln sowie dem *Wurzeldruck* von Gymno- und Angiospermen nachfolgend beschrieben.

4.1 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.

Für die Versuche wurden 6 Pflanzkisten aus Fahrzeugbauplatten (19mm; Birkenfurniersperrholz) mit den Außenmaßen 1000 x 400 x 200mm (= 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. 11). 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 bepflanzten 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.

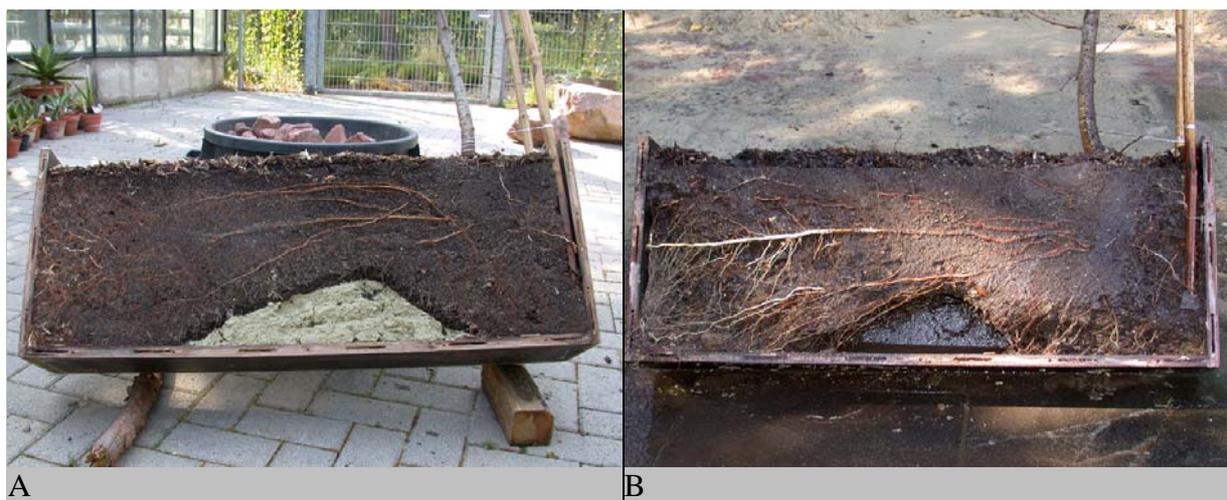


Abb. 11: Untersuchung des Einflusses des Porenraumes auf das Wachstum von Wurzeln. **A** Geöffnetes Kulturgefäß mit Bodenkörper aus Bentonit. **B** Der Ausbau des Bentonits erfolgte durch Ausspülen mit Leitungswasser. Dabei bleibt der Großteil der Wurzeln ohne Lageveränderungen erhalten.

Der Großteil der Pappelwurzeln zeigte 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. 100 mm 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. Im Gegensatz zur Vorgehensweise bei einer älteren Untersuchung [22], 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 Schrumpfungsrissen begünstigt wurde. Diese Fissuren ebneten den Wurzeln den Weg in das Bentonit, wobei durch das Gießwasser eingespültes Substrat das Wurzelwachstum zusätzlich gefördert haben könnte.

4.2 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 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).

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. 12). Andere Pflanzen zeigten hingegen ein ausgesprochen geringes bzw. kein Regenerationsvermögen (*Taxus*, *Pinus*, vgl. Abb. 13). 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.

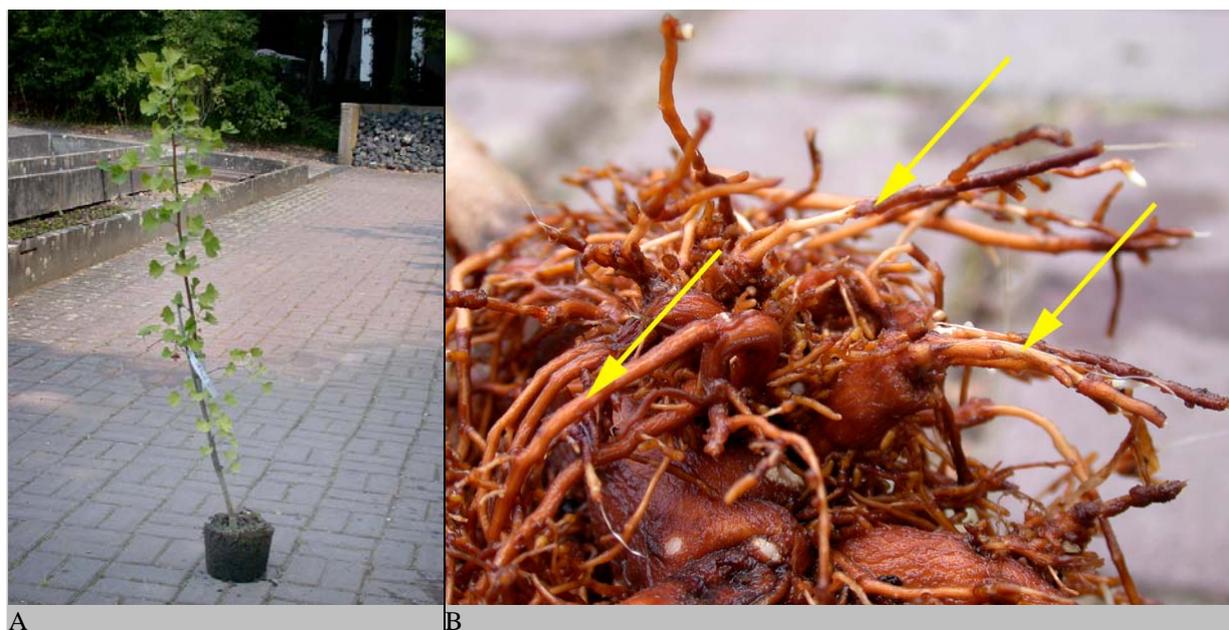


Abb. 12: Untersuchung zur Regeneration der Wurzeln unterschiedlicher Pflanzengruppen. **A** *Ginkgo biloba*. **B** Der Neuaustrieb der Wurzeln ist deutlich zu erkennen (Pfeile).

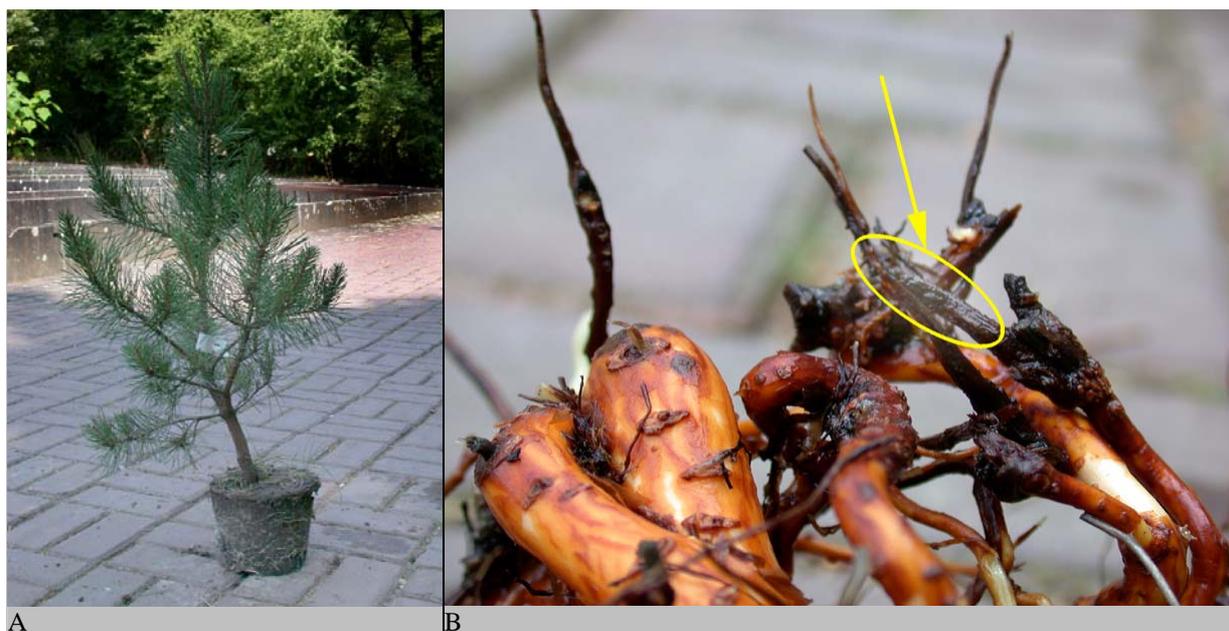


Abb. 13: Untersuchung zur Regeneration der Wurzeln unterschiedlicher Pflanzengruppen. **A** Kiefer *Pinus spec.* **B** Neuaustrieb der Wurzeln von *Pinus spec.* Der Neuaustrieb ist nur minimal erfolgt. (Pfeil)

4.3 Wurzelndruck von Gymnospermen und Angiospermen

Im Rahmen von [1] wurde bereits der Wurzelndruck 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. 4.2), 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. (Versuchsaufbau vgl. Abb. 14)

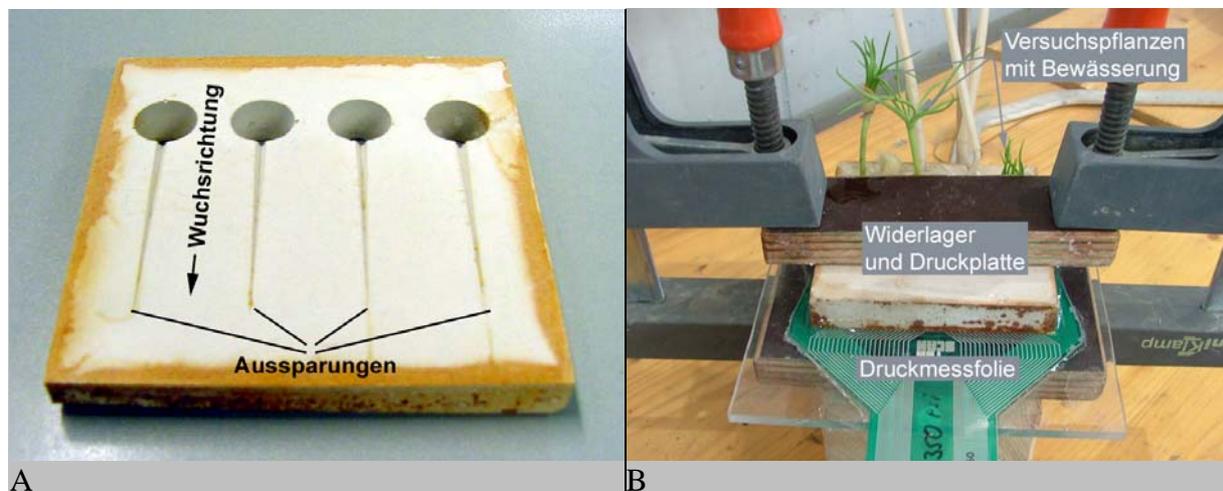


Abb. 14: Versuchsaufbau für Druckmessungen an Wurzeln. **A** Druckplatte aus Gips. Die braune Färbung wird durch Oxidation der Gussform ausgelöst, die als äußere Begrenzung bei Herstellung der Platten eingesetzt wurde und hat keine Auswirkungen auf den Verlauf der Versuche. **B** Versuchsaufbau zur Messung des Wurzeldrucks.

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. Der maximale Wurzeldruck an den Keimwurzeln von Araucarie (*Araucaria araucana*), 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 und Robinie (*Robinia pseudoacacia*) 8,8 bar. 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.

5 Schlussfolgerung

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.

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.

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. 12)), andere Pflanzen zeigten hingegen ein ausgesprochen geringes bzw. kein Regenerationsvermögen (*Taxus*, *Pinus* (vgl. Abb. 13)). 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. 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.

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 [10] und Australien [12] bestätigen diese Beobachtungen. Mit welchen Strategien die Wurzeln eine Rohrverbindung überwinden könnten, wurde bereits in [1] 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

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 (duktiles 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 Feinwurzelsatz.

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.

6 Ausblick

Die im Rahmen des Projektes eingesetzten Versuchseinrichtungen zur Prüfung der Wurzelfestigkeit von Rohrverbindungen stellen eine Möglichkeit dar, wie in Zukunft der Nachweis der Wurzelfestigkeit von Rohrverbindungen erbracht werden kann. Im Rahmen der Versuche wurden Rohrverbindungen DN 150 genutzt, die bedingt durch ihren kleinen Querschnitt im Falle eines Wurzeleinwuchs 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 zu standardisierendes Nachweisverfahren für die Wurzelfestigkeit von Rohrverbindungen sollte der eingesetzte Versuchsaufbau spätestens nach Beendigung der Versuchsreihen diskutiert werden. Im Ergebnis stehen Netzbetreibern dann wurzelfest geprüfte Rohrverbindungen für einen dauerhaften Netzbetrieb zur Verfügung. Darüber hinaus sollte die erarbeitete Prüfmethode auch für weitere Produkte, wie beispielsweise Rohre mit größeren Nennweiten oder Hausanschlussstutzen übertragbar sein.

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 eine 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-Informationen-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. [23]).

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. Aber auch Bäume, die in Unkenntnis von Leitungen der Ver- und Entsorgung Bäume in unmittelbarer Nähe von Leitungen gepflanzt sind als Gründe zu nennen für Konflikte zu nennen. Neben den Schäden durch Wurzeln an Rohrleitungssystemen entstehen auch Schäden durch Tiefbauarbeiten an Wurzeln in den Leitungsgräben. 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 im Rahmen der Arbeitsgruppe zu erarbeitende Arbeitsblatt verfolgt das Ziel, insbesondere auf der Basis aktueller Forschungsergebnisse, konkrete Hinweise für den Umgang mit Wurzeln und Leitungen zu geben, um so die Konflikte zwischen Netzbetreibern und Grünflächenämtern zu minimieren.

7 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] KUTSCHERA, L.: Wurzelatlas mitteleuropäischer Ackerunkräuter und Kulturpflanzen; DLG-Verlag Frankfurt am Main, 1960.
- [7] BRAUNE, W.; LEMAN, A.; TAUBERT, H.: Pflanzenanatomisches Praktikum I. 5. Auflage, 1987. G. Fischer Verlag, Stuttgart.
- [8] 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.
- [9] DIN 4060: Rohrverbindungen von Abwasserkanälen und -leitungen mit Elastomerdichtungen, 02 / 1998
- [10] RIDGERS, D.; ROLF, K.; STÄL, Ö.: Management and planning solutions to modern PVC- and concrete sewer pipes' lack of resistance to root penetration; Osnabrücker Baumpflegetage 2004
- [11] FUNKE KUNSTSTOFFE GMBH: Langzeittest beweist! Fabekun-HS-Kanalrohre sind wurzelfest! Produktkatalog der Fa. Funke Kunststoffe GmbH.
- [12] BURN, L.S.: Elastomeric Pipe Joint Performance – Sewer & Stormwater Pipelines; Präsentation auf der Sitzung der COST C15 – Tagung in Brüssel, Februar 2005. unveröffentlicht
- [13] AS 1260, Unplasticized PVC (UPVC), Pipes and Fittings for Drain Waste and Vent Applications; Australian/New Zealand Standard™, 1984, ungültig
- [14] DIN EN 1916: Rohre und Formstücke aus Beton, Stahlfaserbeton und Stahlbeton. Deutsche Fassung EN 1916: 2002
- [15] DIN EN 598: Rohre, Formstücke, Zubehörteile aus duktilem Gusseisen und ihre Verbindungen für die Abwasser-Entsorgung - Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung prEN 598, 2005
- [16] 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
- [17] 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

-
- [18] 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
- [19] STEINZEUG AG 2001. Steinzeughandbuch. Steinzeug AG, Eigenverlag, Köln
- [20] DIN EN 598: Rohre, Formstücke, Zubehörteile aus duktilem Gusseisen und ihre Verbindungen für die Abwasser-Entsorgung - Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung prEN 598, 2005
- [21] SITTE, P. ET AL.: Strasburger – Lehrbuch der Botanik. 35. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, Berlin.
- [22] 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
- [23] IKT- Institut für Unterirdische Infrastruktur, Forschungsantrag Umweltsicherer Kanalbau durch wurzelfeste Bettung der Rohre – Pflanzversuche in Osnabrück, Fördermittelgeber: DBU - Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück, Antragstellung 2006