



Wurzeleinwuchs in Abwasserleitungen und Kanäle



Wissenschaftliche Leitung

Prof. Dr. Thomas Stützel Dr.-Ing. Bert Bosseler

Projektleitung und Bearbeitung

Dipl.-Ing. Christoph Bennerscheidt Dipl.-Biol. Heiko Schmiedener

Bearbeitung

Ruhr-Universität Bochum
Lehrstuhl für Spezielle Botanik und Botanischer Garten
Prof. Dr. Thomas Stützel
Universitätsstraße 150
44780 Bochum

IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur Exterbruch 1 45886 Gelsenkirchen www.ikt.de

Auftraggeber:



Ministerium für Umwelt, Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen Wir danken allen projektbeteiligten Netzbetreibern für die weitreichende Unterstützung im Rahmen der zahlreichen Baumaßnahmen:

Dipl.-Ing. F. Großklags Tiefbauamt der Stadt Bochum

Herr K. Kroymann Wirtschaftsbetriebe Duisburg

Dipl.-Ing. B. Burger Stadtentwässerung Göttingen

Herr V. Ritzmann Tiefbauamt der Stadt Langenfeld

Dr.-Ing. R. Lunkenheimer Wasser und Abwasser

Fürstenberger Seengebiet

Dipl.-Ing. C.Kornmaier Tiefbauamt der Stadt Herten

Dipl.-Ing. C. Focke Stadtwerke Essen AG

Dipl.-Ing. G. Gottscholl

Dipl.-Ing U. Reisch Stadtwerke Quickborn

Dipl.-Ing. J. Hammermeister Stadt Rehburg-Loccum

Dipl.-Ing. H. Theißing Tiefbauamt der Stadt Münster

Dipl.-Ing. J.- S. Kleinkauf Tiefbauamt der Stadt Wuppertal

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

Prof. Dr. W. Burghardt Lehrstuhl für Angewandte Bodenkunde,

Universität Duisburg-Essen

1	VER	ANLASSUNG	1
2	PRO	BLEM- UND ZIELSTELLUNG	2
3	NAT	URWISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHER HINTERGRUND	4
3.1			5
	1.1	Aufbau und Funktion von Wurzeln	
	1.2	Wurzeln und Leitungen.	
3.2	Во	DEN UND BETTUNG	
3.2	2.1	Kanalbau in offener Bauweise	10
3.2	2.2	Wurzeln in Leitungsgräben	14
3.3	Ro	HRE UND ROHRVERBINDUNGEN	17
3	3.1	Materialien und Funktionsweisen	17
3	3.2	Keramikrohre	23
3	3.3	Betonrohre	25
3	3.4	Gussrohre	28
3	3.5	Kunststoffrohre	29
3.4	W	URZELFESTIGKEIT VON ROHRVERBINDUNGEN (PRÜFVERFAHREN)	34
3.4	4.1	Prüfung nach DIN 4060/DIN EN 681	34
3.4	4.2	Prüfung nach DIN 4062	36
3.4	4.3	Prüfung nach Entwurf des TC 155	36
3.4	4.4	Prüfung nach AS-1260-1984/1999	37
3.4	4.5	Untersuchungen des CSIRO, Australien	37
3.4	4.6	Prüfungen des TÜV Südwest	38
3.4	4.7	Prüfung der Wurzelfestigkeit von Abdichtungsbahnen nach dem FLL-Verfahren	39
4	AUF	GRABUNGEN AN 16 SCHADENSFÄLLEN	42
4.1	Pr	IVATE HAUSANSCHLUSSLEITUNGEN	43
4.	1.1	Bochum	43
4.	1.2	Duisburg, Ortslage I	50
4.	1.3	Göttingen, Ortslage I	57
4.	1.4	Göttingen, Ortslage II	62
4.	1.5	Göttingen, Ortslage III	66
4.	1.6	Göttingen, Ortslage IV	70
4.	1.7	Baumaßnahme Langenfeld	76
4.2	ÖF	FENTLICH BETRIEBENE KANÄLE	86
4.2	2.1	Fürstenberg, Ortslage I	86
4.2	2.2	Fürstenberg, Ortslage II	93
4.2	2.3	Herten	99
1	2 4	Essen	105

IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur		
4.2.5	5 Quickborn	106
4.2.6	6 Rehburg-Loccum	109
4.2.7	7 Münster	122
4.3	Anschlussleitungen für Regenwassereinläufe	131
4.3.1	Duisburg, Ortslage II	131
4.3.2	? Wuppertal	139
4.4	Schlussfolgerungen	142
5 E	XPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN	146
5.1	BODENUNTERSUCHUNGEN	146
5.1.1	! Umfang	146
5.1.2	Probenahme	148
5.1.3	Bodenart	150
5.1.4	Physikalische und chemische Merkmale	153
5.1.5	Porenraumgliederung (pF-Wassergehaltsbeziehung)	156
5.1.6	Schlussfolgerungen	159
5.2	PFLANZVERSUCHE MIT WEIDEN	160
5.2.1	Kulturversuche	160
5.2.2	2 Verhalten in simuliertem Abwasser und im Frischwasser	168
5.3	Erfassung von Wurzeldrücken	173
5.4	Analyse von Rohrverbindungen	177
5.4.1	Vorgehensweise und Versuchsaufbau	177
5.4.2	2 Keramik-/Steinzeugrohre	182
5.4.3	Rohre aus PVC	190
5.4.4	Tyton [®] -Verbindung, Saint-Gobain Gussrohr GmbH	193
5.4.5	GFK-FWC-Kupplung, Hobas Rohre GmbH	194
5.4.6	6 Rohre aus Polyethylen	195
5.4.7	7 Dreikammerdichtung, Betonrohre	196
6 V	VURZELFESTIGKEIT	197
6.1	EINFLÜSSE AUF DIE WURZELFESTIGKEIT	197
6.2	BEWERTUNG VON ROHRVERBINDUNGEN	198
6.3	PFLANZVERSUCHE ZUR BESCHREIBUNG VON ROHR-WURZEL-INTERAKTIONEN	202
7 Z	ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	
8 F	AZIT UND AUSBLICK	209
9 L	ITERATUR	214

Veranlassung

1 Veranlassung

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

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

Problem- und Zielstellung 2

2 Problem- und Zielstellung

Die Wurzel-Rohr-Interaktion wird bisher bei der Prüfung und Entwicklung von Rohrverbindungen sowie den Maßnahmen zur Vermeidung von Wurzeleinwuchs gar nicht oder nur als rein mechanisch und ungerichtet betrachtet. Studien belegen jedoch, dass das Wachstum von Wurzeln nicht nur durch die mechanische Beanspruchung, z.B. aus Windlasten, beeinflusst wird, sondern auch die Umweltbedingungen eine maßgebliche Rolle spielen. Zu diesen sind neben den Bodenverhältnissen auch die Eigenschaften der Leitungen, deren Verbindungen und die Eigenschaften der eingesetzten Verfüllmaterialien zu zählen [7], [8].

Die auf das Rohr und die Verbindung wirkenden Lastarten und Lastgrößen sowie die damit verbundenen Versagensmechanismen sind bisher nicht bekannt. Im Einzelnen lassen sich die folgenden Kernaussagen treffen:

- Die bisher vermuteten **Ursachen für Wurzeleinwuchs**, wie Flüssigkeitsmangel oder zu geringe Anpressdrücke des Dichtmittels, sind wissenschaftlich nicht belegt. In der Folge stützen sich die angewandten **Prüfverfahren** (z.B. DIN 4060 [5]) auf äußerst grobe Lastund Beanspruchungsmodelle und berücksichtigen nicht die mechanischen und biologischen Vorgänge bei Ablauf der Interaktion zwischen Wurzel und Leitung.
- Die Mechanismen bei Eindringen einer Wurzel in die Leitung sowie der Einfluss der Rohrverbindungseigenschaften auf das Wurzelwachstum, d.h. insbesondere die dem Eindringen entgegenstehenden oder dieses begünstigenden Faktoren, sind wissenschaftlich nicht belegt.
- In der Folge orientieren sich die angebotenen Produkte nur an den bisher verbreiteten Dicht-Prinzipien. Die Netzbetreiber sind, trotz Einsatz zertifizierter Rohrwerkstoffe und verbindungen, weiterhin mit dem Auftreten von Wurzelschäden konfrontiert [2], [3], [6].

Problem- und Zielstellung 3

Ziele des Vorhabens sind daher,

• die Ursachen für Wurzeleinwuchs in Leitungen wissenschaftlich zu belegen,

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

3 Naturwissenschaftlich-Technischer Hintergrund

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

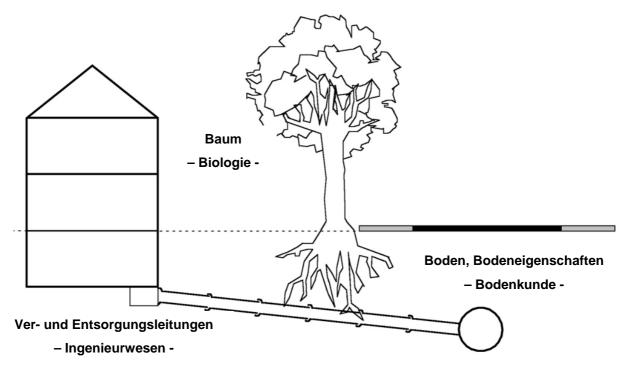


Abb. 1: Einflussbereiche zum Thema Wurzeleinwuchs und beteiligte Fachdisziplinen.

Die wesentlichen Fragestellungen zum Verständnis der Interaktion zwischen Wurzeln und Rohrverbindungen werden im vorliegenden Projekt entsprechend von den beteiligten Kooperationspartnern, dem Lehrstuhl für Spezielle Botanik an der Ruhr-Universität-Bochum (Biologie) und dem IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur (Ingenieurwesen), behandelt. Um aber auch den Weg der Wurzeln zur Rohrleitung im städtisch geprägten Untergrund besser verstehen zu können, wurde zur Beantwortung bodenkundlicher Fragen das besondere Fachwissen des Lehrstuhls für Angewandte Bodenkunde an der Universität Duisburg-Essen herangezogen [9].

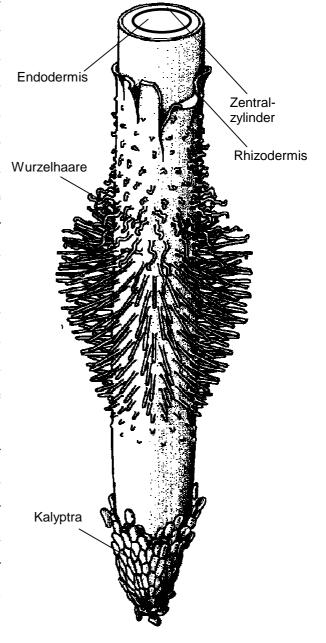
3.1 Wurzelwachstum

3.1.1 Aufbau und Funktion von Wurzeln

Wurzeln dienen der Aufnahme von Nährstoffen und Wasser aus dem Boden. Sie erfüllen ebenfalls die Funktion, die Pflanze im Boden zu verankern. 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. Das Wasser bzw. wässerige Nährstofflösung aus dem umgebenden Boden kann bei ausreichenden Konzentrationsunterschieden in die Wurzeln eindringen.

Die Wurzel ist an der Spitze von der Kalyptra bedeckt (Abb. 2). Deren Zellen werden im Laufe kontinuierlich des Wachstums nachgebildet. Diese Zellen ermöglichen das Gleiten der Wurzel im Boden und gehen verloren. Bei Wachstum werden ebenfalls Zellen gebildet, aus denen die Wurzel nach Wurzelhaare hinten vergrößert wird. Dabei dienen die Wurzelhaare, die sich außen auf der Rhizodermis befinden, als mechanisches Widerlager. Sie verhindern, dass die Wurzel durch das Wachstum aus dem Boden heraus gedrückt wird. Die Rhizodermis ist ein Abschlussgewebe, welches die Wurzel nach außen begrenzt. Dieses Abschlussgewebe kann nicht mitwachsen, es wird daher bei zunehmendem Alter und Durchmesser der Wurzel ersetzt. Die Wurzel enthält ein inneres Abschlussgewebe, die Endodermis, die für den **Transport** der dem Boden aus aufgenommenen Stoffe von entscheidender Bedeutung ist. In die Wurzel aufgenommenes Wasser kann bis zu dieser Barriere passiv in die Wurzel hineinströmen, ohne dass die Abb. 2:

Pflanze dafür Energie aufwenden muss.



Längsansicht einer Wurzelspitze [10].

Für die Passsage durch die Zellen der Endodermis muss die Pflanze allerdings Energie bereitstellen. Diese Energie wird durch Oxidation organischer Substanzen in den Zellen bereitgestellt und erfordert das Vorhandensein von Sauerstoff im Substrat. Die Endodermiszellen transportieren Lösung gegen den bestehenden Druck nach innen in den Zentralzylinder. Hier befinden sich Leitelemente, welche die unter Druck stehende Lösung in Längsrichtung der Pflanze transportieren. In der Wurzeln bewegt sich die Lösung passiv weiter, das heisst, ohne dass die Pflanze dazu Energie aufwenden muss. [7]

In allen Zellen der Pflanze wird der sogenannte Turgordruck aufrecht erhalten. Dieser resultiert aus der Elastizität der Zellwände und beruht auf der Tatsache, dass die Wurzeln bei entsprechenden Bodenbedingungen ständig Wasser nachliefern. Die Zellen werden stetig mit Wasser versorgt, damit Stoffwechselvorgänge ablaufen können. In den Organen der Pflanze besteht durch die stetige Aufnahme von Wasser ein Druck, der sich gleichmäßig in alle Richtungen ausbreitet. Der Druck, den eine Wurzel aufzubringen kann, ist mit dem Betrag des Turgordruckes im Inneren der Zellen gleich zu setzen. In den Zellen wird Druck bis in eine Größenordnung von 8,4 bar aufgebaut, der in gleicher Größenordnung nach außen auf feste Körper übertragen werden kann. [11]

Bei Wurzeln findet Längenwachstum nur in einem eng begrenzten Bereich der Spitze statt. Hier werden von den teilungsaktiven Wurzelinitialen, die unter der Oberfläche der Wurzel liegen, in Richtung der Wurzelspitze (distal) und in Richtung des Sprosses (proximal) Zellen gebildet (Abb. 3 A). Die nach hinten gebildeten Zellen haben durch Wandverstärkungen eine zunehmende mechanische Stabilität und Belastbarkeit. Die Zellwände der nach vorne abgegebenen Zellen lösen sich auf. Die Zellen verlieren ihren Zusammenhalt und sind gegeneinander verschiebbar. Die Wurzelspitze ist somit kein starrer Bohrer, sondern hat eine weiche gelatinöse Spitze. Die empfindliche Wurzelspitze wird durch den Wurzeldruck von den Initialen aus in das Substrat geschoben. Durch das Gleiten der Wurzelspitze auf den Kalyptrazellen wirkt die Wurzelspitze wie ein hydrostatischer Bohrer, der in die Poren zwischen Substratpartikeln getrieben wird. Die Kalyptra bildet und erweitert dabei einen Kanal, in den die Wachstumszone durch die kontinuierlich fester werdenden Zellverbindungen hinein gezwungen wird. Der Weg der Wurzeln zur Rohrleitung wird dadurch bestimmt, dass die elastische Kalyptra bei Wachstum der Wurzeln durch das Substrat in ihrer Form verändert wird. Die Kalyptra und damit auch die Wurzel wird in die Richtung abgelenkt, aus welcher der Wurzel der geringste Druck von den Substratpartikeln Α

entgegengebracht wird. Die Wurzel verschafft sich dort Raum, wo das umgebende Substrat am nachgiebigsten ist. [12]

Wurzeln lagern im Bereich der Spitze Stärkekörner ein, die der Schwerkraftwahrnehmung dienen [13]. Keimwurzeln stellen dadurch sicher, schnell in den Boden einwachsen zu können. Für Wurzeln in diesem Entwicklungszustand ist dies eine Notwendigkeit, damit Wasser und Nährsalze aus dem Boden aufgenommen werden können.

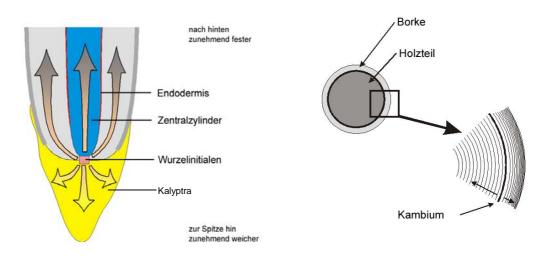


Abb. 3: Mechanische Wirkungen von Wurzeln. A Durch die Spitze. Hier bilden die Wurzelinitialen neue Zellen. Die Wurzelspitze wird in Längsrichtung vorangeschoben. B Durch Dickenwachstum wird quellfähiges Material in radialer Richtung gebildet [12].

В

Bei verholzten Wurzeln, wie sie bei Bäumen auftreten, tritt Wachstum in radialer Richtung auf. Mit zunehmendem Alter entsteht in Wurzeln ein Ring teilungsaktiver Zellen (Kambium). Hier wird nach innen Holzgewebe und nach außen Borke gebildet (Abb. 3 B). Die Borke besteht aus mehreren Schichten von toten Zellen. Diese begrenzen die Wurzeln nach außen. Der Durchmesser der Wurzel nimmt durch dieses Dickenwachstum von innen her zu. Als Folge wird das umgebende Substrat zurückgedrängt und komprimiert.

Modifikatorische Elemente der Umwelt beeinflussen das Wachstum von Wurzeln immens. So wird das Wachstum von Wurzeln durch ihren Kontakt mit festen Gegenständen (Steine, Bauwerke, Leitungen oder ähnliches) beeinflusst. Das Einleiten von Lasten in das Wurzelsystem verändert beispielsweise seine Spannungsverteilung und modifiziert dadurch sein Wachstum, weil Pflanzen im Verlauf ihres Wachstums eine gleichmäßige Verteilung der mechanischen Spannung auf ihrer Oberfläche anstreben. Die konstante Verteilung gewährleistet das Ausbleiben von lokal zu hohen Spannungen. Dadurch werden Sollbruchstellen oder lokal minderbelastete Bereiche, für die mehr Material und Energie

aufgewendet werden muss als nötig, vermieden. Jede Änderung der Spannungsverteilung auf der Oberfläche hat eine Veränderung im Wachstum zur Folge. [14]

3.1.2 Wurzeln und Leitungen

Die Versiegelung von Flächen in der städtischen Umgebung kann zur Folge haben, dass der Eintrag von Sauerstoff in den Boden vermindert ist. 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. [7, 15]

Der Nachweis eines Wurzeleinwuchses in eine Abwasserkanal ist durch Auswertung der Aufzeichnungen einer Kanal-Inspektionskamera möglich (Abb. 4). Das Erkennen bzw. der Nachweis von Wurzeln im Boden, bevor diese eine Leitung erreicht haben, ist ab einem Wurzeldurchmesser von etwa 0,5 cm mit Hilfe eines den Boden durchdringenden Radars möglich (vgl. [16]). Das Verfahren funktioniert jedoch nur in Böden, die frei von Fremdkörpern sind. Das Verrechnen des

Radarechos



Abb. 4: Bild aus dem Inspektionsvideo einer verwurzelten Mischwasser-Hausanschlussleitung.

erlaubt ein gutes Abbilden der Wurzeln in trockenen und/oder sandigen Böden. In lehmigen und/oder feuchten Böden werden die Radarwellen gestreut, so dass die Abbildung unscharf wird [16]. Eine Vermeidung von Wurzelschäden durch frühzeitiges Erkennen von Wurzeln im urbanen Boden erscheint somit kaum möglich.

Neben der Verdichtung des Bodens (vgl. Kapitel 3.2.2) können bei Einwuchs von Wurzeln in Abwasserleitungen und -kanäle weitere Faktoren eine Rolle spielen. So werden beispielsweise wassergefüllte Bodenporen für die Wurzeln erst nach Abtrocknen zugänglich und ermöglichen deren Wachstum. [15]

Der Inhalt von Abwasserleitungen besteht aus wässrigem Medium, in dem meist ein hoher Anteil von Salzen und organischen Komponenten gelöst ist – ein Einfluss des Leitungsinhaltes auf das Wachstum der Wurzel wird vielfach beschrieben [17,18]. Es wird zwischen drei Abwassermedien unterschieden [19]. Regenwasser wird demnach als Niederschlagswasser definiert. Schmutzwasser ist häusliches gewerbliches Abwasser aus Toiletten (Fäkal- oder Schwarzwasser), Sanitäreinrichtungen, Küchen und Waschmaschinen (Wasch- oder Grauwasser) und Abwasser aus Betrieben, die in die öffentliche Kanalisation ableiten. Mischwasser entsteht durch gemeinsames Abführen von Regen- und Schmutzwasser in einem Leitungssystem. Bei der Bewertung von Wurzeleinwuchs wird meist nicht nach dem in der Leitung transportierten Medium differenziert. Regenwasserleitungen sind nur nach Niederschlägen gefüllt und fallen nach kurzer Zeit wieder trocken, so dass hier eine Versorgung mit Wasser nur an Regenwettertagen oder kurz danach gegeben ist.

Das Innere der Leitung ist durch Verdunstung von Leitungsinhalt mit Wasserdampf gesättigt. Eine ausreichende Belüftung der Wurzeln zur Abfuhr von Kohlendioxid und zur Versorgung mit Sauerstoff ist in Abwasserleitungen kontinuierlich gegeben. Der große Anteil von Kanalluft im Leitungsquerschnitt von Abwasserleitungen steht Wurzeln für ihren Stoffwechsel zur Verfügung.

3.2 Boden und Bettung

Insbesondere in anthropogen beeinflussten Stadtböden lassen sich auf engem Raum unterschiedliche Böden mit unterschiedlichen Bodeneigenschaften vorfinden. Ein Grund ist die Nutzung des Bodenkörpers für Bauwerke der unterirdischen Infrastruktur. Zum einen werden üblicherweise Versorgungsleitungen in Tiefen bis zu 1,60 m verlegt (vgl. [20]). Zum anderen befinden sich dort Bauwerke der Ortsentwässerung wie Abwasserkanäle, Hausanschlussleitungen und Straßeneinläufe. Einen Eindruck der Nutzung und Verwurzelung des Bodenkörpers von Stadtböden gibt Abb. 5.

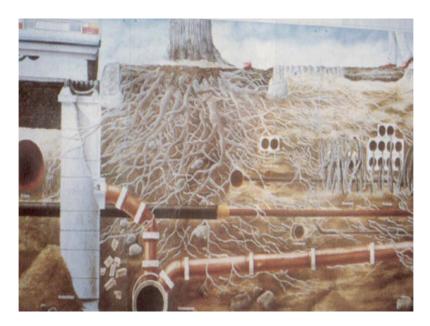


Abb. 5: Schematische Wiedergabe des städtischen Wurzelraumes, aus [7].

Die Tiefenlage der in der Regel als Freigefälleleitungen gebauten Kanäle steigt in Fließrichtung üblicherweise an. In [6] konnte eine Häufung der Verwurzelungsschäden an Hausanschlussleitungen in einem Bereich zwischen 2 und 3 m Tiefe festgestellt werden. Aber auch in Tiefenlagen bis 6 m traten solche Schäden auf.

3.2.1 Kanalbau in offener Bauweise

Insbesondere die Herstellung von Kanalisationen in der offenen Bauweise stellt einen starken Eingriff in den Bodenkörper dar. Sie erfolgt durch Ausheben eines Grabens, Verlegen der Leitung im Schutze einer Böschung oder eines Verbaus und anschließendes lagenweises Verfüllen des Grabens und sorgfältiges Verdichten des eingefüllten Materials (vgl. DIN EN 1610 [21]).

Bei dieser Bauweise werden nach [21] unterschiedliche Baugrundzonen definiert.

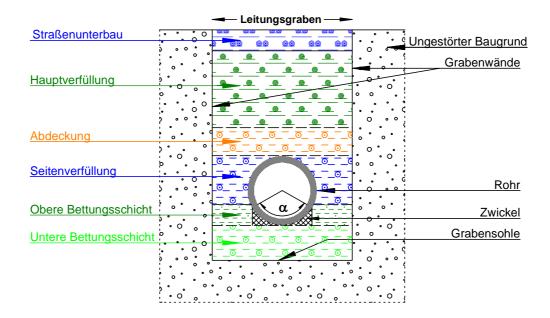


Abb. 6: Baugrundzonen nach DIN EN 1610 [21].

Diese werden als ungestörter Baugrund und als Leitungsgraben bezeichnet. Im Leitungsgraben unterscheidet man wiederum zwischen oberer und unterer Bettungsschicht, Seitenverfüllung, Abdeckung und Hauptverfüllung. Nicht definiert ist der sogenannte Zwickel, der sich räumlich zwischen den Kämpfern und der Rohrsohle befindet.

Die Bettungsschichten umfassen den Bereich zwischen Grabensohle und der durch den Auflagerwinkel α gegebenen Höhe am Rohrumfang. Bei direkter Auflagerung auf gewachsenen Boden gehört auch dieser zur Bettung.

Die Abdeckung stellt den Bereich im Leitungsgraben unmittelbar über dem Rohrscheitel dar. Ihre Mindestmaße sind 150 mm über dem Rohrschaft bzw. 100 mm über der Rohrverbindung. Die Seitenverfüllung ist gemäß [21] der Bereich zwischen Bettung und Abdeckung. Der Bereich oberhalb der Abdeckung bis zu einer gegebenenfalls vorhandenen Straßen- oder Gleiskonstruktion wird als Hauptverfüllung bezeichnet.

Je nach Erfordernis sind unterschiedliche Grabenquerschnitte vom geböschten Graben bis hin zu Gräben mit senkrechten Wänden möglich. Die Mindestbreite von Rohrgräben ist in DIN EN 1610 [21] festgelegt.

Die untere Bettungsschicht soll eine gleichmäßige Druckverteilung sicherstellen und muss daher in Anpassung an die Werkstoff- und Verbindungsart der einzelnen Rohre ausgebildet sein.

Als Voraussetzung für alle weiteren Arbeitsgänge wird zunächst die untere Bettungsschicht als stabile und feste Unterlage zur Aufbringung der Rohrleitung hergestellt, um spätere

Bodensetzungen und Rohrverschiebungen zu vermeiden. Wird die Grabensohle als untere Bettungsschicht verwendet, so soll sie nicht aufgelockert sein, oder muss ihre ursprüngliche Lagerungsdichte (Tragfähigkeit) durch besondere Maßnahmen (Verfestigung, Bodenaustausch) wieder erhalten. Anschließend ist die obere Bettungsschicht und die Seitenverfüllung herzustellen. Dabei muss die eingebaute Rohrleitung mit Bodenmaterial umgeben sein, dessen Zusammensetzung (z.B. Größtkorn bis 40 mm bei Rohren größer DN 200 bis DN 600) im Hinblick auf die mechanische Widerstandfähigkeit der Rohre und der Rohrumhüllung geeignet ist [21]. Wenn die Rohre mit einer werkseitigen Schutzumhüllung umgeben sind oder wenn der Rohrwerkstoff keine Rohrumhüllung erfordert (z.B. Betonrohre), können besondere Vereinbarungen über die Anforderungen an das Material getroffen werden. Hierbei ist zu beachten, dass keine negativen Einflüsse hinsichtlich folgender Gesichtspunkte auftreten:

- aktiver und passiver Korrosionsschutz,
- Dränagewirkung im Rohrgraben,
- > Standfestigkeit der Bettung gegenüber dem umliegenden Boden.

In Verkehrsflächen ist nach [22] für den Bereich der Leitungszone, also untere/obere Bettungsschicht, Seitenverfüllung und Abdeckung, ein gut verdichtbarer Füllboden einzubringen, sofern nicht besondere Vereinbarungen oder Anforderungen vorliegen. Dieser ist lagenweise einzubauen und ausreichend zu verdichten. Bei Außendurchmessern der Rohre von mehr als 400 mm muss die Leitungszone in mehr als zwei Arbeitsgängen verfüllt und verdichtet werden. Bereiche der Leitungszone, die sich nicht einwandfrei verfüllen und verdichten lassen (z.B. obere Bettungsschicht unter beengten Verhältnissen), sind mit Beton, Porenleichtbeton oder einem Boden-Bindemittel-Gemisch zu verfüllen [23].

Die Sicherheit einer Rohrleitung hängt wesentlich von der Gestaltung und Ausführung der Bettungsschichten und der Seitenverfüllung ab [23]. Nur durch eine fachgerechte Ausführung können Risse, Verformungen, Punktlagerungen usw. vermieden werden, die ansonsten zu Undichtigkeiten, Nutzungseinschränkungen, Sanierungsbedarf oder gar zur Unbrauchbarkeit führen. Die entscheidenden Problemzonen stellen dabei die schwer zugänglichen Zwickel (vgl. Abb. 7) dar. Besonders in schmalen Rohrleitungsgräben sind die Zwickel schlecht erreichbar, so dass dort Bereiche geringer Verdichtung auftreten können.

In Abb. 7 werden die beengten Platzverhältnisse in einem Rohrleitungsgraben und der Versuch der Verdichtung des Zwickelbereiches in der Praxis gezeigt.



Abb. 7 A Platzverhältnisse in einem engen Rohrgraben [Güteschutz Kanalbau]. B Zwickelverdichtung bei kleinen Rohrdurchmessern u. ausreichenden Platzverhältnissen [24]. C Platzverhältnisse in einem engen Rohrgraben [24]. D Zwickelverdichtung bei großen Rohrdurchmessern und ausreichenden Platzverhältnissen [Güteschutz Kanalbau].

Für den fachgerechten Einbau der Rohrleitung ist für die obere Bettungsschicht eine herzustellen, die mindestens Lagerungsdichte Lagerungsdichte der der Bettungsschicht entspricht. Hierbei ist das Beistopfen im Bereich der seitlichen Rohrzwickel mit besonderer Sorgfalt durchzuführen. Der **Einsatz** schmalen, dem von Rohrleitungsdurchmesser angepassten Handstampfern ist in der Regel hier unumgänglich [25]. Die im Normen- und Regelwerk geforderten Werte für die Verdichtung werden allerdings dabei in der Regel nicht erreicht. Eine unzureichende Verdichtung dieses Zwickelbereichs, auch unter wirtschaftlichen Zwängen, hat häufig zur Folge, dass der in der Bemessung des Rohres vorgesehene Auflagerwinkel nicht eingestellt werden kann.

Die bestehenden Schwierigkeiten bei der Verdichtung des Zwickelbereichs haben in der Praxis dazu geführt, dass häufig das einzubauende Bodenmaterial bis auf Höhe des Kämpfers geschüttet und anschließend verdichtet wird (Abb. 8) [26].



Abb. 8 Verlegung von Leitungen in offener Bauweise. **A, B, C** Anschüttung des Rohres bis zur Höhe des Kämpfers und anschließende Verdichtung.

Dies geschieht in der Hoffnung, dass die Bodenverdichtung bis in den Zwickelbereich hineinreicht. Es wird deutlich, dass eine solche Verdichtungsart oftmals nicht den Forderungen des Normen- und Regelwerkes nach einem definierten Verdichtungsgrad im Zwickelbereich gerecht wird [26].

3.2.2 Wurzeln in Leitungsgräben

Pflanzen erhalten durch das Wurzelwachstum im Boden zum einen mechanischen Halt. Zum anderen entnehmen sie dem Boden Wasser und Nährstoffe für ihr Wachstum [27]. Darüber

hinaus sind Wurzeln die Atmungsorgane der Pflanzen, über die 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 [28], [29]. Feine Poren werden von Wurzelhaaren durchzogen. Damit ist die Erfassung der größeren Porendurchmesser für das Wurzelwachstum zum Kanalrohr wesentlich. Das Durchdringen feinerer Poren durch 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 [28] und [29] 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. [30], [31], [32] und [33]).

Der Gehalt des Bodens an Grobporen ist vor allen von der Rohdichte des Bodens abhängig. Je geringer die Rohdichte ist, um so höher sind die Gehalte an Grobporen [34], [35], [36]. Damit bestehen bereits früh erkannte Beziehungen zwischen Rohdichte und Durchwurzelung des Bodens. Veihmeyer u. Hendrickson (1948) [37] 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 Feuchteverhältniss durchgeführt. Mit Hilfe eines Penetrometers lassen sich die von Pflanzenwurzeln überwindbaren Durchwurzelungswiderstände ermitteln. Dieser Wert ist abhängig von

- der Korngröße und der Korngößenverteilung im Boden,
- der Rohdichte des Bodens, d.h. der Lagerungdichte 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 haben (vgl. [38], [39],

[40], [41] und [42]). Dies erschwert aber auch die Zuordnung der Merkmale wie Korngrößenzusammensetzung und Rohdichte zu den Druckwiderständen [43].

Das Wurzelwachstum wird deutlich verringert oder hört bei mit Penetrometern ermittelten Druckwiderständen von über 2 Mpa (vgl. [44] und [45]), 3 MPa (vgl. [46]) und nach anderen Angaben (vgl. [47]) bei 5 MPa auf. Allerdings scheinen die anhand von Penetrometermessungen ermittelten, von Pflanzenwurzeln überwindbaren Durchwurzelungswiderstände deutlich überschätzt [48] 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 eine Durchwurzelung. unterstützt Dabei kann die Pflanze Hauptwurzelsystemen ohne starke Seitenverzweigung Bodenbereich durchwachsen, die ihr Wasser- und Nährstoffe nicht ausreichend anbieten oder deren Erschließung durch Feinwurzeln infolge hoher Bodendichte nicht möglich ist [49], [50]. 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 [51]. 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. Während stärkerem Wasserentzug aus dem Boden in trockeneren Jahreszeiten wird der Massenfluss und damit die Kaliumaufnahme abnehmen.

Die Wurzelatmung erfordert ein Grobporensystem, das frei von Wasser ist und somit Sauerstoffzufuhr ermöglicht. Sauerstoffmangel Luftarmut erzeugt [52] und Kohlendioxydüberschuss [53], was das Wurzelwachstum hemmt. Bei starkem Sauerstoffmangel sterben die Wurzeln ab [54]. Ein wasserfreies Grobporensystem liegt vor bei

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

Als ausreichende Luftkapazität werden 7 Vol. % [55], als nicht ausreichend unter 5 Vol. % [53] angegeben.

Der Gasaustausch erfolgt über Diffusion [56], [57]. Eine hohe Diffusion wird bei hohen Grobporengehalten und hoher Porenkontinuität vorliegen [58]. 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, die die Wasseraufnahme stören. Entsprechend werden pH-Wert-Untersuchungen durchgeführt. 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.

3.3 Rohre und Rohrverbindungen

3.3.1 Materialien und Funktionsweisen

Die fortschreitende Entwicklung im Leitungsbau hat eine Fülle verschiedener Rohrwerkstoffe und Verbindungstechniken hervorgebracht.

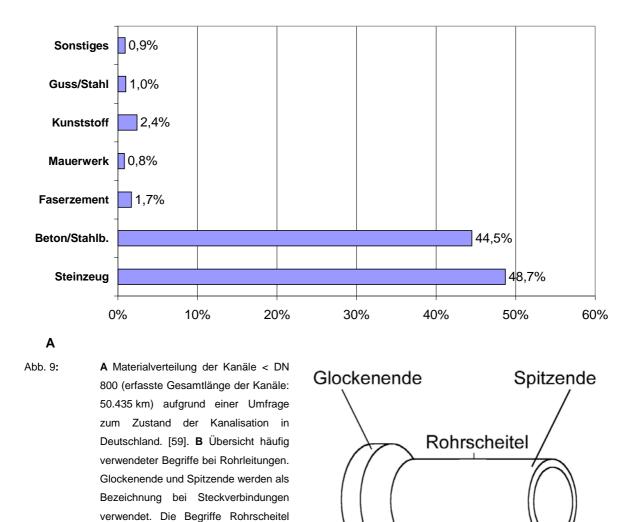
Abwasserkanäle wurden zunächst fast ausschließlich aus hartgebrannten Ziegeln (Kanalklinker) und etwa ab 1900 aus Kostengründen und zur Beschleunigung des Arbeitsprozesses verstärkt aus Beton hergestellt. Der überwiegende Teil der Kanalisation besteht heute aus vorgefertigten Rohren unterschiedlicher Werkstoffe, insbesondere aus Keramik (Steinzeug) und Beton (vgl. Abb. 9 A).

Rohrsohle

Rohrleitungen.

gelten

für



In jüngerer Zeit werden für die unterirdische Ableitung von Abwasser Kunststoffrohre sowie Rohre aus duktilem Gusseisen, Faserzement oder Polymerbeton eingesetzt. Die Rohre unterscheiden sich zum einen durch den verwendeten Rohrwerkstoff. Zum anderen unterscheiden sie sich durch ihre Rohrverbindungen. In DIN 19543 [60], der Vorgängernorm zur jetzt gültigen DIN EN 476 [61], wurde noch zwischen acht unterschiedlichen Rohrverbindungsarten und den dazugehörigen Dichtmitteln unterschieden:

В

Rohrsohle

 Eine Steckverbindung ist eine bewegliche Rohrverbindung, deren Dichtwirkung durch Zusammenstecken von Spitzende und Muffe oder Kupplung in Verbindung mit einem elastischen Dichtmittel erzielt wird.

- Eine **Spannverbindung** ist eine bewegliche Rohrverbindung, deren Dichtwirkung durch Spannen einer über die zu verbindenden Rohrenden greifenden Manschette erzielt wird.
- Eine **Schraubverbindung** ist eine bewegliche Rohrverbindung, deren Dichtwirkung durch Zusammenstecken von Spitzende und Muffe und anschließendes Verpressen eines elastischen Dichtmittels durch einen Schraubring erzielt wird.
- Eine **Stopfbuchsenverbindung** ist eine bewegliche Rohrverbindung, deren Dichtwirkung durch Zusammenstecken von Spitzende und Muffe und anschließendes Verpressen eines elastischen Dichtmittels durch einen Stopfbuchsenring erzielt wird.
- Eine **Klebeverbindung** ist eine Rohrverbindung, deren Dichtwirkung durch Verkleben der zu verbindenden Rohrenden erzielt wird. Je nach Art des verwendeten Klebstoffes bzw. Dichtmittels können starre kraftschlüssige oder bewegliche, nicht kraftschlüssige Klebeverbindungen hergestellt werden.
- Eine **Stemmverbindung** ist eine starre Rohrverbindung, deren Dichtwirkung durch Zusammenstecken von Spitzende und Muffe und anschließendes Einstemmen eines Dichtmittels in den Muffenspalt erzielt wird. Der verbleibende Muffenspalt wird mit einem Abschlussstoff ausgefüllt.
- Eine **Schweißverbindung** ist eine starre Rohrverbindung, deren Dichtwirkung durch Verschweißen der Rohre erzielt wird.
- Eine **Flanschverbindung** ist eine starre Rohrverbindung, deren Dichtwirkung durch Verpressen eines Dichtmittels zwischen den Flanschen erzielt wird.

In den Abwassernetzen werden heute in der Regel Steckverbindungen verwendet. Übliche Steckverbindungen sind Muffenverbindungen oder Verbindungen mit Überschiebkupplungen. Bei der Muffenverbindung wird das Spitzende eines Rohres in die beispielsweise als Glocke geformte Muffe des nächsten Rohres eingeschoben (s. Abb. 9 B). Rohre, die mit Überschiebkupplungen zusammengesetzt werden, haben keine angeformte Muffe (vgl. Abb. 11).



Abb. 10: Beispiel einer Muffenverbindung [62].

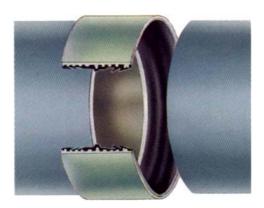


Abb. 11: Beispiel einer Rohrverbindung mit Überschiebkupplung [63].

Sie werden stumpf bis zum Anschlag in die Überschiebkupplung geschoben. Geschweißte Rohrverbindungen werden im Kanalbau insbesondere beim Einsatz des Rohrwerkstoffs Polyethylen verwendet. Spannverbindungen werden beispielsweise dann eingesetzt, wenn nachträglich in einen bestehenden Rohrstrang ein Abzweig eingebaut werden muss. Die Spannverbindung hat in diesem Fall, im Gegensatz zur Überschiebkupplung, keinen Anschlag. Das Dichtelement läßt sich komplett auf eines der zu verbindenden Rohre schieben. Der Abzweig wird eingesetzt, das Dichtelement bis zu Hälfte über die beiden stumpf aneinander liegenden Rohre geschoben und die Dichtwirkung durch Verspannen des Elementes mit Hilfe eines Werkzeuges (Schraubendreher o.ä.) erreicht (vgl. Abb. 12).



Abb. 12: Beispiel einer Spannverbindung.

Steckverbindungen werden mit **elastischen Dichtmitteln,** d.h. mit Elastomeren (vgl. DIN 7724 [64]), abgedichtet. Sie müssen den Anforderungen nach DIN 4060 [65] entsprechen und ein gleichmäßiges Gefüge besitzen. Das bedeutet, ihre Oberflächen dürfen keine Fehler und Unregelmäßigkeiten aufweisen, die ihre Funktion stören können [66]. Ihre Dichtwirkung gegen unter Druck stehende Flüssigkeiten ist abhängig von den durch die Verformung des Dichtmittels entstehenden gummielastischen Rückstellkräften [17]. Es kann zwischen sogenannten Lippendichtungen und Kompressionsdichtungen unterschieden werden. Bei Lippendichtungen wird das Elastomer wie eine Lippe ausgeformt (vgl. Abb. 13). Diese Lippe lässt sich beim Zusammenfügen einer Rohrverbindung leicht zur Seite schieben. Die Einschubkräfte sind verhältnismäßig gering und erleichtern somit den Einbau. Die Lippe wird dabei mechanisch auf Biegung belastet (vgl. Abb. 14).

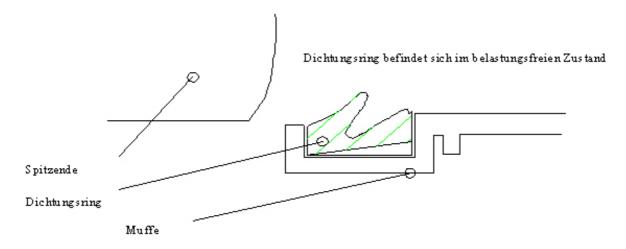


Abb. 13: Elastomerdichtung vor dem Zusammenfügen zweier Rohre, Lippendichtung.

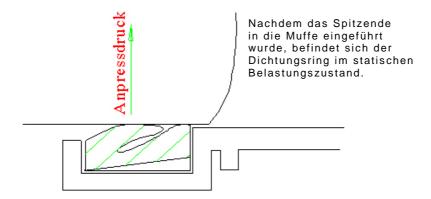


Abb. 14: Aufgrund der Rückstellkräfte des Elastomers resultierender Anpressdruck, Lippendichtung.

Bei Kompressionsdichtungen hingegen muss beim Zusammenfügen der Rohre die Dichtung komprimiert werden. Aufgrund ihrer Geometrie sind diese Dichtungen überwiegend druckbeanspruchte Bauteile (vgl. Abb. 15).

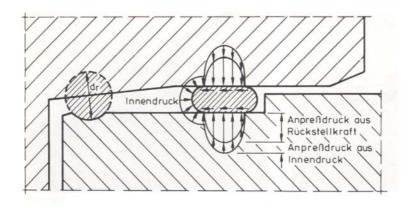


Abb. 15: Funktionsweise einer Kompressionsdichtung am Beispiel einer Rollringdichtung [17].

Biegemomente und Längskräfte können Elastomerdichtungen nicht übertragen. Ihre Verformbarkeit bei gleichzeitiger Dichtheit wird aber genutzt, um beabsichtigte oder unbeabsichtigte Lageänderungen der Rohrverbindung auszugleichen [67]. Solche Lageänderungen sind Abwinklungen und Versätze.

Folgende Werkstoffe können zur Herstellung von elastischen Dichtmitteln eingesetzt werden [68]:

- Polyurethan (PUR)
- Nitrilkautschuk (NBR)
- Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR)
- Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM)

Im Bestand heutiger Kanalnetze befinden sich somit eine Vielzahl verschiedener Verbindungen und Werkstoffe [2].

Plastische Dichtmittel werden beim Neubau nur in Ausnahmenfällen eingesetzt. Ihre Dichtwirkung gegen unter Druck stehende Flüssigkeiten ist abhängig von den Adhäsionskräften zu den Fugenflanken und dem temperaturabhängigen Fließverhalten [17]. Bei Sanierungen von Abwasserleitungen werden sie allerdings als Verpressmittel eingebracht, um nach dem Aushärten sowohl Rohrverbindungen als auch Risse abzudichten.

3.3.2 Keramikrohre

Keramikrohre werden in Deutschland seit 1842 hergestellt. Dazu wird ein Gemisch aus Ton und Schamotte (gebrannter, feuerfester Ton) geformt und verdichtet, anschließend getrocknet und nach einer Glasur bis zum Sintern gebrannt. Es entsteht ein dichter, korrosionsbeständiger Werkstoff, der auch als Steinzeug bezeichnet wird.

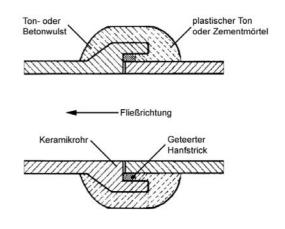
3.3.2.1 Materialeigenschaften

Die Rohre zeichnen sich durch eine gute chemische Beständigkeit und eine hohe Abriebfestigkeit aus. Die Oberfläche der Rohre ist sowohl innen als auch außen glatt und glasiert. Die Rohrwand ist annähernd gasdicht. Nachteilig ist die hohe Sprödigkeit sowie das hohe spezifische Gewicht und die Schlagempfindlichkeit des Materials. [69, 70]

3.3.2.2 Rohrverbindungen

Die Verbindung von Steinzeugrohren erfolgt noch heute zum größten Teil mit Muffen, deren Tiefe mindestens 70 mm beträgt und mit der Nennweite auf 105 mm zunimmt. Zur Aufnahme der Dichtung dient der 10 mm bis 20 mm breite Ringraum zwischen Muffe und Spitzende [17].

Bis 1925 wurden zur Abdichtung der Rohrverbindungen zwei bis drei Zentimeter starke Teerstricke (geteerter Hanfstrick) in den Ringspalt der Muffenverbindungen eingelegt und die Muffe mit einer Lage plastischem Ton oder Kalk- bzw. Zementmörtel umhüllt [71]. Dabei diente der Ton bzw. der Mörtel als Dichtungsmittel und der Teerstrick als Absperrelement, um Abb. 16: das Eindringen des Tons oder Mörtels in das



Längsschnitt Ton-/Mörteldichtung mit Hanfstrick, aus [72], verändert.

Rohrinnere zu verhindern (Abb. 16). Diese Dichtungssysteme wurden häufig mit mangelnder Sorgfalt ausgeführt, so dass Teerstrick und Ummörtelung entweder nicht sachgemäß angebracht wurden oder ganz fehlten. Bereits im Jahr 1910 stand fest, dass die Tonschicht gegen die Einwirkungen von Grundwasser und gegen das Eindringen von Regenwürmern und Wurzeln nicht beständig ist. Des Weiteren wurde die Unbeständigkeit von geteerten Hanfstricken als Dichtungselement bei dauerhaftem Kontakt mit Abwasser beobachtet. Im Jahr 1925 wurde erkannt, dass sich die Konsistenz von Tondichtungen bei einem Wechsel von Durchfeuchtung und Austrocknung verändert und Undichtigkeiten auftreten können. [73]

Nach dem Jahr 1910 wurde ein Abdichtungsverfahren angewendet, bei dem die mit Hanfstrick versehene Muffe fast durchgängig mit einem geschmolzenen dünnflüssigen Asphaltkitt vergossen wurde. Dieses geschah unter der Verwendung von Gießringen oder Gießschellen. Diese Vergussmuffen wurden um 1955 durch eine mit Vergussmasse oder einem Dichtring versehene Konusdichtung abgelöst [17].

1965 wird ein Dichtungssystem eingesetzt, bei dem das Dichtungselement fest mit dem Rohr verbunden ist. Das System wird im Werk mit einer sogenannte Steckmuffe K (ab DN 200) oder seit 1967 mit einer Steckmuffe L (für DN 100 – DN 200) gefertigt. Bei der Steckmuffe L ist ein Lippendichtring aus Kautschuk-Elastomer fest mit der Muffe verbunden. Bei der Steckmuffe K besteht das Dichtelement aus Polyurethan oder Polyester, das in der Muffe und am Spitzende angegossen wird (Abb. 17) [17]. Außerdem existieren heute muffen-

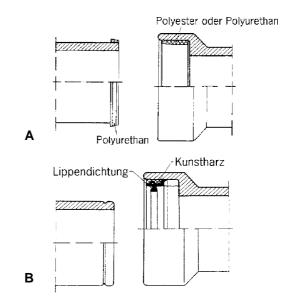


Abb. 17: Keramikrohr. **A** mit Steckmuffe K. **B** mit Steckmuffe L [74].

lose Keramikrohre mit glatten Enden für den unterirdischen Vortrieb ab DN 150, die auch für Hausanschlüsse verwendbar sind. Rohre mit DN 150 werden mit passgenauen steifen Kupplungsmanschetten aus einem kautschuküberzogenen Polypropylen-Stützkörper verbunden [75].

Eine Ausnahme stellen Steinzeugrohre der Fa. Euroceramic mit der Markenbezeichnung Eurotop dar. Diese Rohre für die offene Bauweise werden unglasiert und muffenlos ausgeliefert. Die Verbindung zwischen den Einzelrohren wird durch Überschiebkupplungen hergestellt.

3.3.3 Betonrohre

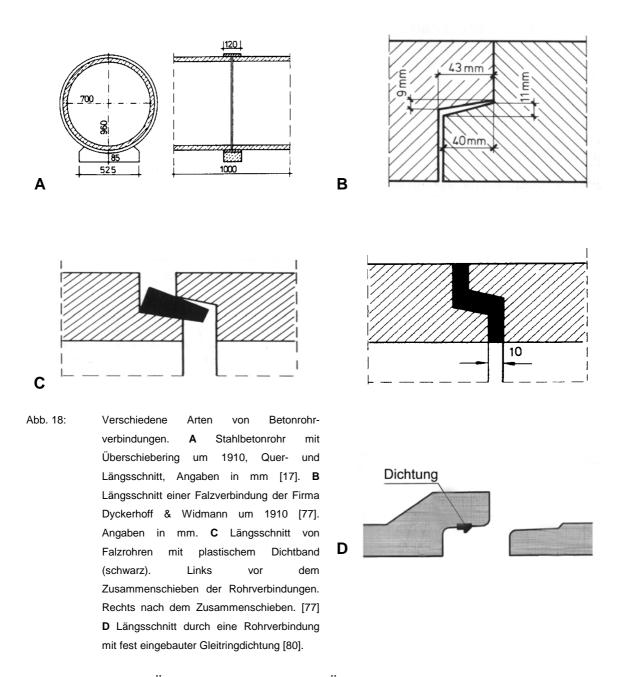
Erste Betonrohre wurden in Deutschland bereits um 1850 nach der Gründung der ersten Zementfabriken hergestellt. Die Fertigung und der Einsatz in größeren Mengen fand jedoch erst nach 1880 statt. Die ersten Betonrohre wurden als Kreisquerschnitt mit und ohne Fuß in Nennweiten von DN 75 bis DN 1000 angeboten und besaßen überwiegend Baulängen von 1,0 m. Normungen existieren seit 1923. Die heutigen Betonrohre werden nach DIN EN 1916 [76] gefertigt. Die Nennweiten von Betonrohren mit Kreisquerschnitt liegen zwischen DN 100 und DN 4000 [77].

3.3.3.1 Materialeigenschaften

Betonrohre zeichnen sich durch eine hohe Druck- und Abriebfestigkeit aus. Nachteilig ist die geringe Beständigkeit gegen Säuren und aggressives Grundwasser. Die Rohre haben sowohl innen, als auch außen eine rauhe Oberfläche. Die Wandungen der Betonrohre sind gasdurchlässig. [78, 79]

3.3.3.2 Rohrverbindungen

Die Verbindungen der ersten Betonrohre wurden durch eine Ummantelung der direkt voreinander gestoßenen muffenlosen Rohrenden ausgeführt. Sie bestanden aus einer ca. 0,05 m starken Mörtelschicht, in die ein Drahtgewebe zur Verstärkung der Schicht eingelegt wurde. Abb. 18 A bis D zeigt eine Übersicht gebräuchlicher Rohrverbindungen von 1910 bis heute.



Um 1910 wurden Überschiebemuffen bzw. Überschieberinge aus Beton für muffenlose Rohrenden sowie Falzverbindungen eingesetzt, die sich allmählich durchsetzten. Den Falzverbindungen wurden vor dem Zusammenschieben der Rohre Zementmörtel als Dichtungsmittel auf die Nut aufgestrichen. Die äußere Fuge (wenn möglich auch die innere) wurde verstrichen und von außen eine Wulst aus Zementmörtel um die Verbindungstelle gelegt. Zementmörtel wurde ebenfalls für die Abdichtung von Betonrohren mit Muffen eingesetzt, die erstmals im Jahr 1939 genormt wurden [71].

Ab 1951 wurden Kitte bzw. Spachtelmassen und Bänder aus plastischen, kaltverarbeitbaren Dichtungsmitteln für Betonrohre mit Falz- und Muffenverbindungen eingesetzt (Abb. 18 C). Diese füllen die umlaufende Fuge beim Zusammenfügen der Rohre [71].

Nach 1960 kommen die bis heute verwendeten Elastomerdichtungen für Muffenverbindungen zum Einsatz. Die verbreiteste Art der Elastomerdichtungen war die Rollringdichtung. Der im Querschnitt runde Elastomerring wird unter Vordehnung auf das Spitzende des Rohres aufgezogen und rollt unter gleichzeitiger Verformung beim Überschieben der Muffe des angrenzenden Rohres in seine endgültige Lage (vgl. Abb. 15). Die Dichtwirkung wird durch die beim Zusammenpressen des Dichtrings entstehende Anpresskraft (Rückstellkraft) bewirkt [17]. Rollringdichtungen sind nach der FBS-Qualitätsrichtlinie wegen ihrer Empfindlichkeit gegenüber Verlegefehlern nicht mehr zugelassen [67]. Bei Gleitringdichtungen wird der Dichtring unter Vordehnung in seiner endgültigen Position in einer Kammeraussparung bzw. vor der Stützkante des Spitzendes aufgelegt. Beim Zusammenschieben wird der Dichtring, ohne seine Lage zu verändern, verpresst und erreicht auf diese Weise seine Dichtfunktion [17]. Die Dichtung wird bei der Herstellung des Rohres mit in die Muffe einbetoniert. Vor dem Zusammenschieben der Rohre wird ein Schutzring aus Schaumkunststoff entfernt und anschließend ein Schmiermittel auf das Spitzende aufgetragen. Die Dichtung der Rohrverbindung erfolgt durch eine Lippe, die beim Einführen des Spitzendes in die Muffe gegen das Spitzende gedrückt wird [17] (vgl. Abb. 21). Bei der Weiterentwicklung dieses Dichtelements wurde der Schutzring aus Schaumstoff durch einen Gummiring mit geringer Shorehärte ersetzt.

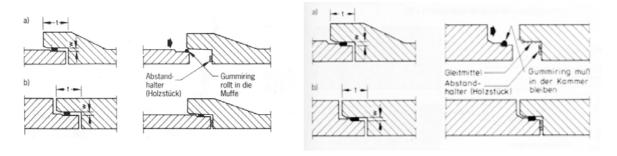


Abb. 19: Längsschnitt einer Rohrverbindung mit Abb. 20: Längsschnitt einer Rohrverbindung Rollringdichtung [77].

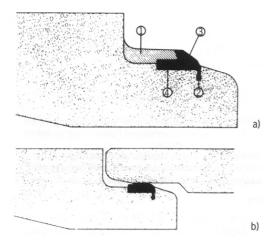


Abb. 21: Profil einer integrierten Dichtung [17]

- 1 Schutzring aus Schaumstoff
- 2 Halteteil
- 3 Dichtungsteil
- 4 Trägerteil.

3.3.4 Gussrohre

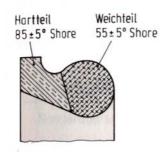
Gussrohre sind seit über 500 Jahren im Einsatz und zwar zunächst als Graugussrohre. Seit 1956 werden in Deutschland Rohre aus duktilem Gusseisen hergestellt. Der Unterschied liegt in der Form des im Gusseisen enthaltenen Graphits. Grauguss enthält Lamellengraphit, duktiler Guss Kugelgraphit. Durch die Graphitform werden im wesentlichen die mechanischen Eigenschaften geprägt. Grauguss ist relativ spröde, während duktiler Guss eine hohe Zugfestigkeit (mind. 420 N/mm²) und eine beachtliche Verformbarkeit aufweist. Zudem lässt sich duktiles Gusseisen im Gegensatz zum Grauguss auch schweißen. [17]

3.3.4.1 Materialeigenschaften

Vorteile des Materials sind nach Herstellerangaben eine hohe Werkstofffestigkeit und Belastbarkeit (Zugfestigkeit und Verformbarkeit). Zugfeste Rohrverbindungen können hergestellt werden. Ein Korrosionsschutz ist durch den Einsatz von Schutzauskleidungen (meist Zementmörtel) bzw. Ummantelungen (z.B. Polyethylen, Bitumen oder Faserzement) erreichbar. Im Abwasserbereich muss die innere Korrosionsschutzschicht aus Tonerdezement hergestellt sein [62]. Die Schichtdicke beträgt dabei 3 mm für Rohre von DN 100 bis DN 300. So beschichtete Rohre sind nach Herstellerangaben für die Ableitung von Abwasser entsprechend ATV-A 115 [81] geeignet.

3.3.4.2 Rohrverbindungen

Als Steckmuffenverbindung wurde 1957 die TYTON®-Verbindung in Deutschland eingeführt [82]. Die TYTON®-Verbindung verfügt über einen Zentrierbund, welcher Dezentrierbewegungen verhindern soll. Der TYTON®-Dichtring erreicht seine Dichtwirkung unter anderem wegen seiner besonderen Profilierung. Er ist aus zwei Komponenten zusammengestellt, einer harten und einer weichen Gummimischung (Abb. 22). Als Dichtungswerkstoff für den Abwasserbereich wird ein Nitril-Butadien-Gummi (NBR) verwendet, der eine hohe Beständigkeit gegen aggressives Abwasser aufweist (Abb. 23).



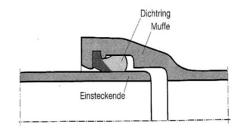


Abb. 22: TYTON[®]-Dichtring, bestehend aus zwei Elastomeren mit unterschiedlichen Härtegraden [17].

Abb. 23: TYTON®-Dichtring aus NBR im eingebauten, verformten Zustand [17].

Die TYTON®-Verbindung kann nicht-längskraftschlüssig und längskraftschlüssig hergestellt werden.

3.3.5 Kunststoffrohre

Kunststoffrohre werden ungefähr seit 1930 hergestellt. Eine systematische Rohrwerkstoffentwicklung begann jedoch erst nach 1955, so dass es ab Mitte der sechziger Jahre des zwanzigsten Jahrhunderts zu einem vermehrten Einsatz von Kunststoffrohren kam. Verwendete Materialien sind Polypropylen (PP), Polyethylen (PE), Glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) und weichmacherfreies Polyvinylchlorid (PVC-U).

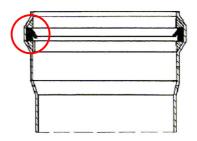
Die in deutschen Kanalisationen mehrheitlich eingesetzten Kunststoffe sind PVC-U (weichmacherfreies Polyvinylchlorid), PE-HD (Polyethylen hoher Dichte), sowie UP-GF (Glasfaserverstärkte Kunststoffe - GFK - auf Basis ungesättigter Polyesterharze).

Vor dem Hintergrund der hohen Anzahl an unterschiedlichen Rohrwerkstoffen und der daraus resultierenden hohen Anzahl an Rohrverbindungen werden im Folgenden gängige Beispiele für Kunststoffrohr-Verbindungen beschrieben.

3.3.5.1 Rohrverbindungen für PVC-Rohre

3.3.5.1.1 Rohrverbindung für Einschichtsysteme

Bei PVC-Rohren werden die Rohrverbindungen i.d.R. mit Steckmuffen hergestellt. Die Dichtwirkung übernimmt ein Elastomerring, der meist bereits vom Hersteller eingelegt wird. Bei Einschieben des Spitzendes in die Muffe wird eine Elastomerlippe abgewinkelt und stellt durch Abb. 24: die Rückstellkräfte des Materials die Dichtheit her (Abb. 24).

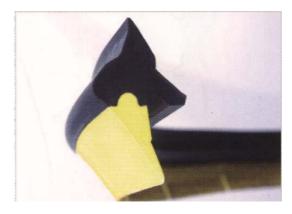


Steckmuffe eines PVC-U Rohres mit werkseitig eingebautem Dichtring [17].

3.3.5.1.2 Rohrverbindung für Mehrschichtsysteme

Ein Beispiel für ein mehrschichtiges Rohr aus PVC-U nach DIN 19534 ist das Kanalrohrsystem ConneX[®]. Die Rohrwand ist in drei Schichten aus PVC-U aufgebaut. Die innere, poröse Schicht weist eine größere Schichtdicke auf.

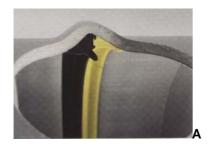
Eine spezielle Rohrverbindung stellt das CI-Dichtungssystem des Kanalrohrsystems ConneX® dar. Es besteht aus einem TPE-Polymergemisch (Thermoplastisches Elastomer nach DIN 7724 [64]) und einem Stützring, im Bild gelb, der sowohl fest in der Muffe integriert ist als auch mit dem TPE-Polymer verbunden ist. Es wirkt durch zwei Abb. 25: Dichtflächen, die die Dichtigkeit Rohrverbindung auch bei einer Abwinklung



2-Komponeneten ConneX®-CI-Dichtsystem DN 800 als Querschnitt [83].

von 3 Grad gewährleisten sollen. Nach [83] übertrifft dieses System die Dichtigkeitsanforderungen an Freispiegelleitungen im Abwasserleitungsbau bei 0,5 bar Innendruck.

Das Zusammenfügen von zwei ConneX®-Rohren ist in Abb. 26 (A-C) dargestellt. Hergestellt werden diese Rohre ab Nennweiten DN 300.





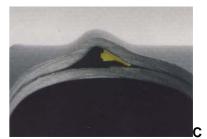


Abb. 26: Connex CI-Dichtungssystem [83]. A Schnitt durch die Muffe. B Spitzende des CONNEX-Kanalrohres drückt gegen die untere Dichtlippe. C Verpresstes CONNEX-CI-Dichtsystem.

3.3.5.2 Rohrverbindungen für Rohre aus Polyethylen (PE)

PE Rohre können durch Flanschverbindungen Elastomerdichtungen, mit mit Steckverbindungen oder durch Schweißen verbunden miteinander werden. Durch Schweißen wird eine fast nahtlose Verbindung erzeugt, die ohne Zerstörung nicht wieder geöffnet werden kann.

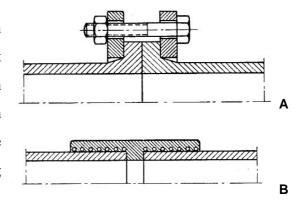


Abb. 27: Rohrverbindungen für PE-Rohre

A Flanschverbindung für PE.

B Schweißmuffenverbindung für PE-Rohre im Längsschnitt [63].

Ein Beispiel für eine Rohrverbindung mit einer Lippendichtung (Steckverbindung) ist das REHAU AWADUKT PE System. Es handelt sich um ein aus Polyethylen hergestelltes sogenanntes Hochlastkanalrohrsystem, das nach DIN 19537 [84] produziert wird. Dieses Rohrsystem wird angeboten in den Nennweiten DN 110 – DN 400. Als Dichtring wird ein aus PE bestehender Sicherheitslippendichtring eingesetzt, der in einer Sicke in der Muffe fest fixiert ist (Abb. 28).



Abb. 28: Längsschnitt des Dichtelements eines Rohres aus PE [85].

3.3.5.3 Rohrverbindungen für Rohre aus Polypropylen (PP)

Polypropylenrohre können wie PE-Rohre mittels geflanschten Verbindungen und Lippendichtungen dicht zusammengeführt werden.

Exemplarisch ist die Rohrverbindung des REHAU AWADUKT PP SN RAUSISTO dargestellt, dessen besonderes Merkmal das SL-Dicht-System ist. Es besteht aus einem Kompressions-Lippendichtring aus dauerelastischem SBR, Styrol-Butadien-Kautschuk. Nach DIN EN 681-3 [86] dürfen Dichtungen aus diesem Material nicht mit Trinkwasser in Verbindung gebracht werden.

Die Geometrie des Dichtringes ist als Querschnitt in Abb. 29 zu erkennen. Der Dichtring ist in der Muffe fest eingesetzt, so dass der Dichtring beim Zusammenfügen von zwei Rohren nicht verrutschen kann.



Abb. 29: Längsschnitt durch das Dichtsystem Steckverbindung [85].

3.3.5.4 Rohrverbindungen für GFK-Rohre

GFK-Rohre werden mit Überschiebkupplungen zusammengefügt. Dabei gibt es unterschiedliche Varianten in der Ausführung der Überschiebkupplung. Exemplarisch sind in

Abb. 30 vier Kupplungssysteme der Firma HOBAS dargestellt. Die Kupplungssysteme sind werksseitig fest am Rohr montiert und müssen vor Ort nur noch zusammengesteckt werden.

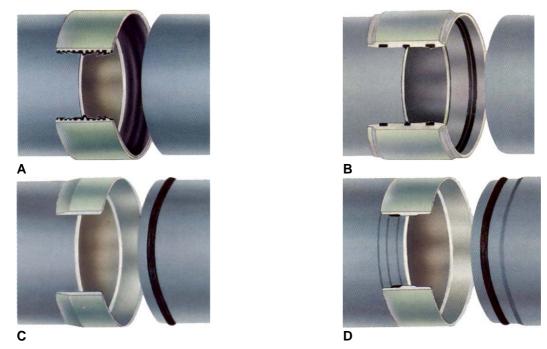


Abb. 30: Übersicht der verschiedenen Kupplungssysteme bei GFK-Rohrverbindungen der Firma HOBAS [63]. **A** FWC-Kupplung. **B** DC-Kupplung. **C** WW-Kupplung. **D** WKH-Kupplung.

3.3.5.4.1 FWC-Kupplung

Eine Gummimanschette aus EPDM-Material liegt in einem Verstärkungsring aus GFK-Laminat. Die Manschette ist symmetrisch aufgebaut. In der Mitte befindet sich der Anschlagsteg. Beidseitig des Stegs folgen jeweils eine Lippendichtung sowie eine Kompressionsdichtung. Mit dieser Kupplung werden Nennweiten zwischen DN 300 und DN 2400 verbunden.

3.3.5.4.2 DC-Kupplung

Sie besteht aus einem GFK-Ring, in den zwei Dichtringe und ein Abstandshalter eingearbeitet sind. Mit dieser Kupplung werden Rohre mit den Nennweiten ab DN 200 bis DN 500 verbunden. Als DCL-Kupplung wird sie für längskraftschlüssige Verbindungen verwendet. Das L in dem Kürzel bedeutet "Lock" = "Verriegeln". Diese Verriegelung wird erreicht durch einen Scherstab, der nach dem Zusammenziehen der Rohre seitlich in die Kupplung eingeführt wird und dann je zur Hälfte in einer Nut im Rohr bzw. der Kupplung liegt. Ansonsten ist sie baugleich mit der DC-Kupplung.

3.3.5.4.3 WW- und WKH-Kupplung

Kupplungen dieser Bauweise werden speziell im Relining eingesetzt. Sie sind nach außen hin platzsparender als die FWC- oder DC-Kupplungen und lassen daher beim Relining eine größere Querschnittsauslastung zu. Die WKH-Kupplung wird vor allem beim Rohrvortrieb und Berstlining verwendet. Sie bildet mit dem Rohr eine vollkommen glatte Rohr-Kupplungs-Außenfläche. Bei diesen Verbindungsvarianten sind zudem die Dichtungsringe auf dem Rohr angebracht.

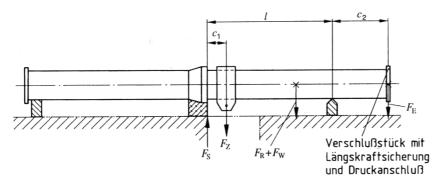
3.4 Wurzelfestigkeit von Rohrverbindungen (Prüfverfahren)

Den bisher angewandten Prüfverfahren zur Bestimmung der Wurzelfestigkeit von Rohrverbindungen liegt meist die Annahme eines direkten Zusammenhanges zwischen der Größe des Anpressdruckes des Dichtmittels und der Wurzelfestigkeit zu Grunde. So soll der Einwuchs von Wurzeln durch einen einzuhaltenden Anpressdruck verhindert werden.

Biologische Faktoren, Reize und Randbedingungen, wie z.B. exfiltrierende Feuchtigkeit im Zusammenhang mit Wasser- und Nährstoffmangel im Boden sowie die Interaktion von Leitung und Baumwurzel, werden dabei kaum oder gar nicht berücksichtigt.

3.4.1 Prüfung nach DIN 4060/DIN EN 681

Die Wurzelfestigkeit von Rohrverbindungen gilt in Deutschland nach DIN 4060 [5] als nachgewiesen, wenn die Rohrverbindung unter Scherlast eine Dichtheitsprüfung bei Überbzw. Unterdruck besteht (vgl. Abb. 31). Die mechanischen Eigenschaften des Dichtmittels werden nach DIN EN 681 [86] geprüft. Die Geometrie des Dichtmittels und der daraus resultierende Einfluss auf den erzeugten Anpressdruck bleiben dabei allerdings unberücksichtigt.



 $F_{\rm E}$ Eigengewicht des Verschlußstückes

 $F_{\rm p}$ Eigengewicht des Rohres

F_s Scherlast

Fw Gewicht des Wassers

F_z Zusatzlast

l Abstand zwischen Elastomerdichtung und rechtem Auflager

 C_1 Abstand zwischen Elastomerdichtung und Lasteinleitungspunkt für F_Z

 $C_{\rm 2}$ Abstand zwischen rechtem Auflager und Lasteinleitungspunkt für $F_{\rm E}$

Abb. 31: Scherlastprüfung nach DIN 4060 [5].

Die in DIN 4060 [5] 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 in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 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 Polyvinyl- chlorid (PVC-U) mit Steck- muffe 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 [74] zusätzlich eine Scherwegbegrenzung in Höhe von 6 mm festgelegt. Für die Prüfung der Rohrverbindung duktiler Gussrohre nach DIN EN 598 [87] werden Rohre ausgewählt, die an den Grenzen der Toleranzmaße liegen und damit einen Maximalspalt zwischen Spitzende und Muffe aufweisen.

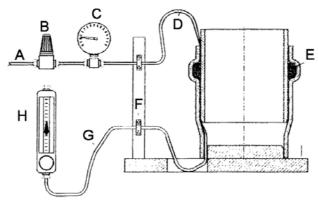
Die Prüfung der Dichtheit von Rohrverbindungen nach den genannten Kriterien berücksichtigt nur die kurzzeitige Beanspruchung des Dichtmittels. Eigenschaftsänderungen des Elastomers wie die Verringerung des Anpressdrucks unter länger andauernder Scherlast werden nicht berücksichtigt.

3.4.2 Prüfung nach DIN 4062

In der Vergangenheit wurde die Wurzelfestigkeit von Dichtstoffen (z.B. Dichtungsbahnen) nach DIN 4062 [88] auch mit dem sog. Lupinentest geprüft. Dabei soll die Beständigkeit von Dichtstoffen gegen Durchwachsen von Lupinenwurzeln unter realitätsnahen Bedingungen nachgewiesen werden.

3.4.3 Prüfung nach Entwurf des TC 155

Auf europäischer Ebene wird derzeit ein Entwurf der WG 13 des TC 155 (WI 00155540) zur Messung des Anpressdrucks diskutiert. Bei der Prüfung wird Gas mit einer definierten Flussrate durch einen dünnen Plastikschlauch (Wandstärke < 0,1 mm) geleitet, der zwischen Spitzende und Elastomerdichtung eingebaut ist (Abb. 32). Bei Einstellen einer konstanten Flußrate des eingeleiteten Gases kann der zum Versagen führende Druck auf die Dichtung bestimmt werden. Als Mindestanforderung wird ein Druck von 0,15 MPa (Langzeittest) gefordert (vgl. [89]).



- A Source of nitrogen.
- C Pressure gauge
- E Seal
- G Connecting tube
- 1 Storage frame
- B Regulator/pressure controller
- D PTFE tube
- F Fixed coupler
- H Flow meter

Abb. 32: Messung des Anpressdrucks (WG 13 der TC 155), aus [89].

3.4.4 Prüfung nach AS-1260-1984/1999

In ariden Gebieten mit langen Trockenperioden, wie kontinentalen Gebieten Australiens, stellt an Baumstandorten auf extrem trockenen Böden Wassermangel eine besondere Wachstumsbedingung dar. Der Nachweis der kurzzeitigen Widerstandsfähigkeit von Rohrverbindungen gegenüber Wurzeleinwuchs erfolgt hier über die Messung des Anpressdrucks der eingebauten Dichtmittel. Gefordert wird ein vergleichsweise hoher Druck von 0,55 Mpa bzw. 0,4 MPa [90].

3.4.5 Untersuchungen des CSIRO, Australien

Durch das CSIRO, Australien [91] wurden Rohrverbindungen mit unterschiedlichen Dichtsystemen unter in-situ-ähnlichen Bedingungen in einem Versuchsstand eingebaut. Die Bepflanzung erfolgte mit *Melaleuca armillaris* (Teebaum), der über ein aggressives Wurzelsystem verfügt. Nach Ablauf von einem Monat wurde der Rohrstrang mit flüssigem Düngemedium gefüllt und nach 32 Monaten hinsichtlich der Wurzelentwicklung untersucht. Das Einwuchsverhalten der Wurzeln wurde an den verschiedenen Rohrverbindungen beobachtet und dokumentiert. Der Einfluss eines zu geringen Anpressdruckes der Dichtung auf das Einwuchsrisiko wurde nach [91] auch durch Versuche an Rohrverbindungen mit variabel ausgeführten Muffen erfasst. Einwuchsfälle traten deutlich häufiger in Verbindungen auf, die den australischen Anforderungen für den Anpressdruck (0,4 Mpa) nicht genügten, allerdings wurde bei Absenkung des Anpressdruckes nicht zwangsläufig ein Wurzeleinwuchs

beobachtet. Durch den Einbau von Verbindungen, deren Innendurchmesser der Muffen bis zu 3 mm über dem Sollmaß lag, wurde der Anpressdruck über dem gesamten Umfang der Muffe verringert. Ein vermehrter Einwuchs von Wurzeln in diese Leitungen konnte im Verlauf der Studie [91] nicht bestätigt werden. Selbst bei außerordentlich niedrigem Anpressdruck (< 0,1 MPa) war die Leitung in einigen Fällen wurzelfrei.

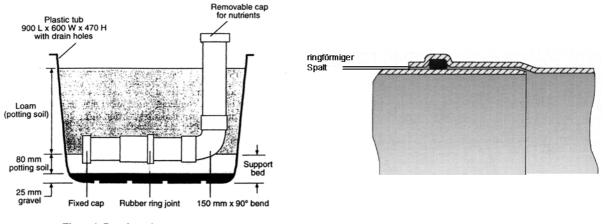


Figure 1. Root intrusion test set-up.

Abb. 33: Versuchspflanzung, aus [91].

Abb. 34: Rohrverbindung mit Spalt [91].

3.4.6 Prüfungen des TÜV Südwest

Nach [92] besteht zwischen der Gasdurchlässigkeit (Permeation) einer Dichtung und deren Undichtigkeit gegenüber Flüssigkeiten eine direkte Beziehung, so dass das Versagen eines eingebauten Dichtmittels mit Vorwarnzeit vorausgesagt werden kann [92]. Für industrielle Anwendungen hat der TÜV Südwest daher ein Verfahren entwickelt, um die Gasdurchlässigkeit (Permeation) von Dichtmitteln über die Zeit zu erfassen [92].

Nach Ablauf eines bestimmten Zeitraumes (t 2, s. Abb. 35) ist eine Zunahme der Gasdurchlässigkeit von neu ausgeführten Rohrverbindung nachweisbar. Eine weitere deutliche Zunahme der Permeablität ist nach dem Zeitpunkt (t 3) zu beobachten, der unmittelbar vor dem kompletten Versagen des Dichtmittels, d.h. der Undichtigkeit gegenüber Flüssigkeiten, liegt (t 4).

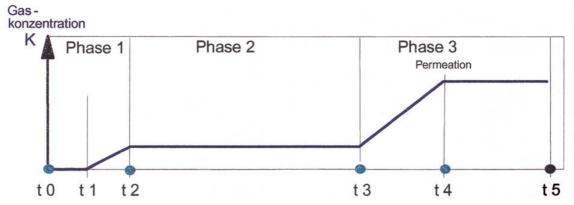


Abb. 35: Zeitlicher Verlauf der Dichtheit einer Rohrverbindung, aus [92], verändert.

3.4.7 Prüfung der Wurzelfestigkeit von Abdichtungsbahnen nach dem FLL-Verfahren

Abdichtungen von Dächern, die begrünt werden sollen, müssen wurzelfest ausgebildet werden. Dies kann durch die Verwendung von wasserundurchlässigem Beton und geschweißten Metallwannen oder durch den Einsatz von Abdichtungsbahnen bzw. ganzflächigen Beschichtungen erfolgen. Der Nachweis der Durchwurzelfestigkeit von Bahnen und Beschichtungen ist nach dem Verfahren zur Untersuchung der Wurzelfestigkeit von Dachbegrünungen, FLL 1999, zu führen [93].

Für die Prüfung werden auf dem Boden von acht Pflanzgefäßen mit den Mindestmaßen [mm] 800 x 800 x 250 (b x t x h) Dichtungsbahnen bzw. Beschichtungen aufgebracht und ein definiertes Vegetationssubstrat eingebaut. Zeitgleich werden drei Kontrollgefäße mit den gleichen Abmaßen, aber ohne Bahnen bzw. Beschichtungen, bepflanzt. Sie dienen der Kontrolle des Pflanzenwachstums.

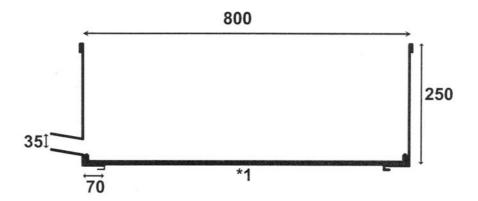


Abb. 36: Aufbau der Versuchsgefäße zur Bestimmung der Wurzelfestigkeit von Bahnen und Beschichtungen, Ansicht (Mindestmaße, Angaben in mm, *1 = transparenter Boden mit Aufkantung).

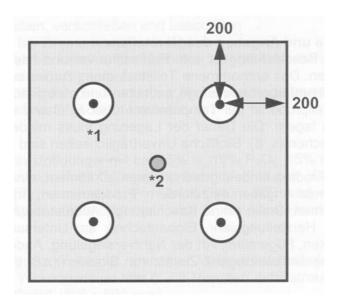


Abb. 37: Anordnung der Gehölze (*1) und des Tensiometers (*2) in der Vegetationsschicht bei einem Gefäß von 800 x 800 mm (Maße in mm), Draufsicht.

Nach der FLL-Richtlinie können zwei Verfahren angewandt werden, die sich in der Versuchsdauer unterscheiden. Das ist zum einen eine 2-Jahres-Prüfung, bei der Feuerdorn (*Pyracantha coccinea*) und Quecke (*Agropyron repens*) gepflanzt werden, und zum anderen eine 4-Jahres-Prüfung, bei der Grauerle (*Alnus incana*) und Quecke (*Agropyron repens*) für die Bepflanzung verwendet werden.

Die aufwändigere, aber schnellere 2-Jahres-Prüfung findet in einem klimagesteuerten Gewächshaus statt, wobei die verwendeten Pflanzenarten bei entsprechenden Temperatur- und Lichtverhältnissen das ganze Jahr über wachsen. Somit wird eine effektive Wachstumsperiode von 24 Monaten erzielt, die von ähnlicher Dauer ist wie ein 4-Jahrestest, wenn man hierbei die jährliche, mehrmonatige Ruhephase der Vegetation unter Freilandbedingungen berücksichtigt. [93]

Die Voraussetzung für die Beurteilung der Wurzelfestigkeit ist eine ausreichende Wuchsleistung der Testpflanzen. Die Gehölze in den Prüfgefäßen müssen mindestens 80 % der in den Kontrollgefäßen beobachteten Wuchsleistung aufweisen. Die Ausbreitung der Quecke wird visuell bewertet.

Eine Bahn bzw. Beschichtung gilt als wurzelfest, wenn in allen Prüfgefäßen nach Ablauf der Versuchsdauer keine Wurzeleindringung sowie keine Wurzeldurchdringung festzustellen ist. Wurzeleindringung und Wurzeldurchdringung werden folgendermaßen definiert [93]:

Wurzeleindringung:

In der Fläche oder in die Nähte einer geprüften Bahn bzw. Beschichtung *eingewachsene* Wurzeln, wobei sich die unterirdischen Pflanzenteile aktiv Hohlräume geschaffen und die Bahn bzw. Beschichtung somit geschädigt haben.

Wurzeldurchdringung:

In der Fläche oder in den Nähten einer geprüften Bahn bzw. Beschichtung *durchgewachsene* Wurzeln, welche bereits in der Bahn bzw. Beschichtung vorhandene Poren genutzt oder aktiv Hohlräume geschaffen haben.

4 Aufgrabungen an 16 Schadensfällen

Zur Untersuchung von Wurzelschäden wurde im Rahmen von Baumaßnahmen jeweils der Schadensverlauf an 7 privaten Hausanschlussleitungen (Kapitel 4.1.1 bis 4.1.7), 7 öffentlichen Kanälen (Kapitel 4.2.1 bis 4.2.7) sowie an zwei Straßeneinläufen (Kapitel 4.3.1; Kapitel 4.3.2) dokumentiert (Tabelle 2). Geschädigte Rohrverbindungen wurden jeweils entnommen und sorgfältig geöffnet um den Verlauf des Wurzeleinwuchses durch die Rohrverbindung zu beschreiben. Darüber hinaus wurden Bodenuntersuchungen durchgeführt, um eine mögliche Interaktion zwischen Wurzelwuchs und Bodenstruktur zu erkennen.

Tabelle 2: Übersicht der begleiteten Baumaßnahmen.

Ort der Baumaßnahme	Art der Leitung		
Bochum	Hausanschlussleitung (Mischwasser)		
Duisburg, Ortslage I			
Göttingen, Ortslage I	Hausanschlussleitung (Regenwasser)		
Göttingen, Ortslage II	Hausanschlussleitung (Schmutzwasser)		
Göttingen, Ortslage III			
Göttingen, Ortslage IV			
Langenfeld	Hausanschlussleitung (Mischwasser), Straßenkanal (Mischwasser)		
Fürstenberg, Ortslage I	Straßenkanal (Mischwasser)		
Fürstenberg, Ortslage II			
Herten			
Essen			
Quickborn			
Rehburg – Loccum			
Münster			
Duisburg, Ortslage II	Anschlussleitung / Regeneinlauf		
Wuppertal	Regeneinlauf / Hausanschlussleitung (Mischwasser)		

4.1 Private Hausanschlussleitungen

4.1.1 Bochum

4.1.1.1 Anlass der Maßnahme

Die Baumaßnahme wurde durchgeführt, da Wurzeleinwuchs wiederholter die Hausanschlussleitung verstopft hatte. Das Inspektionsvideo ließ die Verwurzelung einer Rohrverbindung erkennen (Abb. 38). Der Schaden trat 1,5 hinter m dem Revisionsschacht auf (Abb. 39). Das kontinuierliche Gefälle der Leitung war durch eine Absenkung nicht mehr gegeben. Durch Kombination beider Schäden wurde hier die Sanierung der Leitung in offener Bauweise notwendig.



b. 38: Bild aus dem Inspektionsvideo der Mischwasser-Hausanschlussleitung, Baumaßnahme Bochum.

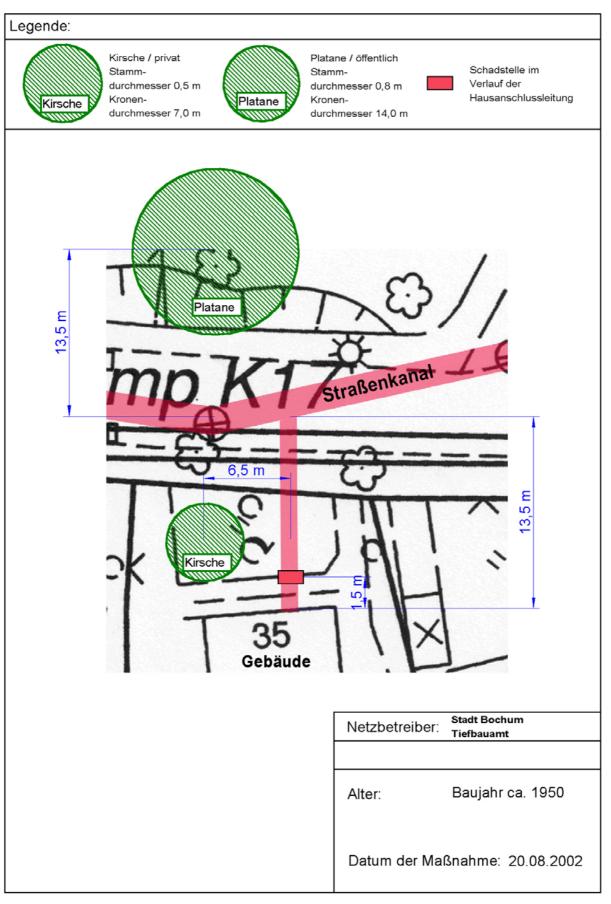


Abb. 39: Übersichtszeichnung der Baumaßnahme Bochum.

4.1.1.2 Aufgrabung / Schadensbild

Die Leitung befindet sich in einem Abstand von 6,5 m vom Stamm eines privaten Kirschbaumes (*Cerasus vulgaris MILL.*). Auf der gegenüberliegenen Straßenseite befindet sich eine städtische Hybrid-Platane (*Platanus hybrida BROT*), deren Stamm einen Abstand von 13,5 m zur Leitung hat (Abb. 39). Der geringe Abstand zur Leitung ließ die Annahme zu, dass *Cerasus*-Wurzeln für den Schaden verantwortlich sind. Dies wurde durch die nachfolgende histologische Untersuchung bestätigt.

Das Gebäude ist über eine Hausanschlussleitung aus Keramik mit einem Innendurchmesser von 150 mm an die öffentliche Kanalisation angebunden. Der Straßenkanal befindet sich im Bereich der Fahrbahn (Abb. 40 A).

Die Grabungsarbeiten wurden bis zum Erreichen des Rohrscheitels vorab mit dem Bagger durchgeführt. Der Wurzelverlauf vom Baum zur Schadstelle wurde nicht dokumentiert. Der Bereich des Bodens war bis in eine Tiefe von 0,5 m stark durchwurzelt (Abb. 40 B). An der linken Seite des Leitungsgrabens sind Wurzeln in der Nähe der Oberfläche zu erkennen. Die Wurzeln verlaufen quer zum Graben, auf der rechten Seite des Grabens befindet sich der Kirschbaum. Zur Entnahme von Leitungs- und Wurzelproben wurde eine verwurzelte Muffe der Anschlussleitung mit der Hand aufgegraben (Abb. 40 C).

Im aufgegrabenen Bereich des Gehweges befindet sich eine große Anzahl verschiedener Versorgungsleitungen, die ihrem äußeren Zustand nach teilweise nicht in Betrieb sind (Abb. 40 D). Die Grabung im Bereich der Leitungstrasse des Gehweges konnte aufgrund der großen Anzahl der Leitungen nur mit äußerster Vorsicht durchgeführt werden. Die Leitungen haben ein unterschiedliches Alter und sind in verdichtetem Bettungsmaterial verlegt. Unter dem Gehweg wurde in der Anschlussleitung durch das Inspektionsvideo eine Setzung nachgewiesen.

In der Nähe von Elektroleitungen befand sich ein dichtes Geflecht von Wurzeln, das die korrodierten Außenschichten der Elektroleitungen umschlossen hatte. Die Umhüllung war hier infolge von Korrosion (Rost) komplett aufgelöst. Die Wurzeln waren in Längsrichtung an den Leitungen gewachsen. Ein Umwachsen in Querrichtung wurde hier an den Versorgungsleitungen nicht festgestellt.



Abb. 40: Baumaßnahme Bochum **A** Kanallage. **B** Aufgegrabene Hausanschlussleitung im Vorgarten des Hauses, hier befindet sich die Leitung in einer Tiefe von 1,6 m. **C** Als Leitungsprobe entnommene Rohrverbindung. Die eingewachsene Wurzel hat die Rohrverbindung penetriert und sich in der Rohrverbindung verzweigt. Im Bereich des Rohrscheitels befinden sich mehr Wurzeln in der Rohrverbindung als in der Sohle. **D** Geflecht von Wurzeln, das die korrodierten Außenschichten von Versorgungsleitungen umschlossen hatte. Die Wurzeln sind längs zur Leitung gewachsen, und haben die Umhüllung der Metallleitung durchdrungen.

Dichtmittel wurde, Als bei der als genommenen Leitungsprobe Rohrverbindung, eine Asphaltvergussmasse eingesetzt. Bei Bau der Leitung wurde ein Hanf-Strick in die Muffe eingelegt und (Kapitel Die vergossen **3.3.2**). Vergussmasse war bei der Analyse der Rohrverbindung teilweise nicht mehr vorhanden. Der Raum zwischen Spitzende und dem Glockenende war von einem Polster aus Wurzeln ausgefüllt (Abb. 40). Das Wachstum von Wurzeln ist hier auf den Scheitel beschränkt. Im Bereich des Schei-



Abb. 41: Detailansicht einer verwurzelten Keramikmuffe (Abb. 40 C), das Geflecht aus Wurzeln und Resten des Leitungsinhaltes war nach kurzer Lagerung mit einer Pilz- bzw. Bakterienschicht überzogen. Die älteste Wurzel befindet sich im Bereich des Scheitels.

tels ist eine verholzte Wurzel zu erkennen, die von außen in die erste außerhalb des Hauses gelegene Rohrverbindung eingewachsen ist (Abb. 40 C). Die Wurzel hat sich in der Rohrverbindung stark verzweigt, so dass Wurzeln im Bereich des Scheitels durch die Rohrverbindung in das Innere der Leitung ragen. Die Ausbreitung der Wurzeln auf der Sohle ist gering. Im Bereich der Sohle ist keine Wurzel zu erkennen, die von außen in die Rohrverbindung eingedrungen ist. Hier erscheint das von außen die Muffe umgebende Wurzelpolster weniger dick als im Bereich des Scheitels.

4.1.1.3 Analyse der Wurzelproben

Es wurden an fünf Stellen im Umfeld der Rohrverbindung Wurzelproben entnommen: außen in Scheitel und Sohle; in der Verbindung im Sohlenbereich; innen in Scheitel und Sohle. Die Wurzeln wurden auf Schädigung durch das Wachstum in oder in der Nähe der Leitung untersucht.

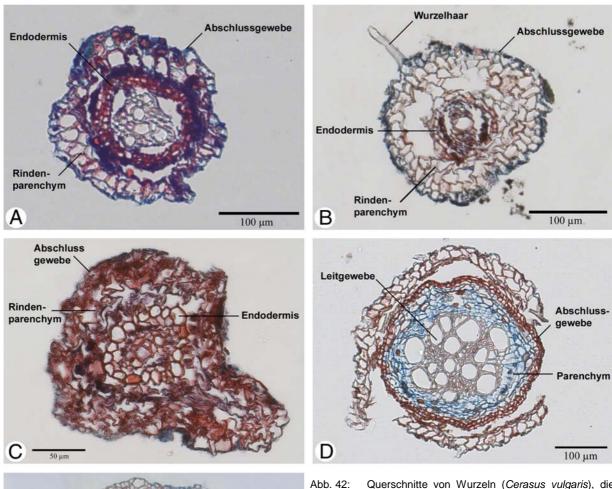
Die Wurzeln, die außerhalb der Rohrverbindung im Scheitelbereich gewachsen sind, weisen keine oder wenige Schädigungen auf. Der Querschnitt zeigt ein durchgehendes Abschlussgewebe und mehr oder weniger regelmäßig geformte Rindenzellen (Abb. 42 A). Die Endodermis ist teilweise sowohl von der Rinde, als auch vom Zentralzylinder abgelöst.

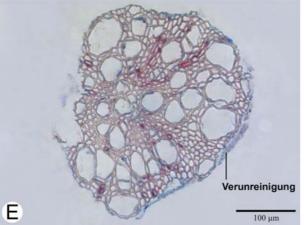
Die Wurzeln, die außerhalb der Leitung im Sohlenbereich gewachsen sind, zeigen keine Schädigung. Das Abschlussgewebe umgibt die Wurzel durchgehend, es treten Wurzelhaare auf (Abb. 42 B). Der Querschnitt wurde bei Schneiden mit dem Mikrotom stark zerrissen. Die Zellen der Rinde sind teilweise auseinandergerissen, aber nicht degeneriert. Die Endodermis ist als zusammenhängender Ring von Zellen zu erkennen.

Wurzeln, die innerhalb der Rohrverbindung wachsen, weisen einen erhöhten Anteil von verholzten Festigungselementen auf. Die Zellwände sind stark durch Safranin angefärbt (Abb. 42 C). Die Wurzel ist mit einem Abschlussgewebe umgeben, das von den verholzten Zellen der Rinde nur schwer zu trennen ist. Der Querschnitt der Wurzel ist nicht rund, sondern wirkt an einer Seite abgeflacht. Die Endodermis bildet einen durchgehenden Ring, der zum Teil nicht mit den Rindenzellen verbunden ist.

Bei den Wurzeln, die im Bereich des Scheitels der Misachwasserleitung gewachsen sind, waren keine Schädigungen zu erkennen. Sowohl die Zellen des Abschlussgewebes, als auch die Parenchymzellen sind intakt (Abb. 42 D). Das Leitgewebe nimmt einen großen Anteil des Ouerschnittes ein.

Bei Wurzeln, die in der Leitung im Bereich der Sohle gewachsen sind, treten Schädigungen auf. Die Wurzeln sind bis auf den Gefäßteil degeneriert (Abb. 42 E). Außer Abschlussgewebe fehlen Parenchym und Endodermis. An den peripheren Zellwände sind im Querschnitt Verunreinigungen zu erkennen, die vermutlich vom Inhalt der Leitung stammen.





Querschnitte von Wurzeln (*Cerasus vulgaris*), die an verschiedenen Orten an einer Mischwasserleitung gewachsen sind. A Außerhalb der Leitung am Scheitel des Rohres, ohne Schädigungen. B Außerhalb der Leitung an der Sohle des Rohres, ohne Schädigung. C In der Rohrverbindung im Bereich der Sohle, stark verholzt. D Innerhalb der Rohrleitung im Scheitel, ohne Schädigungen. E Innerhalb der Rohrleitung in der Sohle, stark degeneriert. Die Wurzeln C und E hatten Kontakt zum Abwasser und weisen Schädigungen auf.

4.1.2 Duisburg, Ortslage I

4.1.2.1 Anlass der Maßnahme

Die Maßnahme wurde durchgeführt, um ein Abflusshindernis durch Wurzeleinwuchs in der Mischwasser-Hausanschlussleitung eines Privathauses zu beseitigen. Das Haus wurde im Jahr 1950 erbaut. Nach Auskunft des derzeitigen Besitzers wurde die betroffene Leitung bei Neubau erstellt. Die Mischwasser-Hausanschlussleitung DN 150 aus Keramik ist über einen Abzweig mit der Anschlussleitung des Nachbarhauses verbunden (Abb. 43). Bei der Baumaßnahme wurde die komplette Anschlussleitung beider Häuser erneuert. Aufnahmen vom Zustand der Leitung vor der Sanierung wurden vom Netzbetreiber nicht zur Verfügung gestellt.

Der Revisionsschacht des Hauses Nr. 41 befindet sich im Vorgarten. Die Verwurzelung befand sich nach Aussage des Netzbetreibers im Bereich unter dem Gehweg. Die genaue Lage des Wurzeleinwuchses konnte bei dieser Baumaßnahme nicht nachvollzogen werden, die Entnahme der verwurzelten Leitungsabschnitte fand ohne Dokumentation ihrer Lage statt. Die Informationen zur Lage der entnommenen Leitungsproben stammen von den Mitarbeitern des bauausführenden Betriebes. Die Anschlussleitung des Hauses Nr. 43 wurde ebenfalls erneuert, hier trat kein Wurzeleinwuchs in die Verbindungen der Leitung auf.

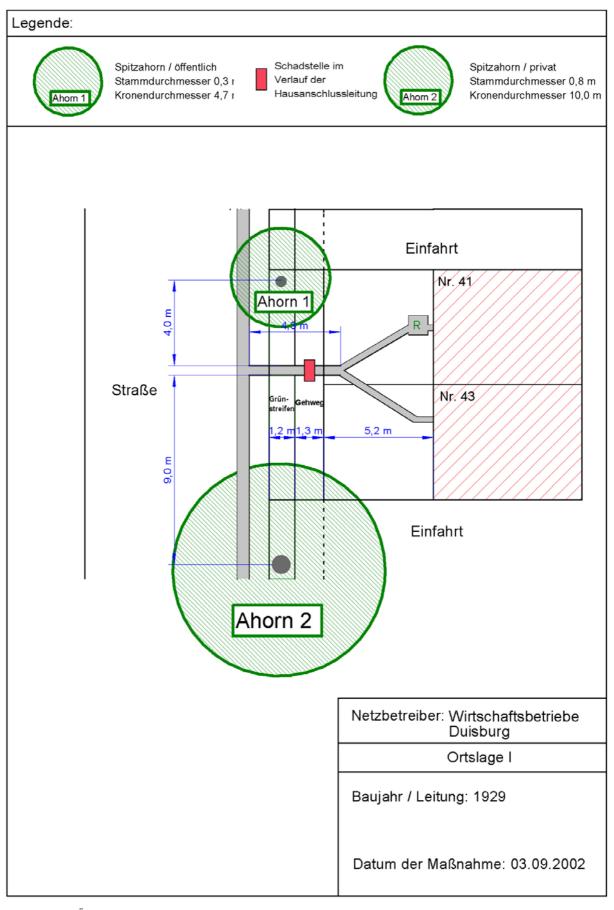


Abb. 43: Übersichtszeichnung der Baumaßnahme Duisburg, Ortslage I.

4.1.2.2 Aufgrabung / Schadensbild

Die Hausanschlussleitung war hier durch den Einwuchs von Wurzeln in ihrer Funktionsfähigkeit eingeschränkt. In einer Entfernung von 4,0 m befindet sich ein Spitzahorn, *Acer platanoides* (Abb. 44 A), der vom Betreiber der öffentlichen Grünflächen gepflanzt wurde. Der Baum hat in einer Höhe von 0,6 m einen Stammdurchmesser von 0,3 m und ist in einem 1,2 m breiten Grünstreifen angepflanzt.

Die Mischwasser-Anschlussleitung des Hauses wurde am Revisionsschacht beginnend aufgegraben und saniert (Abb. 44 B). Die Tiefe der Leitung bei Austritt aus dem Revisionsschacht beträgt 3,5 m. Die Leitung des benachbarten Hauses wurde erst später erneuert.

Bei der Aufgrabung waren bis in eine Tiefe von 2 m Wurzeln zu erkennen. Die Rohrverbindungen beider Anschlussleitungen waren im Bereich des Vorgartens frei von Wurzeleinwuchs. Die an dieser Stelle entnommenen Rohre und ihre Verbindungen waren frei von Wurzeleinwuchs.

Die Hausanschlussleitung wurde in offener Bauweise bis zur Einmündung in den Straßenkanal freigelegt. Im Bereich des Gehweges wurde eine stark verwurzelte Verbindung der Mischwasserleitung entnommen (Abb. 44 C). Im Scheitelbereich der ausgebauten Leitung sind neben anhaftendem Bettungsmaterial Wurzeln an der Rohrverbindung zu erkennen, die in die Rohrverbindung eingedrungen sind.



Abb. 44: Baumaßnahme Duisburg, Schultz-Knaudt-Str. 41 **A** Gibt den Standort des Baumes und den Verlauf der Leitungen wieder. Die Anschlussleitungen beider Häuser waren über einen Abzweig verbunden. Eine gemeinsame Anschlussleitung führt das Abwasser zum Straßenkanal ab. **B** Offene Baugrube im Vorgarten des linken Hauses, der Abzweig, der die beiden Leitungen verbindet wurde bereits ausgebaut (Abb. **A**). Hier trat kein Wurzeleinwuchs in die Leitung auf. **C** Leitungsprobe aus dem Bereich des Gehweges. Am Scheitel der Leitung sind Wurzeln in die Rohrverbindung eingewachsen.

4.1.2.3 Analyse der Leitungsproben

Bei der verwurzelten Rohrverbindung handelt es sich um eine Vergussmuffe. Die Verwurzelung der Keramik-Leitung mit einem Nenndurchmesser von 150 mm äußert sich durch Wurzelpolster, die den Querschnitt der Leitung verringern. Die Polster befinden sich an den seitlichen Rohrwandungen (Abb. 45 A).

Im Bereich des Scheitels sind Wurzeln in die Rohrverbindung der Mischwasser-Hausanschlussleitung eingedrungen (Abb. 45 A). Hier befinden sich verholzte Wurzeln, die fest mit der Rohrleitung verbunden sind. Wurzeln sind ebenfalls außerhalb der Rohrverbindung an der Vergussmasse entlang in Richtung Sohle gewachsen. Hier befindet sich ein Geflecht von Wurzeln außen auf der Vergussmasse. Diese Wurzeln sind nicht in die Leitung eingewachsen.

Die Muffe wurde aufgetrennt. Eine Hälfte der Muffe wurde entfernt, um den Verlauf der Wurzeln in der Muffe nach zu vollziehen (Abb. 45 B). Auf der Sohle der Leitung befindet sich ein Belag, der aus Reststoffen des Abwassers stammt. Durch die Ausbreitung des Belages läßt sich der mittlere Wasserstand bei Betrieb der Leitung erkennen. Die seitlichen Wurzelpolster nehmen einen großen Teil des Leitungsquerschnittes ein. Sie stellen ein Abflusshindernis dar.

Auf der Vergussmasse befand sich ein flaches Geflecht von Wurzeln (Abb. 45 C). Diese Wurzeln sind zwischen der Innenwand des Glockenendes und der Vergussmasse durch die Rohrverbindung gewachsen. Das Geflecht beschränkt sich auf den Bereich des Scheitels, hier sind die Wurzeln durch die Vergussdichtung gewachsen. In der Leitung sind die Wurzeln an beiden Seiten zu dichten Polstern gewachsen, die sich nicht in die Sohle fortsetzen. Die Sohle ist, sowohl in der Rohrverbindung, als auch im Leitungsquerschnitt frei von Wurzeln.

In den seitlichen Wurzelpolstern sind zwei Bereiche zu erkennen, in denen sich die Wurzeln äußerlich voneinander unterscheiden (Abb. 45 D). Die blaue Linie gibt den mittleren Füllstand der Leitung wieder. Die Wurzeln, die bei Betrieb der Leitung in den Leitungsinhalt eingetaucht waren, sind an ihrer dunklen Farbe zu erkennen. Oberhalb des mittleren Füllstandes sind die Wurzeln braun und bilden ein lockeres Geflecht. Die einzelnen Wurzeln haben helle Spitzen. Unterhalb der Linie ist das Wurzelpolster dünner. Die einzelnen Wurzeln sind mit einer grauen Schicht aus Fremdstoffen überzogen und sind zusammengeklebt. Die Wurzeln sind hier abgestorben und haben keine hellen Spitzen.

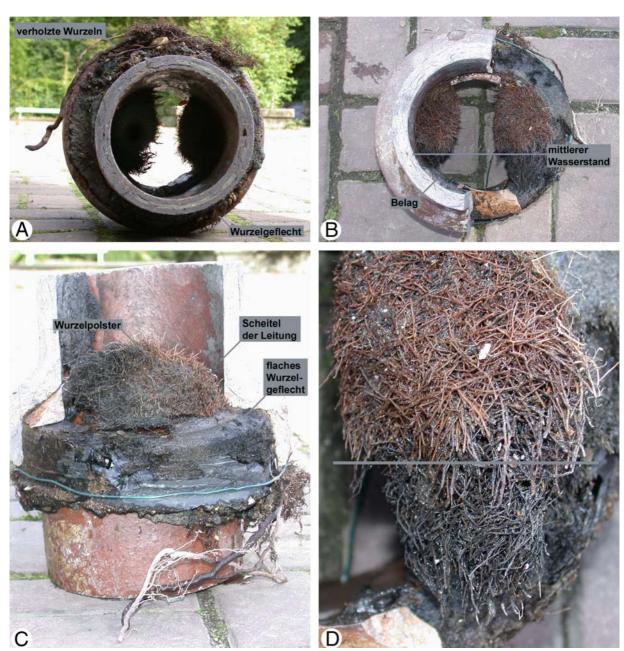


Abb. 45: Ausbreitung von Wurzeln in einer Mischwasser-Hausanschlussleitung. A Blickrichtung in Fließrichtung der ehemaligen Leitung. Zu beiden Seiten der Leitung befinden sich Wurzelpolster, die den Querschnitt der Leitung deutlich verringern. Die Enden des Rohres wurden gerade abgetrennt. B Blickrichtung 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. C Seitliche Ansicht von B. Die Wurzeln, die jetzt verholzt sind, haben am Scheitel die Rohrverbindung überwunden. In der Rohrverbindung bilden die Wurzeln ein flaches Geflecht. Sie haben sich nicht im Bereich der Sohle ausgebreitet. D Wurzeln, die selten oder keinen Kontakt mit Mischwasser hatten (über der grauen Linie), sind braun gefärbt. Die Wurzeln bilden ein lockeres Polster. Wurzeln, die Kontakt zum Mischwasser hatten (unter der grauen Linie), sind grau bis schwarz gefärbt. Sie haften aneinander und hängen herab.

4.1.2.4 Analyse der Wurzelproben

Wurzeln, die oberhalb der in Abb. 45 D eingezeichneten grauen Linie gewachsen sind, hatte vermutlich keinen oder nur selten Kontakt zum Inhalt der Mischwasserleitung (Abb. 46 A und B). Querschnitte von Wurzeln, die oberhalb des mittleren Füllstandes gewachsen sind, haben einen annähernd kreisförmigen Umfang. Bei beiden Querschnitten umgibt das Abschlussgewebe die Wurzel als durchgehende Schicht. Die Zellen haben eine gleichmäßige Form. Alle Zellwände, wie auch der Zellinhalt in den Rindenzellen fallen durch eine starke rote Färbung auf. Diese resultiert nicht aus einer starken Verholzung, sondern aus einer starken Färbung mit Safranin. Die Endodermis ist als zusammenhängender Ring von Zellen zu erkennen.

Wurzeln die unterhalb, der in Abb. 45 D eingezeichneten Linie gewachsen sind, hatten dauerhaft oder häufig Kontakt mit dem Inhalt der Mischwasserleitung (Abb. 46 C und D). Die Querschnitte dieser Wurzeln unterscheiden sich von denen der Wurzeln, die nicht mit dem Abwasser in Kontakt gekommen sind. Die Wurzeln sind im Umfang unregelmäßiger. Das Abschlussgewebe umschließt hier die Wurzel nicht als eine durchgehende Schicht. Die Zellen des Abschlussgewebes fehlen teilweise oder sie sind zerstört. Am Abschlussgewebe sind Reste des anhaftenden Leitungsinhaltes an ihrer grau-blauen Färbung zu erkennen (Abb. 46 C). Die Zellen im Bereich der Rinde sind zum Teil deformiert oder ihre Wände sind durchbrochen. Die Rindenzellen weisen hier keine einheitliche Färbung auf. Die Zellen der Endodermis haben teilweise ihren Zusammenhalt verloren (Abb. 46 C). Die Endodermis umschließt die Leitelemente nicht als kontinuierlicher Ring.

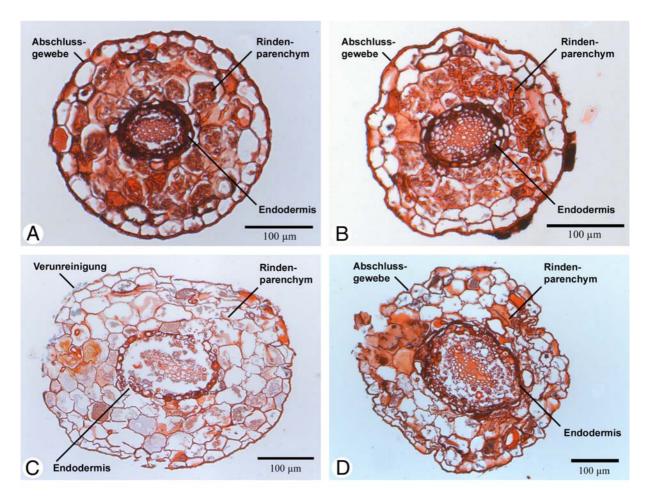


Abb. 46: Querschnitte von Wurzeln, die in einer Mischwasserleitung gewachsen sind. A und B Querschnitt von Wurzeln, die nicht oder nur selten mit Abwasser in Kontakt gekommen sind. Die Querschnitte geben Wurzeln ohne Schädigungen wieder. C und D Querschnitt von Wurzeln, die dauerhaft mit Mischwasser in Kontakt gekommen sind. Es treten Schädigungen auf. Neben Verunreinigungen auf dem Abschlussgewebe ist zu erkennen, dass die Endodermis keine durchgehende Zellschicht bildet.

4.1.3 Göttingen, Ortslage I

4.1.3.1 Anlass der Maßnahme

Ein Teil der Hausanschlussleitungen einer Straße im Stadtgebiet von Göttingen funktionierte durch Wurzeleinwuchs nur noch eingeschränkt. Alle Anschlussleitungen der Straße wurden in offener Bauweise saniert. Die Stadtentwässerung Göttingen betreibt ihr Entwässerungsnetz im Trennsystem. Bei der hier beschriebenen Leitung handelt es sich um eine Regenwasserleitung DN 150, die im Jahr 1950 verlegt wurde. Die Leitung war an einer Rohrverbindung, die direkt an der Grenze des Privatgrundstückes liegt, durch Wurzeleinwuchs beschädigt (Abb. 47). Vor dem Haus befindet sich ein Spitzahorn (*Acer platanoides L.*) im öffentlichen Straßenraum, der von einer Baumscheibe mit den Maßen 0,8 m x 1,2 m umgeben ist (Abb. 48 A). Der Baum ist 4,5 m von der Leitung entfernt. Der Straßenraum ist komplett versiegelt (asphaltiert). Teile des Gehweges werden als Parkraum genutzt. Der Regenwasser-

Straßenkanal befindet sich in der Mitte des gegenüberliegenden Gehweges. Die Hausanschlussleitung aus Keramik mit DN 150 verläuft bis zur Mündung in den Hauptkanal quer zur Straße. Der Schaden in der Leitung befindet sich an der Grenze des Privatgrundstückes.

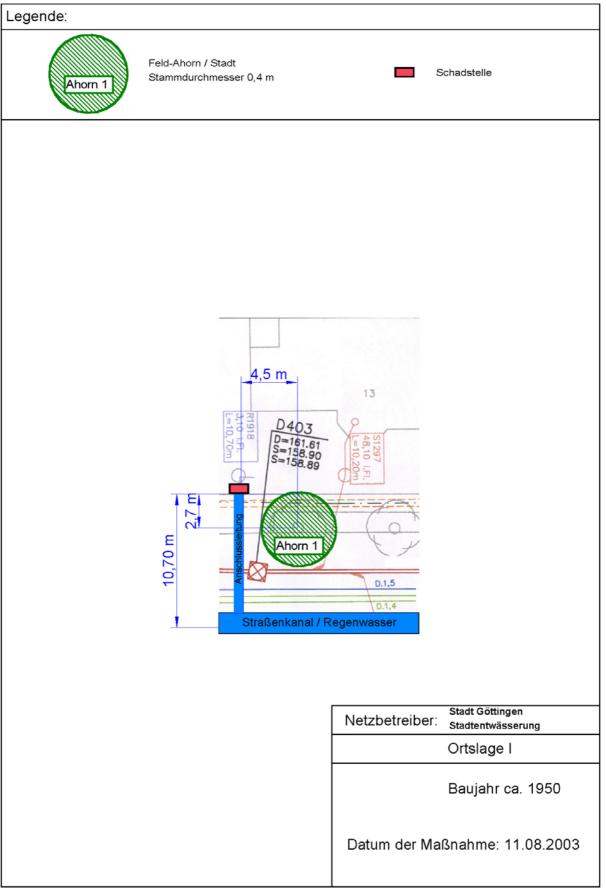


Abb. 47: Übersichtszeichnung der Baumaßnahme Göttingen, Ortslage I.

4.1.3.2 Aufgrabung / Schadensbild

Die Leitung liegt an der Stelle des Schadens in einer Tiefe von 1,0 m. Die Leitung wurde freigelegt. Bei der Aufgrabung war zu beobachten, dass mehrere verholzte Wurzeln seitlich an die Leitung heran gewachsen waren (Abb. 48 D). Es waren keine Wurzeln in die Rohrverbindung eingewachsen.

Im Bereich des Gehweges sind eine große Anzahl von Leitungen verlegt (Abb. 48 C). Die Leitungen haben ein unterschiedliches Alter und einen unterschiedlichen Durchmesser. Neben Abwasserleitungen waren auch Versorgungsleitungen von Wurzeln umgeben (Abb. 48 B). Verholzte Wurzeln sind außen dicht an der Oberfläche einer Gasleitung entlang gewachsen. Der Raum zwischen den Versorgungsleitungen, der mit Bettungsmaterial gefüllt war, ist von Wurzeln ausgefüllt. Die Wurzeln befinden sich teilweise direkt auf der Oberfläche der Leitungen.

4.1.3.3 Analyse der Leitungsproben

Im Bereich der Grenze des Privatgrundstückes wurde bei der Baumaßnahme eine Rohrverbindung entnommen. Außen an der Rohrverbindung befanden sich nur wenige Wurzeln im Bereich der Dichtung (Abb. 48 E).

Die Untersuchung und das Öffnen der Muffe wurde nicht im Zuge der Arbeit dokumentiert. Die Wurzeln waren an einem Ort in der Nähe des Scheitels durch die Rohrverbindung gewachsen, an der sich die Dichtung nicht in der richtigen Position befand. Bei Öffnen der Rohrverbindung wurden keine Wurzelproben für eine Untersuchung entnommen.



Abb. 48: Baumaßnahme Göttingen, Ortslage I. A Umgebung des Schadensfalles. Lage von Leitung und Baum (Spitzahorn). B Wurzeln auf der Oberfläche von Versorgungsleitungen. C Wurzeln haben sich im Bettungsmaterial von Versorgungsleitungen ausgebreitet. D Aufgegrabene Regenwasserleitung im Bereich der Grundstücksgrenze. E Ausgebaute Steckverbindung einer Steinzeugleitung. Im Spalt zwischen Spitz- und Glockenende befinden sich nur wenige Wurzeln.

4.1.4 Göttingen, Ortslage II

4.1.4.1 Anlass der Maßnahme

Der Betrieb der Schmutzwasser-Hausanschlussleitung des betroffenen Hauses in Göttingen eingeschränkt möglich. Inspektionsvideo der war Das Schmutzwasser-Hausanschlussleitung zeigt eine Verminderung des Querschnittes der Leitung, die als Wurzeleinwuchs gedeutet wurde. Im Scheitel der Leitung ist eine helle Struktur zu erkennen, die längs der Leitung verläuft. Ein Bild aus dem Inspektionsvideo steht nicht zur Verfügung. Vor dem Haus befindet sich ein Feldahorn (Acer campestre L.). Der Baum ist in einem Abstand von 4,1 m zur Leitung in einer Baumscheibe im öffentlichen Straßenraum gepflanzt (Abb. 49). In einem Abstand von 10,5 m befindet sich ein Spitzahorn (Acer platanoides L.), der im privaten Garten des Hauses Nr. 17 gepflanzt ist. In einer Entfernung von 13 m wächst auf der gegenüberliegenden Seite der Straße eine Birke (Betula pendula ROTH). Dieser Baum ist in einem privaten Garten gepflanzt. Der Straßenbereich ist mit Ausnahme der Baumscheiben komplett versiegelt. Die Hausanschlussleitung, aus Keramik mit DN 150, verläuft von einem Revisionsschacht auf dem privaten Grundstück aus unter dem Gehweg her zum Straßenkanal (Abb. 50 A). Die Schmutzwasser-Hausanschlussleitung wurde im Jahr 1953 verlegt, der Revisionsschacht aus Polyethylen wurde im Jahre 2002 neu eingebaut.

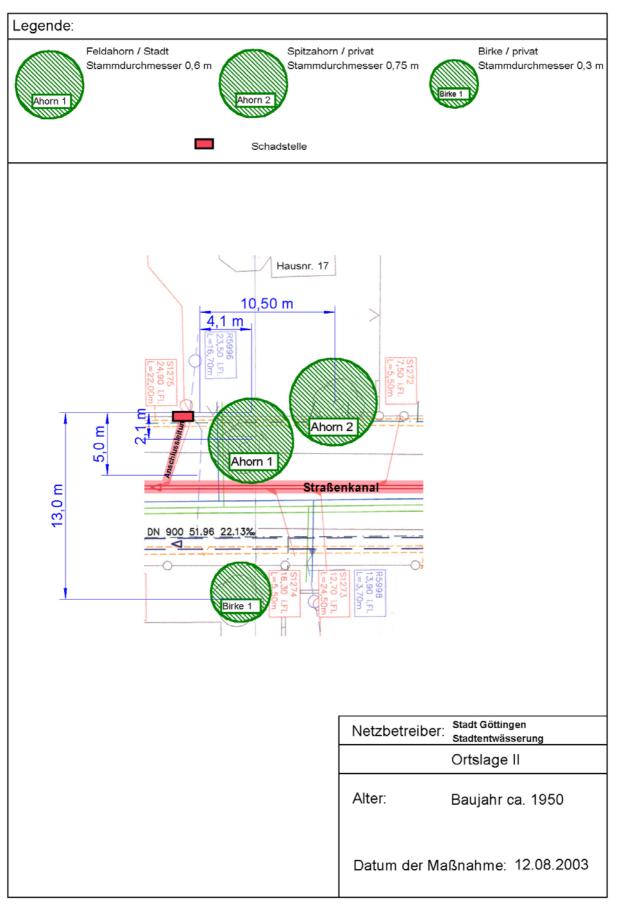


Abb. 49: Übersichtszeichnung der Baumaßnahme Göttingen, Ortslage II.

4.1.4.2 Aufgrabung / Schadensbild

Die Schmutzwasser-Hausanschlussleitung liegt in einer Tiefe von 2,30 m. Im Bereich des Gehweges sind in einer Tiefe von 0,8 m Versorgungsleitungen verlegt (Abb. 50 B). Wurzeln treten hier besonders deutlich an den Grenzen zwischen Bettungsmaterial der Versorgungsleitungen und den umgebenden Bodenschichten auf. Die Versorgungsleitungen waren ebenfalls von Wurzeln umgeben.

Die Aufgrabung der Hausanschlussleitung ergab, dass in dem Teil der Leitung, in dem durch das Inspektionsvideo ein Wurzeleinwuchs nachgewiesen wurde, ein Übergangsstück eingebaut war (Abb. 50 C). Das Übergangsstück stellt den Übergang zwischen der PVC-Leitung und dem Keramikrohr her. Neben dem Übergangstück ist eine Überschieb-Manschette in die Keramikleitung eingebaut. Die Manschette wurde bei nachträglichem Einbau des Schachtes an der Leitung angebracht. Es waren keine Wurzeln zu erkennen, die in die Verbindungen der Leitung gewachsen waren.

Im weiteren Verlauf der Leitung wurde eine Rohrverbindung der Keramikleitung aufgegraben, bei der im Spalt zwischen Spitzende und Glockenende Wurzeln gewachsen waren (Abb. 50 D). Die Wurzeln befinden sich im Scheitelbereich. Die Wurzeln sind nicht in den Querschnitt der Leitung eingedrungen. Die Muffe wurde nicht für eine Analyse geöffnet.

Eine deutliche Ausbreitung von Wurzeln hingegen war im Bettungsmaterial des Schachtes zu beobachten (Abb. 50 E). Seit Bau des Schachtes im Jahr 2002 sind lange, verzweigte Wurzeln außen am Schacht entlang bis in eine Tiefe von 1,6 m gewachsen. Die Wurzeln haben helle Spitzen und bilden hier ein dichtes Polster. Die Wurzeln sind nicht in den Schacht eingewachsen.



Abb. 50: Baumaßnahme Göttingen, Ortslage II. A Umgebung der Baumaßnahme. Der Feldahorn (*Acer campestre*) im öffentlichen Straßenraum befindet sich in einer Entfernung von 4,1 m zur Schmutzwasser-Anschlussleitung. B Wurzeln haben sich an der Grenze zwischen Bettungsmaterial von Versorgungsleitungen und dem Boden der Umgebung ausgebreitet. C Anbindung der PVC-Leitung an die Hausanschlussleitung aus Keramik. Die Überschieb-Manschette stellt eine Abwinkelung der Leitung her. D Ausbreitung von Wurzeln im Ringspalt einer Keramik-Steckmuffe. E Ausbreitung von Wurzeln im Bettungsmaterial eines Polyethylenschachtes.

4.1.5 Göttingen, Ortslage III

4.1.5.1 Anlass der Maßnahme:

Die Hausanschlussleitung wurde im Zuge der straßenweiten Sanierung aller Anschlussleitung

gegen eine neue ausgetauscht. Am Standort wachsen ein städtischer Ahorn und eine Birke, die sich im privaten Besitz befindet. Der Straßenbereich ist komplett versiegelt (asphaltiert). Der Gehweg wird auch als Parkraum genutzt. Die Birke befindet sich im Abstand von 5 m vom SW-Kanal auf einer nicht versiegelten Gartenfläche. Der Ahorn ist 4 m vom SW-Kanal in einer Baumscheibe mit den Maßen 0,8 x 1,2 m gepflanzt.



Abb. 51: Lage von Straßenkanal und Anschlussleitung bei der Baumaßnahme Göttingen, Ortslage III.

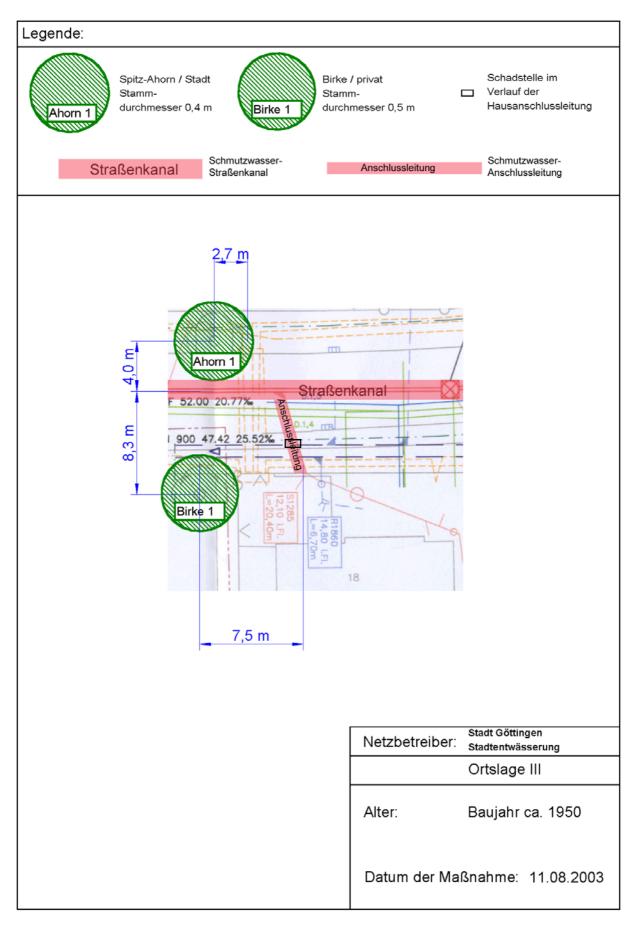


Abb. 52 : Übersichtszeichnung der Baumaßnahme Göttingen, Ortslage III.

Die SW-Hausanschlussleitung aus Steinzeug mit dem Durchmesser DN 150 verläuft bis zur Mündung in den Hauptkanal quer zur Straße.

Die Tiefe der Leitung beträgt an der Schadstelle 2,5 m. Laut Inspektionsvideo sollte sich der ausgewählte Schaden 1,6 m vom Hauptkanal entfernt befinden. Die große im Anzahl der Gehweg verlegten Versorgungsleitungen und deren Nähe zu der beschädigten Hausanschlussleitung machte das Aufgraben der ausgewählten Rohrverbindung nicht möglich. Für die Entnahme von Leitungs- und Wurzelproben wurde die nächstliegende ebenfalls verwurzelte Verbindung ausgewählt, die sich 2,20 m vom Hauptkanal entfernt befand.



Abb. 53: Die Entnahme einer Rohrverbindung der Schmutzwasserleitung wurde hier durch eng kreuzende Versorgungsleitungen erschwert.

4.1.5.2 Analyse der Leitungsprobe

Die aufgegrabene Rohrverbindung des Steinzeugrohres besteht aus einer Keramiksteckmuffe, deren Ringspalt Lehm verschmiert wurden. Trotz des hohen Alters der Leitung war der Lehm in der Verbindung feucht und plastisch. Von außen betrachtet, konnte über den gesamten Umfang der Leitung hinweg kein Wurzeleinwuchs nachgewiesen werden.



Abb. 54: Aufgegrabene Rohrverbindung mit einem Wurzeleinwuchs. Die Rohrverbindung wurde durch Verstreichen des Ringspaltes mit Lehm abgedichtet. Von außen sind keine Wurzeln zu erkennen.

Nach der Entnahme der Rohrverbindung war zu erkennen, dass Wurzeln in die Leitung eingewachsen waren (Abb. 55). Die Wurzeln sind im Bereich des Rohrscheitels sichtbar. Die Wurzeln erstreckten sich auf einen großen Teil des Umfangs, jedoch nicht bis in die Rohrsohle hinein. Die Wurzeln waren teilweise von einer Schicht Rückstände des Leitungsinhaltes bedeckt.



Abb. 55: In der aufgegraben Rohrverbindung der SW-Leitung waren eingewachsene Wurzeln nur im Bereich des Scheitels zu erkennen.

4.1.6 Göttingen, Ortslage IV

4.1.6.1 Anlass der Maßnahme

Die Maßnahme wurde durchgeführt, weil Wurzeln eines Straßenbaumes in der Regenwasser-Anschlussleitung und der Schmutzwasser-Anschlussleitung des Hauses in Ortslage IV in Göttingen eine temporäre Verstopfung verursachten. Die Regenwasserleitung wurde zur Analyse der Ausbreitung der Wurzeln in der Nähe der Leitung teilweise mit der Hand aufgegraben. Die Schmutzwasserleitung wurde zu einem späteren Zeitpunkt entnommen, ohne dabei die Bedingungen in der Nähe der Rohrverbindung zu dokumentieren.

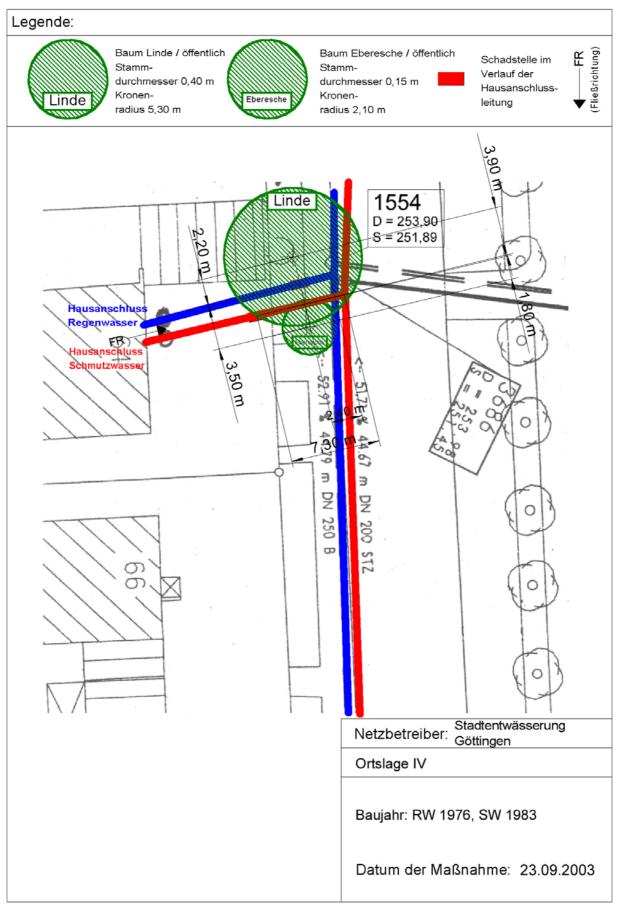


Abb. 56: Übersichtszeichnung der Baumaßnahme Göttingen, Ortslage IV.

4.1.6.2 Aufgrabung / Schadensbild

Die Regenwasser-Leitung ist unter einem Parkplatz verlegt, der sich vor einem Privathaus befindet (Abb. 57). Im Verlauf der Leitung befindet sich in einem Abstand von 5 m zur Einmündung in den Straßenkanal ein Spitzahorn. Die Leitung wurde Untersuchung der Wurzelschäden aufgegraben und untersucht. Die Aufgrabung und der Verlauf einer ebenfalls aufgegrabenen nicht Schmutzwasserleitung wurde dokumentiert.



Abb. 57: Lage der Leitung bei der Aufgrabung der RW-Anschlussleitung in Göttingen, Ortslage III.

Der Boden wurde zuerst maschinell, in der Nähe der Leitung mit der Hand aufgegraben. In der Bettung der Leitung befanden sich eine große Zahl von Wurzeln (Abb. 58). Es waren jedoch keine die Rohrverbindung in eingewachsenen Wurzeln zu erkennen. Die Rohrverbindung wurde herausgetrennt und als Leitungsprobe entnommen. Das Bettungsmaterial unterscheidet sich augenscheinlich vom Boden der Umgebung und enthält in hohem Maße grobkörnige Anteile (Schotter).



Abb. 58: Aufgegrabene Rohrverbindung der Regenwasserleitung. Die Verbindung war hier mit einer leichten Abwinkelung hergestellt. Im Bettungsmaterial sind einige Wurzeln zu erkennen. Es ist keine Wurzel zu erkennen, die in die Rohrverbindung gewachsen ist.

4.1.6.3 Analyse der Leitungsproben

Rohrverbindung aus dem Regenwasserkanal:

Bei der herausgetrennten Rohrverbindung waren das Spitz- und das Glockenende gegeneinander versetzt (Abb. 59). Der Querschnitt der Leitung war im Bereich der Rohrverbindung frei von eingewachsenen Wurzeln. Die Rohrverbindung wurde längs aufgetrennt, um die Ausbreitung der Wurzeln innerhalb der Rohrverbindung zu analysieren.



Abb. 59: Ansicht des Leitungsquerschnittes bei der Leitungsprobe des Regenwasserkanals, Ortslage IV in Göttingen. Es waren keine Wurzeln innerhalb der Leitung zu erkennen.

Die Wurzeln sind innerhalb der Rohrverbindung ausschließlich im Bereich der Leitungssohle gewachsen (Abb. 60). In diesem Bereich war die Dichtlippe nicht vollständig umgeklappt, so dass eine Falte im Elastomer entstanden ist. Die Wurzeln haben im Bereich der Sohle in Räumen Platz gefunden, die durch unzureichenden Zusammenbau zweier Rohre entstanden sind.



bb. 60: Nach Auftrennen der Rohrverbindung war zu erkennen, dass Wurzeln im Bereich der Leitungssohle am Dichtelement der Rohrverbindung gewachsen waren.

Die Wurzeln haben sich in dieser Rohrverbindung ausschließlich außerhalb des Leitungsquerschnittes ausgebreitet (Abb. 61). Die Wurzeln sind in diesem Fall nicht bis in den Querschnitt der Leitung gewachsen. Die Wurzeln sind entlang der Dichtlippe des elastomeren Dichtelementes quer um die Leitung gewachsen und haben sich teilweise dabei verzweigt.



Abb. 61:

Die Wurzeln sind nicht über die Lichtlippe der Steckverbindung in den Leitungsquerschnitt gewachsen. Sie sind entlang des Elastomer-Dichtelment quer um die Leitung gewachsen.

Rohrverbindung aus dem Schmutzwasserkanal:

Im Querschnitt der Schmutzwasserleitung waren keine Wurzeln zu erkennen (Abb. 62). Das Spitzende ist gegen das Glockenende der Muffe versetzt, so dass zwischen den beiden Rohren ein Versatz verblieben ist. Auf der inneren Wandung befindet sich über den gesamten Querschnitt hinweg ein Überzug aus Resten des Leitungsinhaltes.



Abb. 62: Ansicht des Leitungsquerschnittes bei der Leitungsprobe des Schmutzwaserkanal, Ortslage IV in Göttingen. Es waren keine Wurzeln innerhalb der Leitung zu erkennen.

Die Rohrverbindung wurde längs aufgetrennt (Abb. 62). Es war zu erkennen, dass die Rohre nicht gerade zusammengesetzt waren. In den Räumen, die sich durch die unsachgemäße Montage der Rohre ergeben haben, befinden sich keine Wurzeln. Auf dem Spitzende ist ein Abdruck des Dichtelementes, dass Glockenende eingebaut ist, zu erkennen. Die Form des Abdruckes bestätigt ebenfalls die Abwinkelung als Folge der unsachgemäß Abb. 63: verbundenen Rohre.



Aufgetrennte Rohrverbindung mit Elastomerdichtmittel. Das Spitzende war nicht gerade in die Muffe eingesetzt. Es sind keine dichten Wurzelpolster zu erkennen.

Die Verbindung zwischen den beiden Rohren bestand aus einer Steckverbindung mit einem Dichtmittel (Abb. 64). Im Raum zwischen Spitz- und Glockenende befinden sich wenige Wurzeln, die bis an die Dichtlippe heran gewachsen sind. Die Wurzeln sind nicht über die Dichtlippe hinweg gewachsen. Der Raum in der Dichtung, der hinter der Dichtlippe gelegen ist, ist frei von Wurzeln.

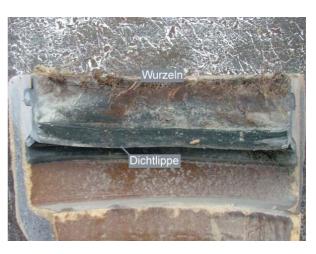


Abb. 64:

Aufgetrenntes Glockenende der Muffe. Auf dem Dichtmittel befindet sich ein lockeres Wurzelpolster.

4.1.7 Baumaßnahme Langenfeld

4.1.7.1 Anlass der Maßnahme

Diese Baumaßnahme wurde durchgeführt, um Schäden durch Wurzeleinwuchs in der Mischwasser-Hausanschlussleitung eines Privathauses zu beseitigen.

Die Tiefe des Straßenkanals (DN 300) beträgt an der Stelle der Einmündung der betroffenen Leitung 7,1 m (Abb. 65). Die Länge der Hausanschlussleitung (DN 150) beträgt 6,5 m von der Außenwand des Hauses aus. Die Leitung verläuft auf einer Länge von 2,2 m mit einer mittleren Tiefe von 1,6 m. Nach 2,2 m fällt die Leitung in starkem Gefälle bis zur Einmündung in den Straßenkanal ab. Der Straßenkanal verläuft in einem Abstand von einem Meter neben den beiden Bäumen (*Acer platanoides L*). Der linke Baum (Ahorn 1 in Abb. 65) befindet sich 3,0 m von der Einmündung der Mischwasser-Hausanschlussleitung entfernt. Der Abstand des anderen Baumes (Ahorn 2 in Abb. 65) beträgt mehr als 7 m.

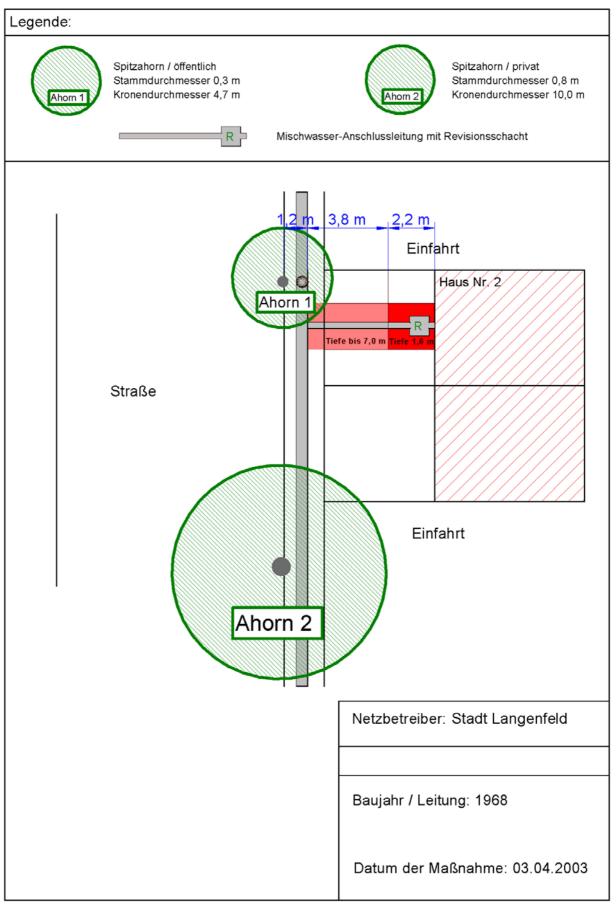


Abb. 65: Übersichtszeichnung der Baumaßnahme Langenfeld.

4.1.7.2 Aufgrabung / Schadensbild

Die Mischwasser-Hausanschlussleitung verläuft unter einem Teil des Privatgrundstückes, der als privater Parkraum genutzt wird (Abb. 66 A). Im Grünstreifen vor dem Haus stehen zwei Spitzahornbäume im Abstand von 12,5 m. Mit Ausnahme des Grünstreifens ist die Bodenoberfläche der gesamten Umgebung des Hauses versiegelt.

Für die Arbeiten wurde ein Verbau aus Spunddielen errichtet, in denen Trägerrahmen (2,3 m x 2,7 m) eingehängt wurden (Abb. 66 B). Die Spunddielen wurden mit einem Rammgerät in den Boden getrieben. Der in Ketten eingehängte Trägerrahmen bildet ein festes Widerlager gegen den seitlichen Druck des Bodens unterhalb der Oberfläche.

Die Mischwasser-Hausanschlussleitung wurde während der Aufgrabung in Teilen entnommen und durch eine provisorische PVC-U-Leitung ersetzt. Die PVC-Leitung in Abb. 66 B gibt den Verlauf der ehemaligen Keramikleitung wieder. Die ursprüngliche Leitung überwindet im Verlauf einer Strecke von 3 Metern ebenfalls ein Gefälle von ca. 5 Metern bis zum Abzweig des Straßenkanals, der mit der Keramikleitung über einen eingesteckten Keramikbogen verbunden war. Die alte Anschlussleitung konnte nicht im eingebauten Zustand photographiert werden, sie wurde vor der Dokumentation der Baumaßnahme entfernt und gelagert. Die Keramikleitung wurde im Hinblick auf Wurzelwachstum analysiert (Kapitel 4.1.7.3).

Der Bereich um den in den Hauptkanal eingebauten Abzweig war stark von Wurzeln mit einem Durchmesser von bis zu 1,5 cm durchwachsen (Abb. 66 C). Der Scheitel der Leitung wurde entfernt. Die Wurzeln haben sich nicht im Mischwasserkanal ausgebreitet.

Der Abzweig war ringförmig von einem festen Wurzelgeflecht umwachsen. Die Wurzeln haben sich stark um alle Rohrverbindungen ausgebreitet. Der Abzweig und die Verbindung zum nächsten Rohr des Straßenkanals wurden ausgebaut und das Wachstum der Wurzel analysiert (Kapitel4.1.7.3).

Nach Freilegen der Leitung war zu beobachten, dass eine verholzte Wurzeln neben der Sohle gewachsen war (Abb. 66 D). Die Wurzel war gegen die Fließrichtung der Leitung gewachsen und hat sich im Bereich des Abzweiges verzweigt.

Die Wurzeln, die in die Rohrverbindungen des Abzweiges eingewachsenen sind, haben ebenfalls den Querschnitt der Leitung erreicht (Abb. 66 E). Auch ragte ein aus der Anschlussleitung selbst einwachsendes Wurzelgeflecht in den Straßenkanal ein. Darüber hinaus sind Wurzeln durch die nächstliegende Rohrverbindung des Straßenkanals eingewachsen.

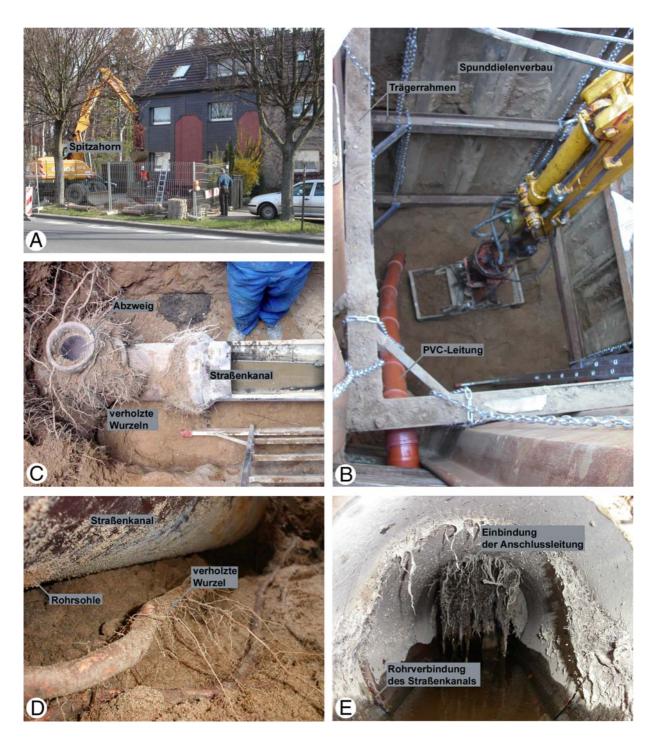


Abb. 66: Baumaßnahme Langenfeld. A Die Bodenoberfläche der Umgebung ist versiegelt. Abgesperrte Baumaßnahme.

B Aufgrabung des Bodens bis zur Anbindung der Mischwasser-Anschlussleitung. Für die Arbeiten wurde ein Verbau aus Spunddielen und Trägerrahmen erstellt. C Deutliche Ausbreitung von Wurzeln an den Rohrverbindungen des Abzweiges eines Mischwasser-Straßenkanals. D Eine verholzte Wurzel ist neben der Sohle parallel zum Straßenkanal gewachsen. E Querschnittsverminderung des Straßenkanals durch Wurzeln. Die Wurzeln sind durch die Rohrverbindungen des Straßenkanals eingewachsen. Durch die Einbindung der Anschlussleitung ragen ebenfalls Wurzeln in den Straßenkanal.

4.1.7.3 Analyse der Leitungsprobe I

Die letzten zwei Meter der Hausanschlussleitung mit DN 150 bis zu ihrer Einmündung in den Straßenkanal waren in einem Keramikrohr mit DN 300 verlegt. Die Leitung war mit starkem Gefälle eingebaut. Der Raum zwischen den Rohren war mit Sand als Bettungsmaterial für das innere Rohr gefüllt. Beide Enden des Außenrohres waren mit Beton vergossen, so dass die zentrale Lage des Innenrohres erhalten geblieben war.

Eine Hälfte des Außenrohres der Leitung wurde entfernt (Abb. 67 A). In der Sandfüllung sind schichtförmige Ablagerungen zu erkennen. Die Stärke der Ablagerungen nimmt mit der Tiefe der Leitung bei Betrieb zu. Im Teil der Leitung, der mit dem Hauptkanal verbunden war, befinden sich starke Rückstände des Mischwassers, das aus der Leitung ausgetreten ist. Etwa die Hälfte der Füllung war von Rückständen aus dem Abwasser durchsetzt.

Der Verguss aus Beton war an der Seite, die nach oben gerichtet war, von Wurzeln umgeben (Abb. 67 B). Die Wurzeln konnten die mit Beton vergossene Muffe des Außenrohres durchdringen. Vermutlich haben die Wurzeln Risse im Verguss durchwachsen und konnten sich in der Füllung zwischen den beiden Rohren nach unten ausbreiten. Es ist zu erkennen, dass ein dicht abschließender Pfropfen aus Beton die obere Muffe verschlossen hatte. Die innere Rohrverbindung ist in der linken Bildhälfte zu erkennen. Im inneren Rohr der Anschlussleitung trat an den Rohrverbindungen kein Wurzeleinwuchs auf.

Die Füllung zwischen den beiden Rohren war auf der nach oben gerichteteten Seite teilweise durchwurzelt. Dieser Teil der Bettung des Innenrohres besteht zum Teil aus unverschmutztem Sand (Abb. 67 C). Die Wurzeln haben sich hier bis zu den schichtförmigen Rückständen des Leitungsinhaltes nach unten ausgebreitet. Die Rückstände des Leitungsinhaltes im eingefüllten Sand sind kristallin. Das Bild gibt die Kontaktfläche der Füllung mit dem äußeren Rohr wieder. Die abgebildeten Wurzeln sind an der inneren Wandung des Außenrohres gewachsen. Proben dieser Wurzeln wurden auf Schädigungen durch Abwasser untersucht (Kapitel 4.1.7.5).

Im unteren Teil der Leitung ist eine starke Verunreinigung des eingefüllten Sandes zu erkennen (Abb. 67 E). Die Verschmutzung nimmt Richtung Einmündung in den Straßenkanal zu. Das Abwasser hat sich bei Betrieb der Leitung in diesem annähernd senkrecht eingebauten Abschnitt des äußeren Rohres aufgestaut. Das Wachstum von Wurzeln ist in den verschmutzten Bodenbereichen nahezu ausgeblieben. Im unteren Teil der Füllung sind nur wenige Wurzeln gewachsen.

Die Füllung zwischen den beiden Keramikrohren, ist im Bereich der Einmündung in den Straßenkanal stark durch Rückstände des Leitungsinhaltes verschmutzt (Abb. 67 D). Das abgebildete Substrat stellt die Kontaktfläche der Füllung mit dem Außenrohr dar. Dieser Teil der Füllung hatte eine grau-blaue Färbung. Das Material ist dunkel und enthält außer Sand auch feinkörnige, aus dem Leitungsinhalt ausgeschwemmte Stoffe. Darin wachsende Wurzeln waren nicht mehr lebendig bzw. stark geschädigt. Teile dieser Wurzeln wurden auf Schädigung durch Kontakt mit dem Abwasser untersucht (Kapitel 4.1.7.5).



Abb. 67: Analyse der Leitungsproben einer Mischwasser-Hausanschlussleitung. Die Leitung (DN 150) war in einem Außenrohr (DN 300) verlegt. A Nach Öffnen des Außenrohres wurde eine Schichtenbildung im Füllmaterial sichtbar. Rückstände des Mischabwassers haben im eingefüllten Sand Ablagerungen hinterlassen. B Linke äußere Rohrverbindung, die in Bild A wiedergegeben ist. Wurzeln sind in die mit Beton vergossene, äußere Rohrverbindung gewachsen. C Füllung des Außenrohres im Bereich geringer Verunreinigung. Die Ausbreitung von Wurzeln wird durch die Rückstände des Abwassers begrenzt. Die Wurzeln sind bis an die kristallinen Rückstände des Abwassers gewachsen. D Füllung im Bereich der Einbindung in den Straßenkanal (Bild E starke Verunreinigung). Die Rückstände bestehen hier auch aus Schwemmstoffen. Die Wurzeln sind bis an die Rückstände gewachsen. E Verteilung der Rückstände des Abwassers im Füllmaterial. Die Verunreinigung beginnt bei einer Bodentiefe von etwa etwa 5,5 m. Ihre Stärke nimmt bis in eine Tiefe von 6,5 m zu.

4.1.7.4 Analyse des Leitungsprobe II

Die verwurzelte Steckmuffe des Keramikrohres wurde längs aufgetrennt. Sowohl außerhalb, als auch innerhalb der Rohrverbindung sind Wurzeln von verschiedenem Alter gewachsen (Abb. 68 A). Außerhalb verlaufen die Wurzeln ungeordnet. Eine der stärksten Wurzeln innerhalb der Rohrverbindung hat das Spitzende quer umwachsen und ist bis in den Querschnitt der Leitung vorgedrungen. Ein feines Geflecht von Wurzeln bedeckt das Dichtelement auf dem Spitzende über den gesamten Umfang der Leitung.

Eine der verholzten Wurzeln ist durch Abschälen des Abschlussgewebes hervorgehoben (Abb. 68 A). Zwischen der Muffe bzw. der Dichtung und dem eingesetzten Spitzende des nächsten Rohres ist ein Raum verblieben. Die Wurzeln füllen diesen Raum in der Rohrverbindung mit einem engen Geflecht aus. Neben dem Geflecht ist die verholzte Wurzel zu erkennen, die im Bild quer angeschnitten ist. Diese Wurzel hat die Muffe quer umwachsen, bevor sie in die Leitung eingedrungen ist (Abb. 68 B).





Abb. 68:

Analyse des Wurzelschadens in der Rohrverbindung eines Mischwasser-Straßenkanals. Eine Hälfte der Muffe wurde entfernt. A Gesamtansicht der geöffneten Rohrverbindung. Die Wurzeln sind außerhalb der Rohrverbindung ungeordnet gewachsen. Innerhalb der Rohrverbindung ist der gesamte Raum zwischen Spitzende und Glockenende mit einem dünnen ungeordneten Geflecht von Wurzeln ausgefüllt. Eine verholzte Wurzel hat die Leitung in der Rohrverbindung quer umwachsen. Die Wurzel ist durch Abschälen hervorgehoben. B Zwischen Spitzende und Glockenende ist ein Raum verblieben, der von Wurzeln ausgefüllt wurde. Die Dichtung hatte zum Zeitpunkt der Analyse keinen Kontakt zum Spitzende des nächsten Rohres.

4.1.7.5 Analyse der Wurzelproben

Wurzeln, die in Substrat mit geringer Verschmutzung gewachsen sind, weisen nur geringe Schädigungen auf. Das Abwasser hatte sich im Substrat zeitweise zurückgestaut. Die Wurzel ist in der Nähe zu kristallinen Rückständen des Abwassers gewachsen (Abb. 67 C). Der Querschnitt der Wurzel ist annähernd kreisförmig (Abb. 69A). Es treten Wurzelhaare auf. Das Abschlussgewebe umgibt die Wurzel nur zum Teil. Die Zellen der Rinde sind regelmäßig angeordnet und lassen keine Schädigung erkennen. Die Endodermis ist nicht als durchgehender Ring von Zellen zu erkennen. Die Leitgewebe sind vorhanden und weisen keine deutliche Schädigung auf. Die verholzten Leitelemente des Xylems treten durch ihre starke rote Färbung hervor.

Wurzeln, die in Substrat gewachsen sind, das durch Abwasser verschmutzt war, weisen Anzeichen von Schädigungen auf. Der Querschnitt einer Wurzel, die in Substrat gewachsen ist, in dem sich dauerhaft Abwasser zurückgestaut hat, ist unregelmäßig abgeflacht (Abb. 69 B). Das Abschlussgewebe ist vorhanden, umgibt die Wurzel jedoch nicht als zusammenhängende Zellschicht. In der Rinde sind die Zellen unregelmäßig angeordnet und teilweise kollabiert. Die Gewebe im Zentralzylinder sind vorhanden. Eine deutliche Schädigung der Endodermis und der Leitelemente konnte hier nicht nachgewiesen werden.

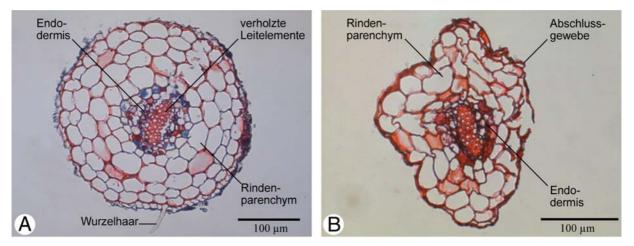


Abb. 69: Analyse der Wurzelproben der Baumaßnahme Langenfeld. A Querschnitt einer Wurzel, die in leicht verschmutztem Substrat gewachsen ist. Die Gewebe lassen nur geringe Schädigung erkennen. B Querschnitt einer Wurzel, die in stark verschmutztem Substrat gewachsen ist. Das Abschlussgewebe ist teilweise zerissen. Die Zellen der Rinde und der Querschnitt des Organs ist deformiert.

Während der Bauarbeiten wurde im Bodenaushub ein Stück Holz gefunden, am Stirnholz wurde es als Werkzeugstiel identifiziert. Die peripheren Bereiche des Holzes waren von Wurzeln durchwachsen. Auf der Oberfläche des Holzkörpers waren Wurzeln zu erkennen. Die Wurzeln sind zum Teil auch in das Holz eingewachsen.

Das Holz des Griffes war durch den Verbleib im Boden weich und hatte seine Stabilität verloren. Das Holz wurde geschnitten und mikroskopisch untersucht. Die peripheren Bereiche des Holzes (Abb. 70) waren von Wurzeln durchwachsen. Die Wurzeln befinden sich im Bereich einer Jahresgrenze im Holz. Die Zellschichten des ringporigen Holzes wurden von Wurzeln in verschiedenen Richtungen durchwurzelt.

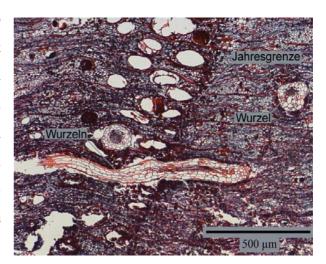


Abb. 70

Primäre Wurzeln sind in peripheren Bereichen von ringporigem Holz gewachsen. Die Wurzeln haben das Holz in unterschiedlicher Richtung durchwachsen. Eine der Wurzeln ist in einem Gefäß im Bereich der Jahresgrenze gewachsen.

4.2 Öffentlich betriebene Kanäle

4.2.1 Fürstenberg, Ortslage I

4.2.1.1 Anlass der Maßnahme

Aufgraben von durchwurzelten Rohrverbindungen einer unglasierten Keramikleitung, die im Jahr 1992 erbaut wurde. Die Leitung ist aus muffenlosen Rohren hergestellt, die mit Hilfe von Überschiebringen verbunden sind. Die Leitung wurde für die Analyse der Wurzelschäden und zur Entnahme von Wurzelproben aufgegraben. In die Rohrverbindungen waren Wurzeln eingewachsen, die Rohrverbindungen wurden im Jahr 1998 in geschlossener Bauweise durch Injektion eines Polyurethan-Materials [94] saniert.

4.2.1.2 Aufgrabung / Schadensbild

Die Baumaßnahme wurde in einem Gebiet durchgeführt, in dem die Bodenoberfläche nicht versiegelt ist. Die Leitung ist in einer Tiefe von 1,5 m verlegt. Die Bodenoberfläche wurde bis zum Erreichen des Scheitels maschinell aufgegraben (Abb. 71 A).





Abb. 71: Baumaßnahme Fürstenberg, Ortslage I. A Maschinelle Aufgrabung der unversiegelten Oberfläche bis Erreichen des Scheitels. B Auf dem Scheitel der Leitung haben sich Wurzeln ausgebreitet. Die Wurzeln haften einer braunen Schicht auf der äußeren Wandung der Leitung an. Die Schicht ist nach dem Aufgraben und Freilegen der Leitung erhalten geblieben.

Bei weiterem Aufgraben der Leitung war zu erkennen, dass auf dem Scheitel der Leitung Wurzeln gewachsen waren (Abb. 71 B). Die Wurzeln sind aus dem umgebenden Boden in das Bettungsmaterial der Leitung gewachsen und liegen der äußeren Oberfläche der Leitung an. Die Wurzeln bilden hier ein lockeres Geflecht, das der Leitung fest anliegt. Die Wurzeln sind zwischen den Keramikrohren und den Überschiebringen in die Rohrverbindungen eingewachsen. Die eingewachsenen Wurzeln waren mit den Wurzeln im Boden fest verbunden.

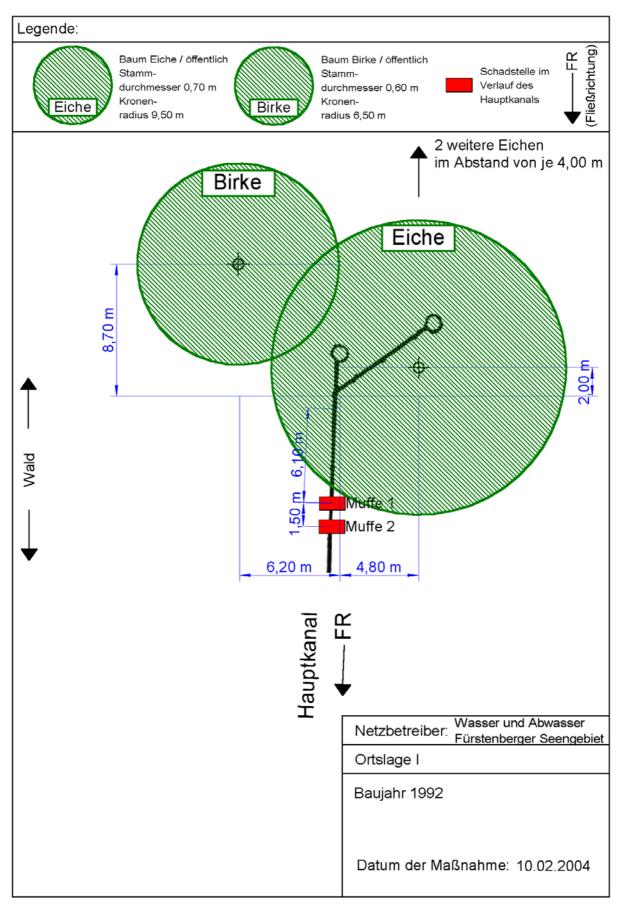


Abb. 72: Übersichtszeichnung der Baumaßnahme Fürstenberg, Ortslage I.

4.2.1.3 Analyse der Leitungsproben

Rohrverbindung 1:

Auf der äußeren Wandung der Leitung befindet sich ein Geflecht aus Wurzeln (Abb. 73). Ein großer Teil der Wurzeln ist in Längsrichtung zur Leitung gewachsen. Am Rand des Überschiebringes haben die Wurzeln ein Polster gebildet, sie haben hier die Leitung in Querrichtung umwachsen. An der Rohrverbindung sind mehrere verholzte Wurzeln unter den Überschiebring gewachsen.



Abb. 73: Durchwurzelte Rohrverbindung als Leitungsprobe aus einem Mischwasserkanal.

Die Wurzeln haben sich auf dem Scheitel der Leitung und am Rand des Überschiebringes ausgebreitet.

Die Wurzeln haben sich innerhalb der Rohrverbindung stark verzweigt. Sie haben unter dem Überschiebring ein dichtes Polster gebildet (Abb. 74). Unter dem Überschiebring ist ebenfalls Injektionsmaterial zu erkennen, welches sich teilweise zwischen den Wurzeln verteilt hat. Das Injektionsmaterial nimmt dabei teilweise die Räume ein, die zwischen den Wurzeln verblieben sind.



Abb. 74: Die Wurzeln haben innerhalb des Überschiebringes ein Geflecht gebildet und nahezu alle Räume ausgefüllt.

Rohrverbindung 2:

Eine verholzte Wurzel ist aus dem Boden der Umgebung in Richtung der Leitung gewachsen (Abb. 75). Die Wurzel ist nach Kontakt mit der Leitung parallel zur Oberfläche des unglasierten Rohres bis an die Rohrverbindung gewachsen. Im Kämpferbereich ist die Wurzel unter den Überschiebring vorgedrungen, sie hat sich dabei am Rand des Überschiebringes verzweigt. Ein Teil der Wurzeln verlief außerhalb der Überschiebmuffe parallel zur Leitung.



Abb. 75: Ein verholzte Wurzel ist im Bettungsmaterial in Richtung der Leitung gewachsen. Nach Erreichen der Leitung, ist sie parallel dazu weiter gewachsen. Die Wurzel hat sich am Rand des Überschiebringes in die Rohrverbindung hinein verzweigt.

Die Rohrverbindung wurde einem mit Injektionsmaterial saniert [94]. Das Kunststoffmaterial wurde von innen in die Hohlräume der Rohrverbindungen eingebracht. Teil des Materials ist nicht Überschiebring verblieben, sondern ist am Überschiebringes des Rohrverbindung ausgetreten (Abb. 76). Das Polyurethan-Gel ist dadurch mit dem Bettungsmaterial der Leitung in Kontakt gekommen und Abb. 76: hat einen Teil davon außen an der Leitung festgeklebt.



b. 76: Rohrverbindung, die mit Hilfe eines
 Injektionsmaterials [94] saniert wurde. Das
 Injektionsmaterial ist unter dem Überschiebring

in das Bettungsmateriel der Leitung ausgetreten.

Das Injektionsmaterial hat den Raum in der Rohrverbindung (unter dem Überschiebring) nur ungleichmäßig ausgefüllt (Abb. 77). Das Kunststoffmaterial (weiss) hat sich bei der Injektion nicht über den ganzen Umfang der Leitung verteilt. Im Bereich des Scheitels befindet sich weniger Injektionsmaterial (Pfeil). Eine gleichmäßige Verfüllung der Räume in der Rohrverbindung wurde durch das dichte Wurzelgeflecht verhindert. Die Abb. 77: Wurzeln wurden durch die Injektion nicht geschädigt, die Injektion scheint daher nicht geeignet, die Wiederholung eines Befalls oder Verschlusses zu verhindern.



Abb. 77: Injektionsmaterial in einer Rohrverbindung. Das Material hat sich nur ungleichmäßig zwischen den Wurzeln verteilt. Im Bereich des Scheitels (Pfeil) befindet sich eine geringere Menge Material.

In der Rohrverbindung sind Wurzeln zu erkennen. die nach Einbringen des Injektionsmaterials weitergewachsen sind (Abb. 78). Diese Wurzeln sind vor kurzer Zeit gewachsen, hell und holzfarben, und schienen nicht in Kontakt mit Bettungsmaterial oder Inhalt der Leitung gestanden zu haben. Eine verholzte Wurzel ist in der Rohrverbindung am Rand der Überschiebmuffe entlang, quer um Wurzeln Abb. 78: die Leitung gewachsen. Die außerhalb der Rohrverbindung sind dunkel, teilweise sind zwischen ihnen Reste des Bettungsmaterials zu erkennen. Außerhalb der



Abb. 78: Innerhalb des Überschiebringes sind die Wurzeln im Injektionsmaterial quer zur Leitung gewachsen. Außerhalb der Rohrverbindung sind Wurzeln zu erkennen, die unter den Überschiebring wachsen.

Rohrverbindung ist eine große Anzahl von Wurzeln zu erkennen, die in Richtung des Injektionsmaterial bzw. unter den Überschiebring gewachsen sind.

Die Leitung wurde nach Einwachsen der Wurzeln bereits durch eine Hochdruckspülung gereinigt. Durch diese Maßnahme wurde nach Angaben des Netzbetreibers der Abfluss in der Leitung wieder hergestellt. Im Querschnitt der Leitung befanden sich zum Zeitpunkt der Analyse nur wenige Wurzeln. In der Nähe des Scheitels ist eine Wurzel erneut eingewachsen (Abb. 79). Die Wurzel hat sich stark verzweigt. Die in den Querschnitt der Leitung ragenden Wurzelspitzen sind hell gefärbt und frei von einem Überzug aus Resten des Leitungsinhaltes.

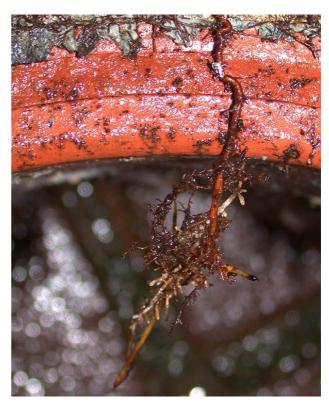


Abb. 79: Die Leitung wurde nach dem Einwuchs von Wurzeln gereinigt. Nach der Reinigung ist eine Wurzel ist in der Nähe des Scheitels in den Querschnitt der Leitung gewachsen. Die Wurzel hat sich hier stark verzweigt.

Auf der inneren Wandung der Leitung befindet sich oberhalb des mittleren Füllstandes ein Polster aus eingewachsenen Wurzeln. (Abb. 80). Die Spitzen der Wurzeln sind hell und haften auf dem keramischen Material des Rohres. Neben den Wurzeln ist Injektionsmaterial zu erkennen, welches helle Bereiche zwischen den Wurzeln bildet. Die Wurzeln wurden bei der Sanierung nicht vollständig mit Injektionsmaterial bedeckt. Sie konnten bis zur Aufgrabung der Leitung weiterwachsen.



Abb. 80: Ausbreitung von Wurzeln an der inneren Wandung einer unglasierten Keramikleitung. Die Wurzelspitzen haften auf der inneren Oberfläche der Leitung.

4.2.2 Fürstenberg, Ortslage II

4.2.2.1 Anlass der Maßnahme

Aufgraben von einer unglasierten Keramikleitung Baujahr 1992. Die Leitung ist, wie die im Kapitel 4.2.1 beschriebene, aus muffenlosen Rohren zusammengesetzt, die mit Hilfe von Überschiebringen verbunden sind. Die Leitung wurde für die Analyse der Wurzelschäden an den durchwurzelten Rohrverbindungen und zur Entnahme von Wurzelproben aufgegraben. In die Rohrverbindungen waren Wurzeln eingewachsen, die Rohrverbindungen wurden hier jedoch nicht wie bei der im Kapitel 4.2.1 beschriebenen Leitung durch Injektion von Polyurethan-Gel saniert.

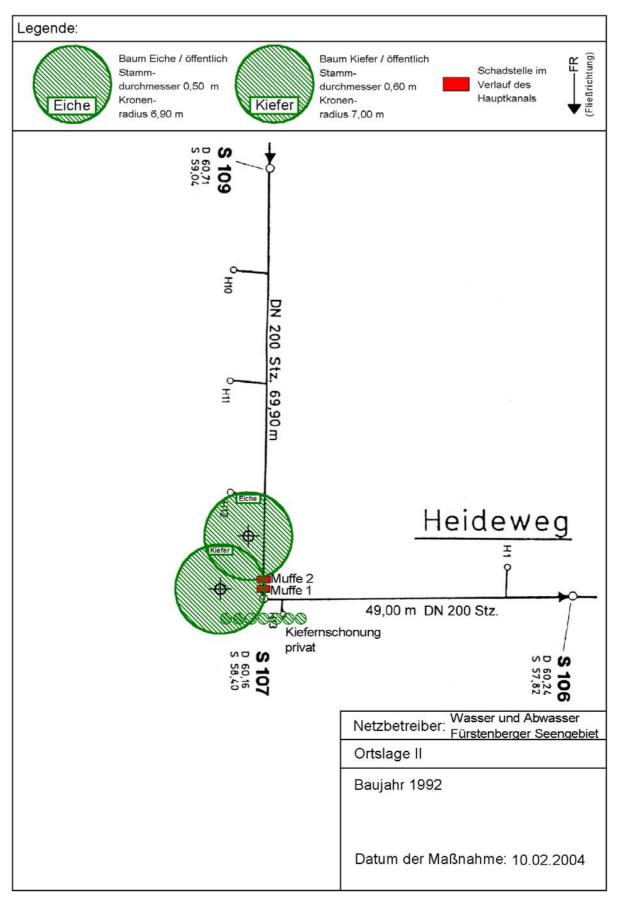


Abb. 81: Übersichtszeichnung der Baumaßnahme Fürstenberg, Ortslage II.

4.2.2.2 Aufgrabung / Schadensbild

Die Baumaßnahme wurde in einem Gebiet durchgeführt, in dem die Bodenoberfläche nicht versiegelt ist. Die Leitung ist in einer Tiefe von 2,2 m verlegt. Die Bodenoberfläche wurde bis zum Erreichen des Scheitels maschinell aufgegraben (Abb. 82 A). Die Leitung befindet sich an der Stelle der Aufgrabung in einer Entfernung von 7,5 m zu einer Eiche.

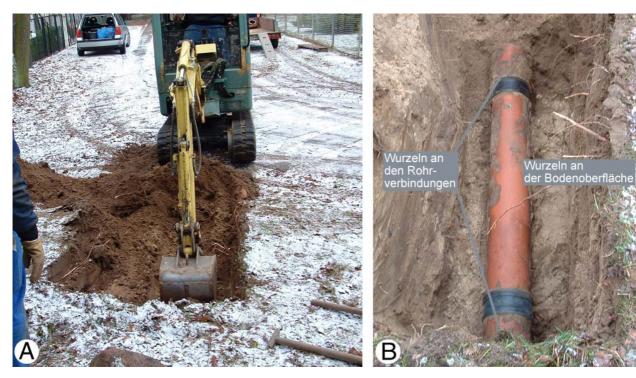


Abb. 82: Aufgrabung für die Baumaßnahme Fürstenberg, Ortslage II. A Maschinelle Aufgrabung der Leitung bis Erreichen des Scheitels. B Der Scheitel der Leitung ist zwischen den Rohrverbindungen frei von Wurzeln. An den Rohrverbindungen und im Leitungsgraben seitlich der Leitung sind Wurzeln zu erkennen.

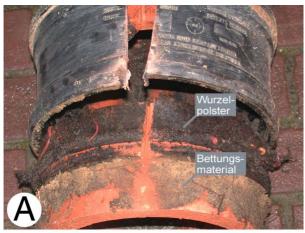
Bei Aufgraben der Leitung war zu erkennen, dass Wurzeln nahe der Bodenoberfläche gewachsen sind (Abb. 82 B). Diese Wurzeln sind teilweise aus dem umgebenden Boden in das Bettungsmaterial der Leitung gewachsen. An den Rohrverbindungen waren Wurzeln in die Leitung gewachsen. Aus der aufgegrabenen Leitung wurden zwei Rohrverbindung für die Analyse herausgetrennt.

4.2.2.3 Analyse der Leitungsproben

Rohrverbindung 1:

Nach Auftrennen des Überschiebringes war zu erkennen, dass die Wurzeln im Überschiebring ein dichtes Polster gebildet hatten (Abb. 83 A). Das Wurzelpolster füllt nahezu alle Räume zwischen Keramikleitung und dem Überschiebring aus. Außerhalb des Überschiebringes befinden sich Reste des Bettungsmaterials. Diese Rohrverbindung wurde offenbar nicht, wie in den Bestandsunterlagen des Netzbetreibers verzeichnet, mit einem Injektionsmaterial saniert. Zum Zeitpunkt der Analyse befand sich in der geöffneten Rohrverbindung eine große Menge organischen Materials. Unter dem Überschiebring befand sich im Bereich der Kämpfer ein von feinkörnigen Stoffen und vielen Regenwürmern durchsetztes Wurzelpolster. Innerhalb des Überschiebringes sind am Rand des Kunststoffes entlang frische und verdickte Wurzeln innerhalb der Schwemmstoffe gewachsen (Abb. 83 C).

Abb. 83:





Aufgetrennte

Schwemmstoffe.



unglasierten Keramikleitung. Alle Räume in der Überschiebmuffe werden von einem Wurzelpolster ausgefüllt. В Wurzelpolster in der Rohrverbindung enthielt viele Schwemmstoffe. Im Bereich der Kämpfer außerdem befanden sich Regenwürmer, die bei der Analyse der Rohrverbindung lebendig waren. C Im Wurzelpolster waren helle Wurzeln mit verdickten Spitzen zu erkennen. Zwischen Wurzeln befanden sich

Rohrverbindung

Die Wurzeln sind hell und haben eine deformierte Spitze. Die Wurzeln sind lebendig. Der außergewöhnlich hohe Gehalt an organischem Material und das Auftreten von Regenwürmern und anderen Kleintieren in der Muffe deutet darauf hin, dass diese Leitung in der letzten Zeit kein Abwasser mit hoher organischer Belastung transportiert hat. Geringe Spuren von Ammoniak oder ein längerer Kontakt von Lebewesen zu Abwasser machen ihr Überleben unmöglich.

Rohrverbindung 2:

Eine verholzte Wurzel ist im Bereich des Scheitels auf der Oberfläche der Leitung gewachsen (Abb. 84). Die Wurzel hat sich am Rand des Überschiebringes verzweigt, ein Teil ist in den Überschiebring eingewachsen, ein anderer hat sein Wachstum parallel zur Leitung auf dem Rohr fortgesetzt. Am Rand des Überschiebringes hat sich die Wurzel mehrfach verzweigt (Abb. 84). Neben den Wurzeln, die unter den Überschiebring gewachsen sind, waren Seitenwurzeln abgezweigt, welche die Leitung quer umwachsen (Abb. 84, die Pfeile deuten die Wuchsrichtung von einigen Seitenwurzeln an). Die Seitenwurzeln sind an mehreren Stellen über den Querschnitt verteilt unter den Überschiebring gewachsen.

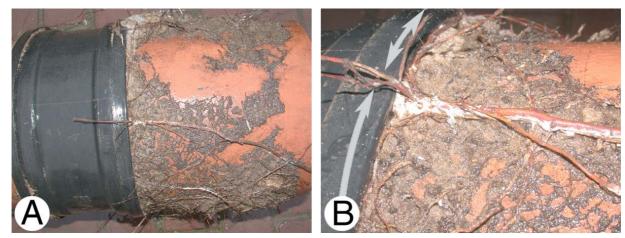


Abb. 84: Ausbreitung von Wurzeln in der Nähe einer Rohrverbindung mit Überschiebring. A Eine verholzte Wurzel ist außen auf dem Scheitel der unglasierten Keramikleitung unter den Rand eines Überschiebringes gewachsen.

B Die auf dem Scheitel der Leitung gewachsene Wurzel hat sich am Rand des Überschiebringes verzweigt. Eine Wurzeln ist parallel der Leitung gewachsen (nach links). Die abzweigenden Wurzeln sind quer um die Leitung und unter den Überschiebring gewachsen.

Außer der verholzten Wurzel ist außen auf der Leitung eine Schicht bräunlicher Rückstände zu erkennen, die auf dem Rohr haftet. Diese Rückstände waren überall dort zu erkennen, wo sich Wurzeln auf dem Rohr befanden.

Laut den Bestandsunterlagen des Netzbetreibers wurde diese Rohrverbindung nicht in geschlossener Bauweise saniert. An dieser Rohrverbindung war jedoch Injektionsmaterial außerhalb des Überschiebringes, als Belag an der äußeren Rohrwandung erkennbar. Die

Wurzeln sind zum Teil von Injektionsmaterial bedeckt, das sich auf den verholzten Wurzeln befindet. Die Rohrverbindung wurde längs aufgetrennt und der Überschiebring geöffnet.

Es war deutlich zu erkennen, dass bei dieser Rohrverbindung eine Sanierung mit Injektionsmaterial durchgeführt worden war. Innerhalb des Überschiebringes befand sich Injektionsmaterial und ein Wurzelpolster (Abb. 84). Das Injektionsmaterial ist zwischen den Wurzeln zu erkennen. Das Material hat sich nicht vollständig in dem zur Verfügung stehenden Raum zwischen den Wurzeln verteilen können (vgl. Abb. 77). Die Wurzeln haben nahezu alle Zwischenräume im Überschiebring durch mehrmaliges Umwachsen der Leitung in Querrichtung ausgefüllt. Die Wurzeln sind nach Ausfüllen des Überschiebringes in den Querschnitt der Leitung gewachsen.







Abb. 85 Analyse von Leitungsproben mit Überschiebring A Eine verholzte Wurzel ist am Rand des Überschiebringes in die Rohrverbindung einer unglasierten Keramikleitung eingewachsen. Am Rand des Überschiebringes ist Injektionsmaterial zu erkennen. B Wurzelpolster, das sich unter einem Überschiebring ausgebreitet hat. Die Rohrverbindung wurde mit einem Injektionsmaterial saniert. Zwischen den Wurzeln sind Räume zu erkennen, die von Injektionsmaterial frei sind (Pfeile). C Wurzeln sind in einem Spalt gewachsen, der sich außen am Überschiebring befindet. Der Spalt steht nicht mit dem Querschnitt der Leitung in Verbindung. Bei vollständiger Durchwurzelung des Raumes können die Wurzeln das Medium in der Leitung nicht erreichen.

Am äußeren Rand der Überschiebringes sind Wurzeln in einem Spalt gewachsen (Abb. 84). Die Wurzeln sind hier in einem Raum gewachsen, der an der eingebauten Leitung nur wenig Boden enthielt. Die Wurzeln sind in Querrichtung zum Rohr gewachsen und haben dabei den Spalt am Rand des Überschiebringes teilweise ausgefüllt. Durch diesen Spalt besteht kein Zugang zum Querschnitt der Leitung.

4.2.3 Herten

4.2.3.1 Anlass der Maβnahme

Die Baumaßnahme wurde mit dem Ziel durchgeführt, Schäden durch Wurzeleinwuchs im Mischwasser-Hauptkanal in einem Wohngebiet zu beseitigen. Im Verlauf der gesamten Straßenlänge von etwa 120 m wurde ein neuer Kanal an anderer Stelle verlegt. Um die privaten Hausanschlüsse umzuschließen, wurde auch die alte durch Wurzeleinwuchs beschädigte Leitung teilweise aufgegraben.

Die Tiefe des Scheitels des alten Straßenkanals (DN 300) beträgt am Ort der aufgegrabenen Rohrverbindungen etwa 2,7 m. Dieser Kanal liegt an der betrachteten Schadstelle in einem Abstand von 4,6 m zu einem Baum (Spitzahorn, *Acer platanoides L*, Abb. 86).

4.2.3.2 Aufgrabung / Schadensbild

Die Leitung verläuft nahe der Straßenmitte. Die nähere Umgebung wurde maschinell bis etwa 0,3 m oberhalb des Scheitels aufgegraben (Abb. 87 A). Für die Arbeiten an der Leitung wurde ein Bereich ausgewählt, in welchem durch ein Inspektionsvideo der Einwuchs von Wurzeln in zwei Rohrverbindungen nachgewiesen werden konnte. Bei dieser Baumaßnahme wurden aus dem Bettungsmaterial der Leitung und dem umgebenden Boden Proben entnommen. Die Entnahme von Bodenproben erforderte ausreichend zugänglichen Bodenraum nahe der freigelegten Leitung. Für die Arbeiten wurde ein Verbau mit einer Breite von 3,0 m eingesetzt. Die Ergebnisse der Analyse der Bodenproben sind in Kapitel 5.4 dargestellt.

Der Boden direkt um die Leitung wurde zur Untersuchung der Ausbreitung von Wurzeln in der Nähe von Rohrverbindungen und Leitung entfernt (Abb. 87 B). Nur im Bereich der beiden aufgegrabenen Rohrverbindungen waren außen an der Leitung Wurzeln zu erkennen. Mit Ausnahme des Wurzeleinwuchses war die Leitung im Bereich des Scheitels und der Kämpfer frei von Beschädigungen.

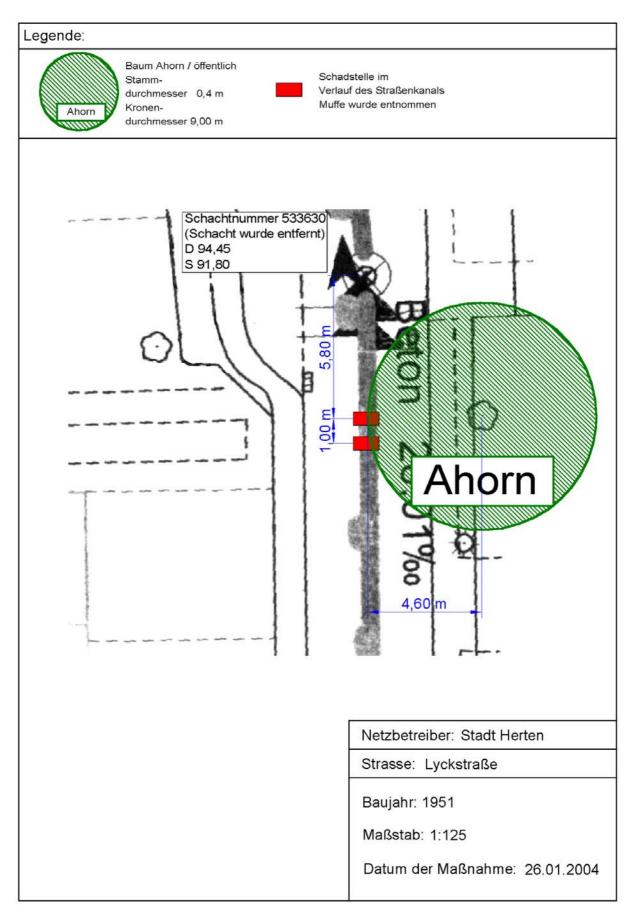


Abb. 86: Übersichtszeichnung der Baumaßnahme Herten.

Im Bettungsmaterial der Leitung sind Wurzeln gewachsen, die an der äußeren Oberfläche der Leitung an beiden Rohrverbindungen Polster bilden (Abb. 87 C). Die Wurzeln haben sich im Bettungsmaterial parallel zur Leitung im Bereich des Zwickels neben der Sohle ausgebreitet. Die durchwurzelten Rohrverbindungen wurden aus der Leitung herausgetrennt und die Ausbreitung der Wurzeln in der Rohrverbindung untersucht.

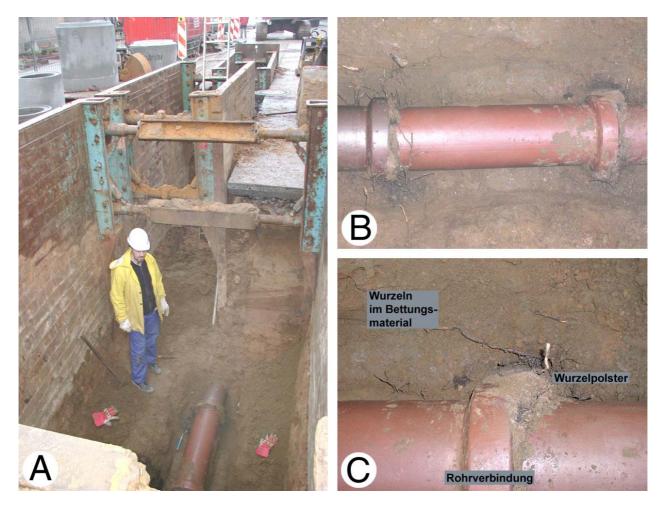


Abb. 87: Aufgrabung zur Freilegung des Straßenkanals bei der Baumaßnahme in Herten. A Für die Entnahme von Leitungsund Bodenproben wird ein großräumiger Verbau eingesetzt. B Aufgegrabener Abschnitt eines KeramikStraßenkanals DN 300 mit verwurzelten Rohrverbindungen. C Aufgegrabene Rohrverbindung des MWStraßenkanals. Wurzeln, die aus dem Bettungsmaterial an die Rohrverbindung gewachsen sind, bilden an der
äußeren Wandung der Leitung ein Polster.

4.2.3.3 Entnahme von Bodenproben

Für die Entnahme der Bodenproben wurde der Boden an verschiedenen Orten im Profil aufgegraben (Abb. 88 A). Die Bodenproben wurde mit Hilfe von Ausstechzylindern entnommen, zu diesem Zweck wurden in den Bodenprofilen horizontale Flächen zum Eintreiben der Zylinder aufgegraben (Abb. 88 B). Bei dieser Baumaßnahme wurden an 9 Orten Proben entnommen. Die genaue Lage der Entnahmeorte ist in Kapitel 5.4 wiedergegeben.

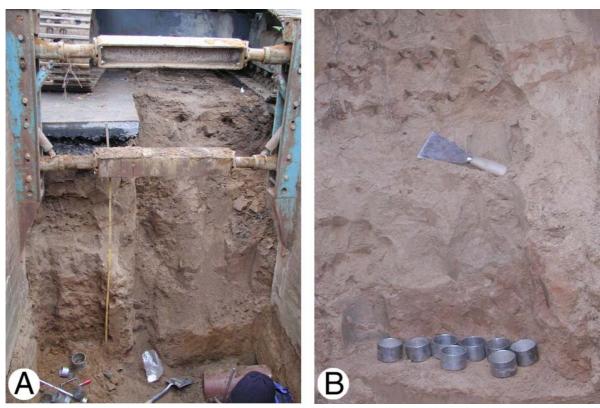


Abb. 88: Entnahme von Bodenproben **A** Vorbereitung des Bodens in der Nähe des MW-Straßenkanals. **B** Entnahme von Bodenproben mit Hilfe von Ausstechzylindern.

4.2.3.4 Analyse der Leitungsproben

Rohrverbindung 1:

Die Wurzeln sind im Bettungsmaterial der Leitung gewachsen und haben sich im Bereich der Rohrverbindung verzweigt (Abb. 89 A). Ein Teil der Wurzeln ist in den Ringspalt zwischen Spitz- und Glockenende der Vergussmuffe gewachsen. Die Wurzeln, die nicht in den Spalt eingewachsen sind, haben sich im Bettungsmaterial in Fließrichtung (nach links) weiter ausgebreitet.

Die Rohrverbindung wurde aufgetrennt. Der Scheitelbereich der Muffe wurde entfernt. Der Querschnitt der Leitung war bei dieser Rohrverbindung frei von Wurzeln (Abb. 89 B). Die Wurzeln haben in der Verbindung über den gesamten Umfang ein festes Polster gebildet. Die

Position des Wurzelpolsters auf dem Spitzende ist nach dem Auftrennen der Rohrverbindung erhalten geblieben.

Das Wurzelpolster hat den Raum, der in der Vergussmuffe zwischen Spitzende und Glockenende für das Vergussmaterial vorgesehen ist, eingenommen (Abb. 89 C). Das Polster füllt die zur Verfügung stehenden Räume komplett aus. Sowohl die Innenseite der Vergussmuffe, als auch die Außenseite des Spitzendes sind frei von Vergussmaterial oder seinen Rückständen. Die Wurzeln haben den Raum eingenommen, der durch das Fehlen von Vergussmasse verblieben ist.







Abb. 89: A Verholzte Wurzeln außen an einer Keramik-Vergussmuffe DN 300. Die Wurzeln haben sich verzweigt, sie sind sowohl in die Rohrverbindung eingewachsen als auch im Bettungsmaterial in Fließrichtung gewachsen. B Wurzelpolster in einer Vergussmuffe. Die Wurzeln haben den gesamten zur Verfügung stehenden Raum eingenommen.

C Längsschnitt des von Wurzeln ausgefüllten Ringspaltes einer Vergussmuffe. Es ist kein Vergussmaterial in der Rohrverbindung zu erkennen.

Rohrverbindung 2:

In den Spalt zwischen Spitzende und Glockenende sind bei dieser Rohrverbindung ebenfalls Wurzeln eingewachsen (Abb. 90 A). Zwischen den Wurzeln sind Reste des Bettungsmaterials der Leitung (Lehm) zu erkennen. Die Wurzeln sind über den gesamten Umfang der Leitung gleichmäßig verteilt.





Abb. 90: Verwurzelte Vergussmuffe eines Straßenkanals DN 300. A Im Bereich des Scheitels sind Wurzeln in den Ringspalt der Rohrverbindung eingewachsen. B Wurzeln haben sich in einem beschädigten Steinzeugrohr ausgebreitet. Sie bilden in der Rohrverbindung ein Polster. Die Wurzeln haben ein Abflusshindernis im Querschnitt der Leitung gebildet.

Die Rohrverbindung wurde geöffnet und das Glockenende entfernt (Abb. 90 B). Innerhalb der Vergussmuffe befindet sich ein Wurzelpolster, das alle Räume zwischen Spitz- und Glockenende eingenommen hat. Die Wurzeln haben sich Querschnitt der Leitung ausgebreitet und bilden ein Abflusshindernis in der Sohle. Die Wurzeln, die durch die Rohrverbindung in die Leitung eingewachsen sind, haben die Leitung letztendlich durch eine Beschädigung im Bereich der Sohle wieder verlassen. Die Wurzeln im Bereich der Sohle haben teilweise einen grauen Überzug von Resten des Leitungsinhaltes. Die Wurzeln, die im Bereich des Scheitels in den Querschnitt der Leitung einragen, sind frei von einem Überzug.

4.2.4 Essen

4.2.4.1 Anlass der Maßnahme

Der Hauptkanal wurde nach einer Betriebszeit von 31 Jahren in offener Bauweise saniert. Die Leitung mit DN 500 ist im Bereich der Fahrbahn verlegt.

4.2.4.2 Aufgrabung / Schadensbild

Die Leitung wurde aufgegraben und durch eine neue ersetzt.

Der MW-Straßenkanals verläuft unter der Fahrbahn (Abb. 91). In der näheren Umgebung der Straße befindet sich eine Kleingartenanlage. Die Gartengrundstücke werden über eine Anschlussleitung entwässert, welche sich außerhalb des betrachteten Bereiches befinden. Die Untersuchung des Wurzeleinwuchses wurde ausschließlich am Straßenkanal durch geführt.



Abb. 91: Der MW-Straßenkanal befindet sich unter der Fahrbahnoberfläche.

In der direkten Nähe der Leitung waren Wurzeln ausschließlich im Bereich des Zwickels zu erkennen. Die Wurzeln befinden sich im Bettungsmaterial neben der Sohle der Leitung (Abb. 92). Der Querschnitt der Leitung war aufgrund vorheriger Fräsarbeiten zum Zeitpunkt der Baumaßnahme frei von Wurzeln. Wurzeln waren, im Bereich der Rohrverbindungen, lediglich an den äußeren Rändern des Dichtmittels zu erkennen. Die Wurzeln bilden hier kein Abflusshindernis.



Abb. 92: Durchwurzeltes Bettungsmaterial des Mischwasser-Straßenkanals im Bereich des Rohrzwickels.

4.2.5 Quickborn

4.2.5.1 Anlass der Maßnahme

Im Rahmen der Video-Inspektion waren Wurzeleinwüchse im Hauptkanal festgestellt worden. In den Bestandsunterlagen war eine Beschädigung des Kanals (Scherbenbildung im Scheitelbereich) aufgeführt.

4.2.5.2 Aufgrabung/Schadensbild

Der Straßenkanal aus Keramik mit DN 200 verläuft unter der Fahrbahnoberfläche einer Wohnstraße (Abb. 93 A). In einer Entfernung von 3 m befinden sich Eichen (*Quercus robur*), Die Bäume haben einen Stammdurchmesser von 40 bis 60 cm. Die Leitung befindet sich im Kronenradius der Bäume.

Die Leitung wurde auf einer Länge von 5,0 Metern freigelegt (Abb. 93 B). An den Rohrverbindungen waren Wurzeln eingewachsen. Zwei nebeneinander liegende, verwurzelte Muffenverbindungen wurden aus der Leitung herausgetrennt und für eine Analyse der Wurzeln in den Rohrverbindungen verwendet.





Abb. 93: Lage des Straßenkanals bei der Baumaßnahme in Quickborn. **A** Auf den Privatgrundstücken neben der Straße befinden sich Eichen. Der Abstand der Bäume beträgt 2,5 m. (vgl. Abb. 94). **B** Freigelegte Schmutzwasserleitung. An den Rohrverbindungen waren von außen nur geringe Wurzelpolster zu erkennen.

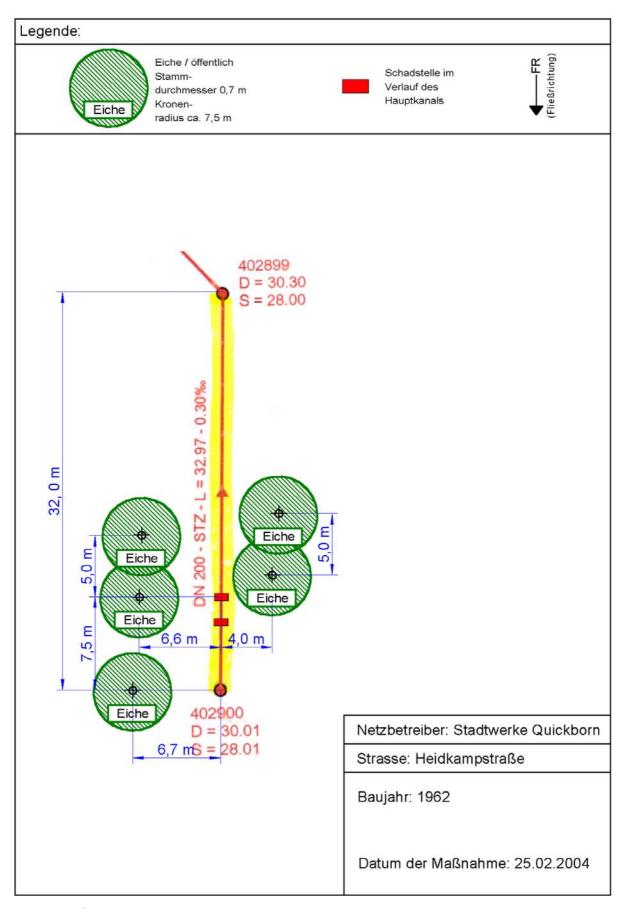


Abb. 94: Übersichtszeichnung der Baumaßnahme Quickborn.

4.2.5.3 Analyse der Leitungsproben

In Bereich der Rohrverbindung, die als Leitungsprobe entnommen wurde, befanden sich nur wenige Wurzeln im Querschnitt (Abb. 95 A). Im Scheitel und in den Kämpfern waren einige Wurzeln zu erkennen. Die Sohle der Leitung war von einer Schicht Rückständen des Leitungsinhalts bedeckt, jedoch frei von Wurzeln. Die Wurzeln rechts im Kämpferbereich waren ebenfalls von Schmutzstoffen überzogen.

Die Wurzeln haben sich in der Rohrverbindung zu einem Polster ausgebreitet (Abb. 95 B). Das Polster liegt der Vergussmasse in der Muffe an. Einige Wurzeln sind aus dem Polster in den Querschnitt der Leitung gewachsen. Die Sohle der Leitung ist mit einer Schicht Reststoffen des Abwassers bedeckt. In der Sohle befinden sich keine Wurzeln.

Im Bereich des linken Kämpfers der Leitung ist eine verholzte Wurzel unter das plastische Dichtmittel der Rohrverbindung gewachsen (Abb. 95 C). Die Wurzel hat hier nicht das Rohr quer umwachsen und ist nicht in einem spitzen Winkel unter das Dichtmittel gewachsen. Die Wurzel trifft in diesem Fall annähernd senkrecht auf das Dichtmittel und ist auf der äußeren Oberfläche des Rohres in das Dichtmittel gewachsen. Die Wurzel war fest mit dem Dichtmittel verbunden, sie konnten nicht durch Herausziehen entfernt werden.

Die eingewachsene Wurzel konnte in ihrem Verlauf durch das Dichtmittel freigelegt werden (Abb. 95 D). Die Vergussmasse der Rohrverbindung war scheinbar nicht vollständig ausgehärtet. Sie wurde mit nur geringem Kraftaufwand mittels eines Messers schichtenweise bis zur Wurzel abgetragen. Die Wurzel hat sich nach Durchqueren des Dichtmittels im ringförmigen Spalt (Ringspalt) zwischen den beiden Rohren verzweigt. Die Wurzel hat zwischen den Rohren ein Polster gebildet, welches den Querschnitt der Leitung nicht verringert.



Abb. 95: Analyse der Leitungsproben in Quickborn. A Leitungsquerschnitt der entnommenen Rohrverbindung. Wurzeln befinden sich nur im Bereich des Scheitels und der Kämpfer. Die Wurzeln bilden kein Abflusshindenis. B Aufgetrennte Rohrverbindung mit einem Wurzelpolster im Scheitel. Die Sohle der Leitung ist frei von Wurzeln. C Eine verholzte Wurzel ist unter die Vergussmasse einer Rohrverbindung gewachsen. Diese Wurzel hat die Leitung nicht quer umwachsen. D Die Wurzel ist geradewegs durch das Dichtmittel gewachsen und hat sich im Ringspalt verzweigt.

4.2.6 Rehburg-Loccum

4.2.6.1 Anlass der Maßnahme

In Rehburg-Loccum wurden bei einer TV-Inspektion drei räumlich voneinander getrennte Wurzeleinwüchse dokumentiert. Sie lagen im Straßenverlauf in zwei unterschiedlichen Haltungen. Die Rohrnennweite des gesamten untersuchten Schmutzwasserkanals betrug DN 200.

Die Oberfläche der Straße war im Bereich der drei Baumaßnahmen nicht vollständig versiegelt. Die Straßenoberfläche oberhalb der Leitungen bestand bei den in Rehburg-Loccum durchgeführten Baumaßnahmen aus Schotter.

Schadstelle 1:

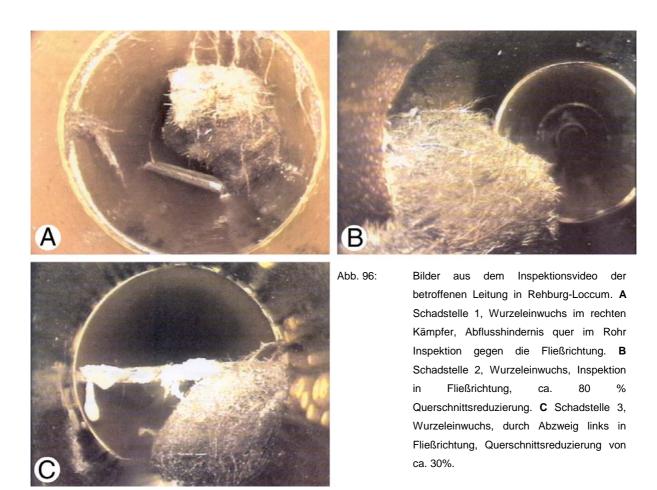
Bei der Inspektion von Schacht 393 nach Schacht 394 gegen die Fließrichtung wurde nach 20,65 m Wurzeleinwuchs an einer Rohrverbindung festgestellt. Hier wurde eine Querschnittsreduzierung von ca. 25 % dokumentiert (Abb. 96 A). In den vorherigen Rohrverbindungen wurde ebenfalls leichter Wurzeleinwuchs mit ca. 1% dokumentiert, so dass man von einer großflächigen Verwurzelung an der Rohraußenseite ausgehen konnte. Die Inspektion wurde an dieser Stelle abgebrochen.

Schadstelle 2:

Bei der Inspektion des Schachtes 394 nach Schacht 393 in Fließrichtung musste nach 13,90 m die Inspektion abgebrochen werden. Im Gesamtumfang des Rohres wurde eine Querschnittsreduzierung von ca. 80 % dokumentiert. An dieser Stelle wurde die Inspektion in Fließrichtung abgebrochen. Eine Inspektion in Gegenrichtung war wegen des oben beschriebenen Wurzeleinwuchses nicht möglich. Ca. 15 m der Haltung konnten nicht inspiziert werden.

Schadstelle 3:

Bei der Inspektion von Schacht 395 nach Schacht 394 in Fließrichtung wurde nach 31,50 m die Inspektion wegen Wurzeleinwuchs abgebrochen. Hier wurde eine Querschnittsreduzierung von ca. 30 % dokumentiert. Über die Funktion des Abzweigs lagen keine genauen Erkenntnisse vor. Durch die Baumaßnahme sollte neben der Beseitigung des Wurzeleinwuchs auch noch geklärt werden, ob der Abzweig in Betrieb ist.



Vorrangiges Ziel der Baumaßnahmen war die Beseitigung von Schäden durch Wurzeleinwuchs. Die betroffenen Stellen der Leitung wurden punktuell aufgegraben. Ein Straßenaufbruch war nicht nötig, da die Haltung neben der asphaltierten Straße unter einer unbefestigten Oberfläche verlief.

Eine Übersicht über die örtlichen Begebenheiten, d.h. Leitungsverlauf, Baumbewuchs und Ort der drei Baumaßnahmen zeigt Abb. 97.

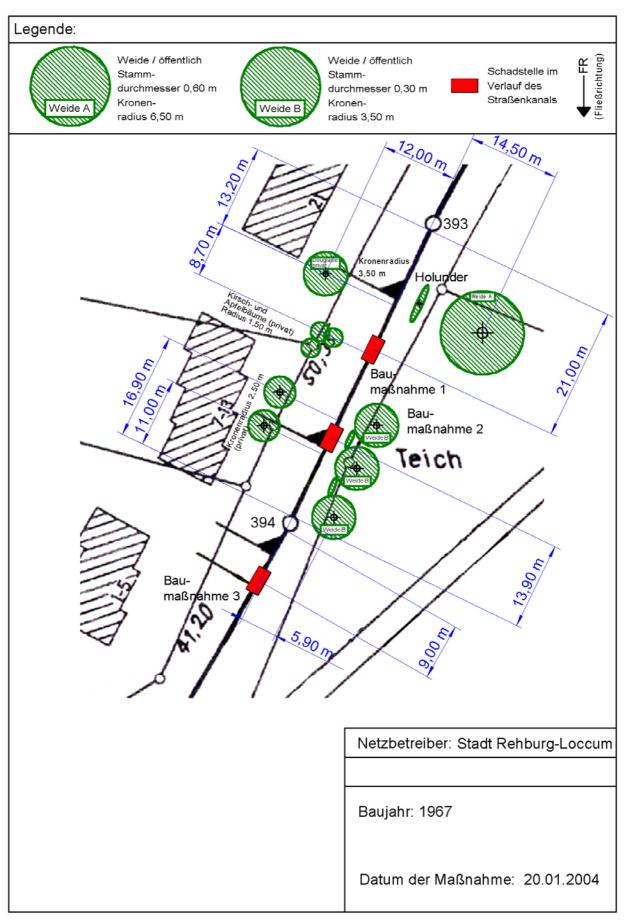


Abb. 97: Übersichtszeichnung der Baumaßnahmen Rehburg-Loccum.

Die Steinzeugleitung DN 200 liegt parallel zur Fahrbahnoberfläche einer Wohnstraße (Abb. 98). In einer Entfernung von 5,90 m befanden sich Weiden (Salix spec). Die Bäume wuchsen direkt an einem Teich. Die Bäume waren ca. 40 und Jahre alt mehrfach waren heruntergeschnitten worden. Auf den privaten Grundstücken in der Nähe der Wurzelschäden waren nur wenige Gehölze angepflanzt. Die privaten Bäume und Sträucher hatten eine Entfernung zur Leitung von mehr als 10 m.



Abb. 98: Lage des Straßenkanales bei den Baumaßnahmen in Rehburg-Loccum. Auf der linken Seite sind Weiden zu erkennen, welche die Uferbegrünung eines Sees bilden.

Die Häuser im Bereich der Schäden waren 17 Jahre alt. Die privaten Bäume vor den Häusern

wurden nach dem Bau der Häuser gepflanzt. In 12 m Entfernung zum Straßenkanal wuchs eine Birke (*Betula pendula*) (Abb. 99). Einen Teil der Fläche zwischen dem Standort des Baumes und der verwurzelten Leitung nimmt die Wasserfläche eines Teiches ein. Der Baum hatte in 1 m Höhe einen Durchmesser von 50 cm und befindet sich nach Auskunft von Anwohnern seit mehr als 30 Jahren an dieser Stelle.

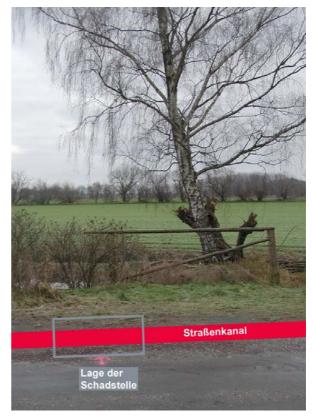


Abb. 99: Standort einer Birke in einer Entfernung von 12 m zum Straßenkanal in Rehburg-Loccum.

4.2.6.2 Aufgrabung/Schadensbild

Alle drei Baumaßnahmen wurden auf ähnliche Weise durchgeführt. Zunächst wurde das anstehende Bodenmaterial mittels eines Baggers bis zu den ersten mit Wurzeln durchsetzten Bodenschichten aufgegraben. Je nach Verlauf des Wurzelwachstums wurde eingeschätzt, ob diese Wurzeln bereits potenzielle Schadensverursacher sein könnten und gegebenenfalls photographisch dokumentiert. Bei den drei durchgeführten Baumaßnahmen war ein Wurzeleinwuchs nur in Scheitelnähe zum Hauptkanal zu erkennen. Das Bodenmaterial wurde bis zum Scheitel mittels schweren Gerätes entfernt. Danach erfolgte eine behutsame Freilegung des geschädigten Kanalabschnitts mittels Handarbeit durch Mitarbeiter des IKT. Hier wurde ein besonderes Augenmerk auf den Verlauf der Wurzeln zum Kanal hin und auch parallel zur Leitung gelegt. Es sollten nach Möglichkeit keine Wurzeln beschädigt oder entfernt werden, um die Wachstumsrichtung der Wurzeln dokumentieren zu können. Die geschädigten Rohrverbindungen wurden herausgetrennt und für weitere Untersuchungen ins IKT überführt. Die fehlenden Rohrstücke wurden durch neue Rohre ersetzt und mit Überschiebverbindungen wieder an den vorhandenen Kanal angeschlossen.

4.2.6.2.1 Aufgrabung Baumaßnahme 1

Die Oberfläche im Bereich der Aufgrabung war nicht versiegelt. In den oberen Bodenschichten waren keine Wurzeln zu erkennen (Abb. 100). Bis in eine Tiefe von 0,8 m war der Boden frei von Wurzeln. Erst im Bereich des Kanalscheitels, bei einer Tiefe von 1,70 m, waren Wurzeln im Boden zu erkennen.

Im Bettungsmaterial der Leitung sind eine große Anzahl von Wurzeln parallel zur Leitung gewachsen (Abb. 101). Verholzte Wurzeln fanden sich sowohl im Scheitelbereich der Leitung als auch an beiden Kämpfern. Im Sohlenbereich der Leitung waren einige Wurzeln mit einem Durchmesser von 1 cm parallel zur Leitung gewachsen. Das Bettungsmaterial der Leitung war in der Nähe dieser Rohrverbindung über ihren gesamten Umfang hinweg durchwurzelt.

Eine der im Bereich des rechten Kämpfers gewachsenen Wurzeln ist direkt auf der äußeren Oberfläche des Spitzendes Keramikrohres gewachsen (Abb. 102). Die Wurzel hat einen Durchmesser von etwa 6 Steckmuffe und ist die mm in der Rohrverbindung eingewachsen. Die Rohrverbindung wurde aus der Leitung herausgetrennt und geöffnet.



Abb. 100: Beginn der Ausschachtungsarbeiten.



Abb. 101: Besonders im Bereich der Sohle sind einige Wurzeln parallel zur Leitung gewachsen.

Das Wurzelwachstum konnte hier offenbar dem Leitungsverlauf folgen.



Abb. 102: Eine verholzte Wurzel ist in die Muffe der Steckverbindung eingewachsen.

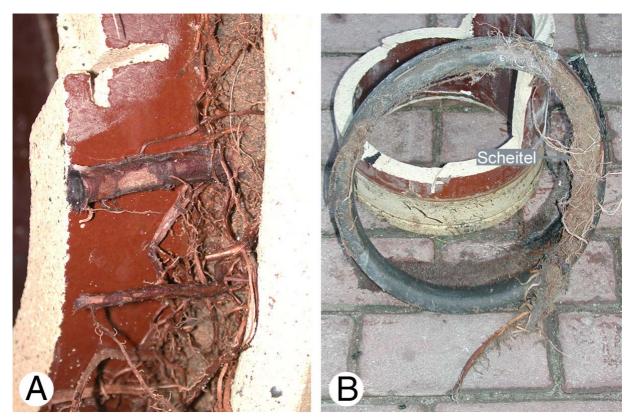


Abb. 103: Analyse von Wurzelschäden bei einer Rohrverbindung aus Rehburg-Loccum. A Zwischen Spitz- und Glockenende der Steckverbindung sind einige verholzte Wurzeln eingewachsen. B Der Elastomerring in der Rohrverbindung ist im Bereich des Scheitels und der Kämpfer von einem Wurzelpolster bedeckt. Im Bereich der Sohle sind keine Wurzeln zu erkennen.

Im Kämpferbereich der Leitung befinden sich auf der äußeren Oberfläche des Spitzendes mehrere Wurzeln (Abb. 103 A). Sie sind hier am Spalt zwischen Spitzende und Muffe in die Steckverbindung eingewachsen. Die Wurzeln bilden ein lockeres Polster im Spalt der Rohrverbindung. Das Polster reicht außen auf dem Dichtelement vom Bereich des rechten Kämpfers bis annähernd zum Scheitel des Rohres. Die Rohrverbindung wurde zur weiteren Analyse geöffnet.

In der Rohrverbindung war als Dichtelement ein Elastomerring eingelegt. Die Wurzeln haben diesen Ring mit einem Polster umwachsen (Abb. 103 B). Wie schon von außen zu erkennen war (Abb. 103 A), sind die Wurzeln im Bereich des rechten Kämpfers (in Abb. 103 A, rechts) in die Rohrverbindung eingewachsen. Sie haben hier ein Polster gebildet, dass die Rohrverbindung im Bereich des Scheitels ausfüllt.

4.2.6.2.2 Baumaßnahme 2

Bei den Aufgrabungen wurde die asphaltierte Straßenoberfläche nicht beschädigt, die Leitung ist neben der Fahrbahn verlegt (Abb. 104). Der Kanal liegt ausschließlich unter der unbefestigten Oberfläche neben der Fahrbahnoberfläche. Die Tiefenlage des Kanalscheitels betrug an dieser Stelle 1,60 m.



Abb. 104: Oberflächenbeschaffenheit im Leitungsverlauf.

Bei Aufgraben des Straßenkanals wurde deutlich, dass sich in der Nähe des Ortes, an dem die Inspektion abgebrochen werden musste, ein Abzweig im Kanal eingebaut war. Der seitliche Zufluss des Abzweiges war mit vermauerten Ziegelsteinen verschlossen und am Ende des Winkelstücks mit Mörtel abgedichtet worden (Abb. 105). Der Abzweig wies in Richtung des Teiches bzw. der als Teichbegrenzung dienenden Weiden (Abb. 98). Es war jedoch keine Leitung angeschlossen. Es war zu erkennen, dass die



Abb. 105: Im verwurzelten Teil des Straßenkanals, in dem die Inspektion abgebrochen werden musste (Abb. 96 B), befand sich ein Abzweig. Der seitliche Zulauf war durch vermauerte Ziegel verschlossen.

Fugen der an den Abzweig gemauerten Ziegel von Wurzeln durchwachsen waren.

Der seitliche Abzweig des Straßenkanals war durch vermauerte Ziegel verschlossen. Die Wurzeln haben hier ein Wurzelpolster gebildet, dass den Gesamtquerschnitt der seitlichen Einmündung ausfüllt (Abb. 106). Die Wurzeln haben den in der Leitung vorhandenen Raum des seitlichen Zulaufes vollständig ausgefüllt. Es war nicht zu erkennen, dass die Wurzeln in irgendeiner Form ungleichmäßig verteilt waren.



Abb. 106: Wurzeln haben einen nicht in Betrieb befindlichen Zulauf im Abzweig eines Schmutz-wasserkanals verstopft. Die Wurzeln haben gleichmäßig den gesamten Querschnitt ausgefüllt.

Die durch den seitlichen Zulauf eingewachsenen Wurzeln bilden im Hauptkanal ein Polster, das einen großen Teil des Querschnittes der Hauptleitung verstopft (Abb. 107). Die Sohle der Leitung war nicht mit einem Wurzelpolster bedeckt. diesem Abzweig wurde die Inspektion der Leitung, die vor der Maßnahme durchgeführt wurde, abgebrochen (Abb. 96 B). Das Wurzelpolster hatte die Weiterfahrt der Untersuchungskamera verhindert.



Abb. 107: Die Wurzeln sind durch den seitlichen Zulauf des Hauptkanals eingewachsen. Durch starke Verzweigung der Wurzeln hat sich ein Polster gebildet, das den Querschnitt der Hauptleitung nahezu völlig einnimmt.

Die Wurzeln, die in den Abzweig wurden eingewachsen sind, durch die Strömung des Medium bei Betrieb Leitung in Fließrichtung gespült (Abb. 108, Fließrichtung im Bild von links nach rechts). Durch die dauerhafte Strömung hat sich das Polster in der Leitung nur in Fließrichtung der Leitung ausgebreitet. Das Wurzelpolster bildet hier einen festen Körper Leitungsquerschnitt.



Abb. 108: Die Wurzeln im Polster weisen durch die Strömung des Mediums bei Betrieb der Leitung in die Fließrichtung (von links nach rechts).

Die Wurzeln sind vom seitlichen Zulauf aus in der Leitung in Fließrichtung bis zur nächsten Rohrverbindung des Straßenkanals gewachsen (Abb. 109). Sie haben den Kanal dabei mit einem festen Polster ausgefüllt. An der nächsten Rohrverbindung des Hauptkanals sind die Wurzeln aus dem Querschnitt der Leitung herausgewachsen. Sie sind hier zuerst in die Rohrverbindung und dann aus der Leitung heraus in das Bettungsmaterial der Leitung gewachsen.



Abb. 109: Die eingewachsenen Wurzeln sind an einer Rohrverbindung in Fließrichtung aus der Leitung heraus, in den umgebenden Boden gewachsen.

Die in Fließrichtung unterhalb des Abzweiges gelegene Rohrverbindung wurde aufgetrennt (Abb. 110). Die Wurzeln haben die Räume der Rohrverbindung teilweise mit einem Polster ausgefüllt. Der eingelegte Elastomerring war im Bereich des Scheitels von Wurzeln überzogen. In der Sohle der Schmutzwasserleitung waren keine Wurzeln auf dem Dichtring zu erkennen.



Abb. 110: Dichtelement der Rohrverbindung eines Mischwasserkanals. Der Elastomerring ist nur im Bereich des Scheitels mit einem Wurzelpolster bedeckt.

4.2.6.2.3 Baumaßnahme 3

Die Schadstelle befand sich in einer Entfernung von 5,90 m zu einer der Weiden am Ufer des Teiches (Abb. 111). Hier verlief der Hauptkanal unter einer mit Rasen bewachsenen Oberfläche.



Abb. 111: Ansicht der Umgebung Baumaßnahme 3.

Abb. 112 zeigt den freigelegten Abzweig, aus dem Wurzeln in den Hauptkanal einwuchsen. Hier ist zu erkennen. dass die Abzweigkonstruktion nicht fachmännisch, sondern improvisiert vorgenommen wurde, um die ankommende Graugussleitung DN 80 an den Kanal anzuschließen. Der Ringspalt zwischen der Graugussleitung und dem Winkelstück wurde mit Mörtel verfüllt. Ähnlich wie bei der zweiten Baumaßnahme hatten die Wurzeln hier die Möglichkeit durch den Abzweig in den Hauptkanal einzudringen.

Im Detail zeigt Abb. 113 wie die Wurzeln am Ende des Winkelstücks durch die mittlerweile eingebrochene Mörtelverfüllung in den Abzweig einwuchsen. Hier fanden sie ideale Wachstumsmöglichkeiten vor, da sie den gesamten Querschnitt des nicht mehr in Betrieb befindlichen Abzweigs ausnutzen konnten. Bei dieser Baumaßnahme wurden keine Leitungsproben entnommen.



Abb. 112: Keramikabzweig einer Schmutzwasserleitung, an welche eine Hausanschlussleitung aus Grauguss mit Hilfe von Mörtel angebunden ist.



Abb. 113: Einwachsende Wurzeln in den lediglich mit Mörtel verschmierten Ringspalt.

4.2.7 Münster

4.2.7.1 Anlass der Maßnahme

Durch den Einwuchs von Baumwurzeln war die Funktion der Leitung nicht mehr gewährleistet, so dass eine Sanierung des Straßenkanals in offener Bauweise notwendig wurde.

Die Leitung verläuft im Bereich der betrachteten Schadensfälle in direkter Nähe zu den gepflanzten Straßenbäumen (Abb. 114, Abb. 115 A). Für die Baumaßnahme wurde die Straße im Bereich des Gehweges aufgegraben. Im Bereich der Fahrbahn wurden keine Arbeiten durchgeführt. Es wurden insgesamt 4 durchwurzelte Rohrverbindungen herausgetrennt.

4.2.7.2 Aufgrabung/Schadensbild

Für die Aufgrabung der Leitung in einer Tiefe von 2,6 m wurden Verbauelemente eingesetzt (Abb. 115 B). Zu Beginn der Aufgrabung war bereits zu erkennen, dass der Boden in der Nähe der Leitung stark durchwurzelt war. Unter dem Gehweg waren verholzte Wurzeln mit einem Durchmesser von bis zu 0,1 m zu erkennen. Die Wurzeln haben sich hier im Bettungsmaterial der Plattierung ausgebreitet.

Die Leitung wurde manuell aufgegraben. Hier waren mehrere verholzte Wurzeln mit einem Durchmesser von bis zu 0,2 m zu erkennen (Abb. 115 C). Die Wurzeln waren offensichtlich über mehrere Jahre hinweg parallel zur Leitung in deren Bettungsmaterial gewachsen. An den Rohrverbindungen haben sich die Wurzeln verzweigt und sind hier in die Leitung eingewachsen.

Bei der weiteren Aufgrabung war zu erkennen, dass Wurzeln ebenfalls in der Nähe von Versorgungsleitungen gewachsen sind (Abb. 115 D). Wie schon am Abwasserhauptkanal beobachtet werden konnte, sind die Wurzel hier parallel zum Leitungsverlauf im Boden gewachsen. Die Wurzeln haben hier ein Polster außen um die Leitung gebildet, in welchem die einzelnen Wurzeln längs zur Leitung orientiert sind.

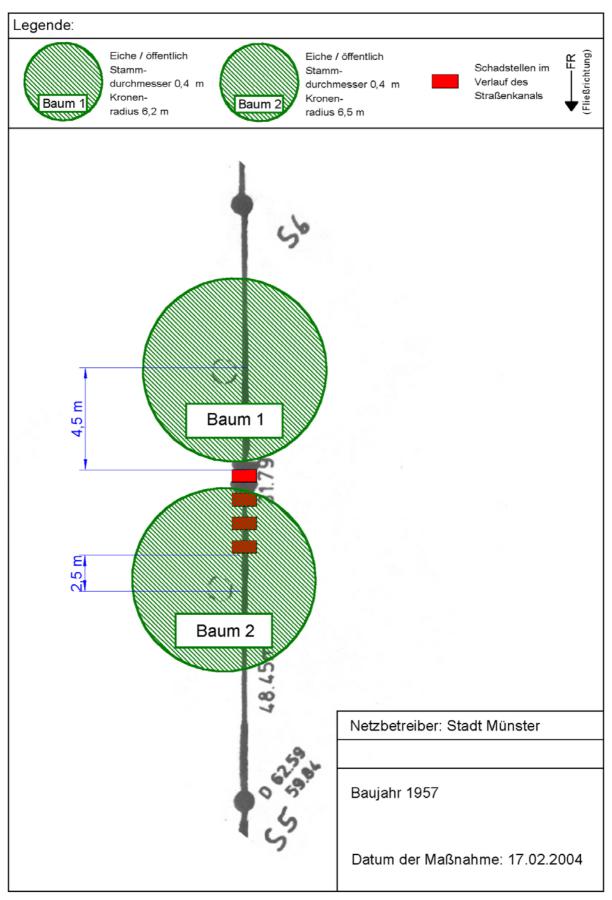


Abb. 114: Übersichtszeichnung der Baumaßnahme Münster.

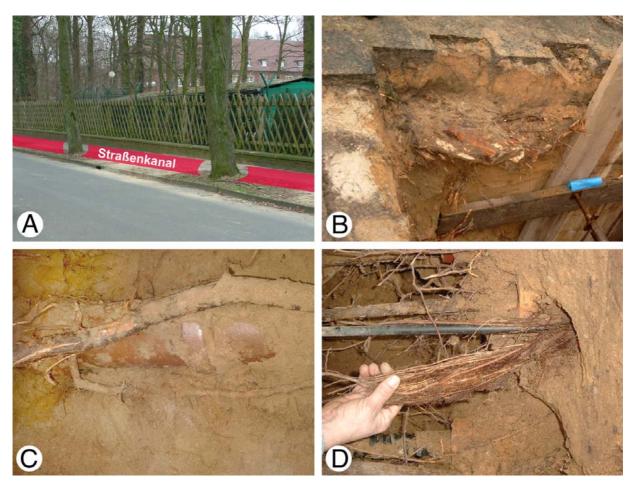


Abb. 115: Baumaßnahme in Münster. A Lage des Straßenkanals bei der Baumaßnahme in Münster. Der Kanal befindet sich in direkter Nähe zu einer Baumreihe (Eichen). B Das Bettungsmaterial der Plattierung des Gehweges ist nahe der Oberfläche stark durchwurzelt. C Verholzte Wurzeln sind parallel zur Leitung gewachsen. Die Wurzeln haben hier einen Durchmesser von bis zu 0,2 m. D Wurzeln haben sich ebenfalls in der Nähe von Versorgungsleitungen stark ausgebreitet.

4.2.7.3 Entnahme von Bodenproben

Bei dieser Baumaßnahme wurden Bodenproben entnommen, um die Struktur von anthropogenem Material (z.B. der Bettung) und anstehendem Boden zu bewerten. Die Proben wurden an 6 verschiedenen Orten in der Umgebung der Leitung entnommen. Für die Probenahme wurden repräsentative Orte ausgewählt (Abb. 116 A). Der Boden wurden mit Hilfe von Ausstechzylindern entnommen, die Ausstechzylinder wurden für den Transport der Proben verschlossen und als ungestörte Bodenprobe untersucht (Abb. 116 B). Die Ergebnisse der geologischen Analyse sind in Kapitel 5.4 zusammengstellt.



Abb. 116: Entnahme von Bodenproben. **A** Auswahl der Probenentnahmeorte **B** Gewinnung und Transport ungestörter Bodenproben mit Hilfe von Ausstechzylindern.

4.2.7.4 Analyse der Leitungsproben

Die während der Baumaßnahme entnommen Rohrverbindungen wurden bei der Herstellung durch Vergießen mit einem plastischen Dichtmittel abgedichtet. Bei den vier entnommenen Rohrverbindungen waren von außen Wurzeln in den Spalt zwischen Spitz- und Glockenende gewachsen. An der Rohrverbindung befanden sich Wurzeln mit einem Durchmesser von bis zu 0,5 cm. Diese waren fest mit dem Vergussmaterial verbunden.



Abb. 117: Leitungsproben der Baumaßnahme Münster A Rohrverbindung 1, B Rohrverbindung 2, C Rohrverbindung 3, D Rohrverbindung 4. Alle Rohrverbindungeun wurden bei Bau der Leitung einem plastischen Dichtmittel vergossen. Bei allen Rohrverbindungen waren Wurzeln in den Spalt zwischen Spitz- und Glockenende gewachsen. Im Querschnitt der Leitung befinden sich im Bereich der entnommenen Leitungsproben wenige oder keine Wurzeln.

4.2.7.5 Rohrverbindung 1

Die Rohrverbindung (Abb. 117 A) wurde aufgetrennt. Im Bereich des Scheitels befindet sich ein Wurzelpolster (Abb. 118). Die Wurzeln haben einen großen Teil des Raumes in der Rohrverbindung ausgefüllt, sie haben dabei die Leitung hauptsächlich quer umwachsen. In dem Polster befinden sich Wurzeln mit einem Durchmesser von bis zu 0,5 cm. Das Polster ist in seiner Struktur fest und hart.



Abb. 118: Im Bereich des Scheitels befindet sich in der Rohrverbindung ein festes Wurzelpolster. Die Wurzeln sind hauptsächlich quer zur Leitung gewachsen.

Außer dem Wurzelpolster befand sich in der Rohrverbindung Sanierungsmaterial, das im Zuge einer Sanierung der Leitung eingebaut worden war (Abb. 119). Es war deutlich zu dass in erkennen, Räume der Rohrverbindung, die frei von Vergussmaterial und Wurzeln waren, von Kunststoffmaterial ausgefüllt waren. Das Material ist teilweise elastisch und weist keine sichtbaren Poren auf, außerhalb der Rohrverbindung war kein Sanierungsmaterial zu erkennen.



Abb. 119: Geöffnete Rohrverbindung des Straßenkanals. Auf dem Spitzende des Rohres befindet sich Sanierungsmaterial.

Die Bestandsunterlagen enthielten keine Angaben zur Sanierung.

4.2.7.6 Rohrverbindung 2

Beim Öffnen einer weiteren Rohrverbindung (Abb. 117 B) wurde deutlich, dass auch hier eine Sanierung in geschlossener Bauweise durchgeführt worden war (Abb. 120). In der Rohrverbindung waren die Räume neben den Wurzeln, die ein festes Polster gebildet haben, teilweise von Sanierungsmaterial ausgefüllt. Es ist jedoch zu erkennen, dass Teile Sanierungsmaterials des verloren gegangen waren. In Bereichen nahe der Sohle und im linken Kämpfer hatte sich das Sanierungsmaterial in der Rohrverbindung offenbar aufgelöst. Im Sanierungsmaterial tra-



Abb. 120: Das Sanierungsmaterial in der zweiten Rohrverbindung ist im Bereich des linken Kämpfers verlorengegangen. Es sind nicht mehr alle Räume in der Rohrverbindung mit Sanierungsmaterial ausgefüllt.

ten Aussparungen auf. Hier hatte sich der Kunststoff möglicherweise durch den Kontakt zum Leitungsmedium zersetzt.

Im Bereich des Scheitels befindet sich in den Räumen der Rohrverbindung eine Füllung, die aus drei verschiedenen Materialen besteht (Abb. 121). Bei Bau der Leitung war die Rohrverbindung mit Vergussmasse abgedichtet worden. In die Rohrverbindung sind später Wurzeln eingewachsen. Die Wurzeln haben ausreichend Zwischenräume in der vergossenen Muffe gefunden. Die Rohrverbindung wurde nach Einwuchs der Wurzeln in die Rohrverbindung mit einem Kunststoffmaterial (vermutlich Polyurethan) in geschlossener Bauweise saniert.



Abb. 121: Die Rohrverbindung wurde bei Bau der Leitung mit Vergussmasse hergestellt. Wurzeln sind eingewachsen und haben in der Rohrverbindung Raum gefunden. Durch Einsatz von Sanierungsmaterial wurden einige Räume in der Rohrverbindung ausgefüllt.

4.2.7.7 Rohrverbindung 3

Bei dieser Rohrverbindung (Abb. 117 C) war zu erkennen, dass sich in der Vergussmasse ein Hanfstrick befindet (Abb. 122). In dieser Rohrverbindung waren im Bereich der Vergussmuffe keine Wurzeln zu erkennen. Hier waren jedoch einige Insektenlarven zu erkennen. Die Leitung ist dieser Rohrverbindung augenscheinlich nicht mit einem Sanierungsmaterial repariert worden. Die Räume Spalten und in der Rohrverbindung waren frei von Wurzeln und Sanierungsmaterial.

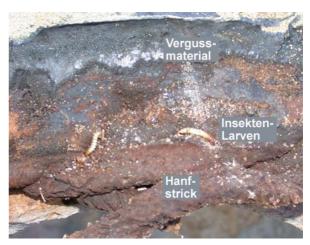


Abb. 122: Die dritte Rohrverbindung ist im Bereich des Scheitels frei von Wurzeln. Hier waren jedoch einige Insektenlarven zu erkennen.

Bei Auftrennen der dritten Rohrverbindung war zu erkennen, dass das eingesetzte Spitzende bei Bau der Leitung nicht mit entsprechenden Werkzeug abgetrennt worden war (Abb. 123). Das Keramikrohr war hier möglicherweise durch Abschlagen abgelängt worden. Das Spitzende ist nahe der Sohle der Leitung längs gerissen. Im Bereich der Sohle befinden sich an dieser Rohrverbindung keine Wurzeln in der waren Leitung. Wurzeln oberhalb mittleren Wasserstandes im Muffenspalt zu erkennen.

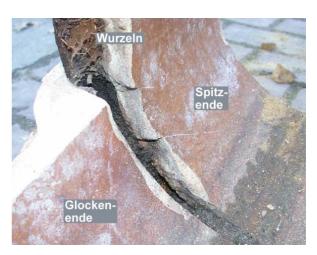


Abb. 123: Detailansicht des Muffenspaltes einer Rohrverbindung (Vergussmuffe). Bei Bau der Leitung wurde das Spitzende evtl. durch Abschlagen abgelängt. Im Spitzende befindet sich ein Riss.

4.2.7.8 Rohrverbindung 4

Die Wurzeln haben das Rohr zuerst außen in Querrichtung umwachsen. Eine abzweigende Seitenwurzel befand sich in der Vergussmasse der Rohrverbindung (Abb. 124). Diese Wurzel war in Längsrichtung zur Leitung schräg durch die Vergussmasse in die Rohrverbindung eingewachsen. Die Wurzeln haben sich im Ringspalt der Rohrverbindung verzweigt und den Spalt in Umfangsrichtung verschlossen.



Abb. 124: Wurzeln sind außerhalb der Rohrverbindung um die Leitung gewachsen. Eine verholzte Wurzel ist durch die Vergussmasse in die Rohrverbindung gewachsen.

Innerhalb der Rohrverbindung waren alle Räume von Wurzeln eingenommen (Abb. 125). Die Wurzeln haben in der Rohrverbindung ein Geflecht gebildet. Einige der Wurzeln haben einen Durchmesser von ca. 0,5 cm, diese sind zunächst neben der Vergussmasser quer um das Rohr und dann von außen durch die Vergussmasse in die Rohrverbindung eingewachsen. Bei Auftrennen der Rohrverbindung war zu erkennen, dass sich im Scheitel der Leitung neben Wurzeln auch lebendige Kellerasseln befanden.



Abb. 125: Wurzeln haben die Zwischenräume in der Rohrverbindung ausgefüllt (im Scheitel der Leitung). Außer Wurzeln befinden sich hier lebendige Kellerasseln.

4.3 Anschlussleitungen für Regenwassereinläufe

4.3.1 Duisburg, Ortslage II

4.3.1.1 Anlass der Maßnahme

Die Baumaßnahme wurde mit dem Ziel durchgeführt, ein Abflusshindernis durch Wurzeleinwuchs in der Anschlussleitung eines Regenwassereinlaufes zu beseitigen. Die Regenwasserleitungen wurden im Jahr 1952 erbaut, der Einlauf wurde 1985 durch Einbau einer PVC-U-Leitung und eines Übergangsstückes von PVC-U auf die Keramikleitung saniert.

Ein weiteres Abflusshindernis trat im Abzweig des Regenwasser-Straßenkanals in der Straßenmitte auf. Der Abzweig bildet die Anbindung des Straßeneinlaufes an den Straßenkanal.

Aufnahmen vom Zustand der Leitung vor der Sanierung wurden vom Netzbetreiber nicht zur Verfügung gestellt.

Die betroffene Straße in Duisburg ist mit Hybrid-Platanen (*Platanus hybrida Brot.*) als Straßenbegleitgrün bepflanzt (Abb. 127 A). Nach Angaben des Grünflächenbetreibers wurden die Bäume in der Zeit zwischen 1955 und 1960 in Baumscheiben am Straßenrand angepflanzt. Der Abstand der Bäume beträgt im Mittel 12 m. Die Anschlussleitung eines Regenwassereinlaufes befindet sich in unmittelbarer Nähe zu einer der Platanen (Abb. 127 B). Die Oberfläche ist im Bereich des Schadensfalles annähernd komplett versiegelt. Die Baumscheibe, die als 0,8 m breiter Streifen parallel zur Fahrbahn verläuft, wird als Parkraum genutzt.

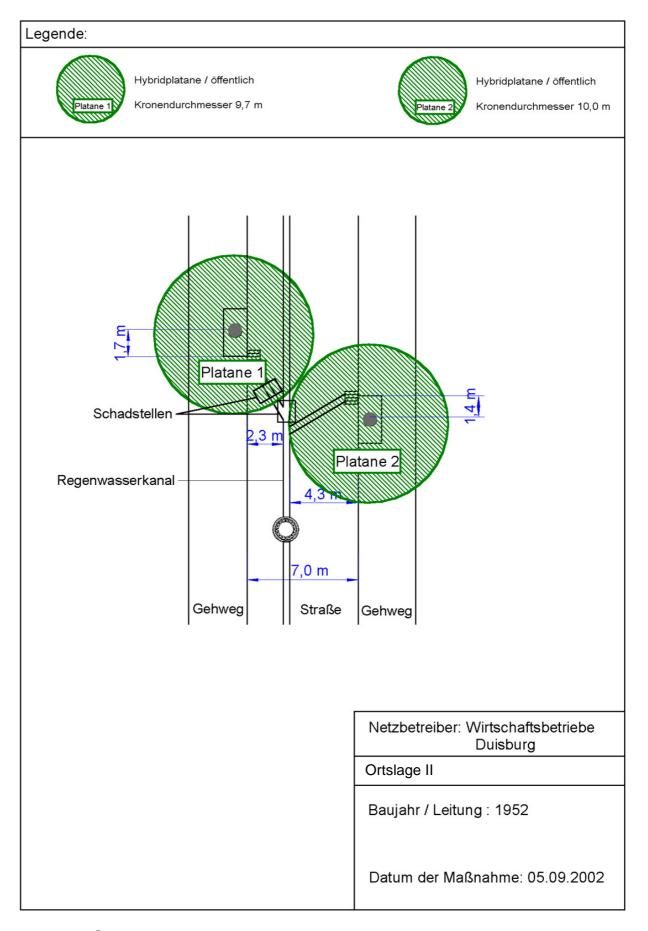


Abb. 126: Übersichtszeichnung der Baumaßnahme Duisburg, Ortslage II.

4.3.1.2 Aufgrabung / Schadensbild

Die den Schaden verursachende Platane (*Platanus hybrida*) ist in einer Baumscheiben im Gehweg gepflanzt. Die Anschlussleitung des Regenwassereinlaufes ist an den Straßenkanal in der Straßenmitte angebunden (Abb. 126). Die gesamte Oberfläche der Umgebung ist versiegelt. Die Baumscheibe von etwa 0,8 m Breite ist unversiegelt und erlaubt ein Eindringen von Wasser in den Boden (Abb. 127 A). Die Umrandung der Baumscheibe, wie auch die Asphaltdecke des Gehweges weisen Anhebungen auf, die auf Wachstum von Wurzeln zurückzuführen sind. Es ist zu erkennen, dass die Asphaltdecke im Bereich des Straßeneinlaufes erneuert wurde, nach Angaben des Netzbetreibers wurde der Einlauf 1985 in offener Bauweise ersetzt (Abb. 127 B). Die ursprüngliche Anschlussleitung aus Keramik wurde mittels einer Mörtelmasse vor Ort an die PVC-U-Leitung des neuen Einlaufes angebunden. Bereits an der Straßenoberfläche sind Wurzeln zu erkennen (Abb. 127 C). Im Bereich des Straßeneinlaufes finden sich in den Fugen zum Bordstein von etwa 1,0 cm Breite verholzte Wurzeln. Der Abstand zum Baum beträgt hier etwa 1,0 m.

Für die Anbindung der neu eingebauten Anschlussleitung des Regenwassereinlaufes an die bestehende Leitung aus Keramik war der Einbau eines Überganges für die beiden Rohrmaterialien nötig. Bei der Aufgrabung wurde deutlich, dass kein Fertigbauteil verwendet wurde (Abb. 127 E). Im linken Teil des Bildes ist die Steckverbindung mit Lippendichtung zur PVC-Leitung DN 150 zu erkennen. Die Steckmuffe ist durch Zementmörtel mit dem Keramikrohr verbunden. Im rechten Teil des Bildes ist die Keramikleitung zu erkennen, die sich zur Einmündung in den Regenwasserkanal in der Mitte der Straße fortsetzt. Die in den Übergang aus Zementmörtel eingedrungenen Wurzeln sind am unteren Bildrand zu erkennen. Bei Aufgrabung des Einlaufes und der Leitung wurde deutlich, dass sich der Übergang von der PVC-Leitung auf die Keramikleitung in einer Entfernung von 0,8 m vom Einlauf befand. Der Bereich zwischen den Versorgungsleitungen und dem Übergang in der Anschlussleitung des Einlaufes wurde in Handschachtung aufgegraben. Die Rohrverbindung wurde für die Analyse entnommen (Abb. 127 E).

Bei weiterer Aufgrabung der Leitung wurde deutlich, dass entlang der Leitung eine Wurzel mit einem Außendurchmesser von etwa 3 cm gewachsen war (Abb. 127 D). Die Wurzel war an der Rohrverbindung, welche die Anschlussleitung des Straßeneinlaufes an den Regenwasserhauptkanal in der Straßenmitte anbindet, eingewachsen. Die Wurzel verläuft parallel zur Leitung. Außerhalb der Leitung waren keine Verzweigungen der Wurzel zu

E

erkennen. Die Wurzel verzweigt sich auch an der durchwurzelten Rohrverbindung nicht, sie dringt komplett in die Verbindung des Abzweiges ein.

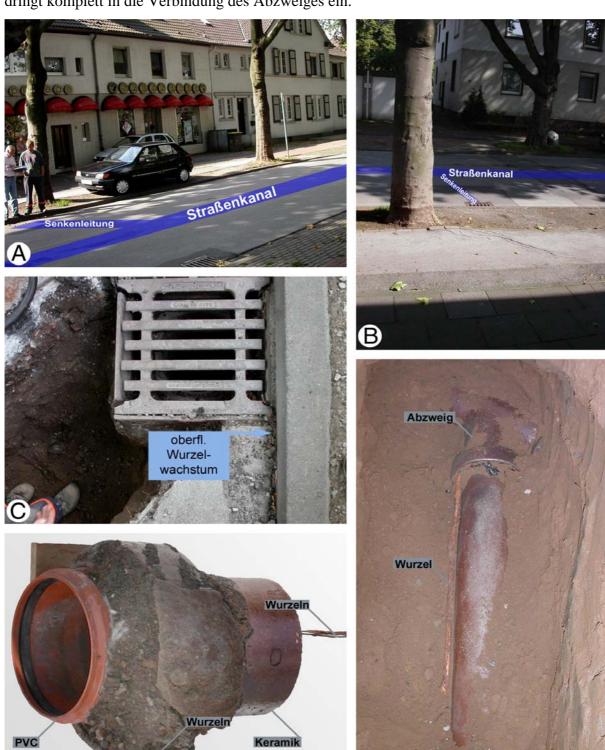


Abb. 127: Baumaßnahme Duisburg, Ortslage II. A Straßenoberfläche im Bereich des Schadenfalles. B Die Platane befindet sich in unmittelbarer Nähe zum Regenwassereinlauf und der Anschlussleitung. C Wurzelwachstum in Fugen an der Straßenoberfläche. D Wachstum einer verholzten Wurzel parallel zur Anschlussleitung eines Straßeneinlaufes. Die Wurzel ist komplett in die Vergussmuffe eingewachsen. E Improvisierter Übergangsbereich von einer PVC-Leitung auf eine Keramikleitung. Beide Rohrmaterialien wurden mit Zementmörtel verbunden. Die Wurzeln sind in Spalten gewachsen, die sich im Zementmörtel befanden.

4.3.1.3 Analyse der Leitungsproben

Der von Wurzeleinwuchs betroffene Übergangsbereich zwischen Keramik- und PVC-Leitung war mit Hilfe eines auf der PVC-Leitung aufgezogenen Elastomerrings und einer Zementmörtel-Masse angefertigt worden. Die Wurzeln sind zwischen Dichtring und Mörtelmasse in die Leitung eingewachsen (Abb. 128 A). Mehrere Wurzeln ragen im Sohlenbereich durch den Elastomerring in das Innere der Leitung. Nach der Zerlegung des Übergangstückes wurde deutlich, dass Wurzeln in einen Bereich eingedrungen sind, der sich zwischen Keramikmuffe und dem eingesetzten PVC-Bauteil befand (Abb. 128 B). Die Wurzeln haben den bestehenden Raum zwischen den improvisiert zusammengefügten Bauteilen komplett ausgefüllt. Hier haben die Wurzeln offenbar Freiraum vorgefunden und sich ausgebreitet.

Nach Öffnen der Rohrverbindung am Abzweig der Regenwasserleitung wurde deutlich, dass der gesamte, in der Rohrverbindung zur Verfügung stehende Raum von Wurzeln eingenommen wurde (Abb. 128 C). Die zum Zeitpunkt der Analyse verholzte Wurzel ist in die Rohrverbindung eingedrungen und verzweigt sich dort. Im Bereich der Muffe ist zu erkennen, dass die ältesten Wurzeln in der Rohrverbindung die Leitung quer umwachsen haben. Von der Muffe ausgehend sind die Wurzeln über den gesamten Umfang der Leitung in den Abzweig eingewachsen.

Ein großer Teil des Abzweiges war mit einem Wurzelpolster angefüllt. Das Polster hat sich im Bereich der Sohle ausgebreitet und einen großen Teil des zur Verfügung stehenden Leitungsquerschnittes eingenommen. Das Geflecht aus Wurzeln hat die Kanalsohle des Abzweiges ausgefüllt und gibt seine Form wieder. Die Wurzeln bildeten in Fließrichtung der Leitung ein Geflecht mit einer Länge von einem Meter, das bei der Baumaßnahme abgetrennt wurde. Die Wurzeln, die im Straßenkanal gegen die Fließrichtung gewachsen sind, reichen nur etwa 0,15 m weit (Abb. 128 D). Die Wurzeln waren von außen betrachtet nicht geschädigt. Von den Wurzeln im und vor dem Abzweig wurden Proben für eine Analyse genommen.

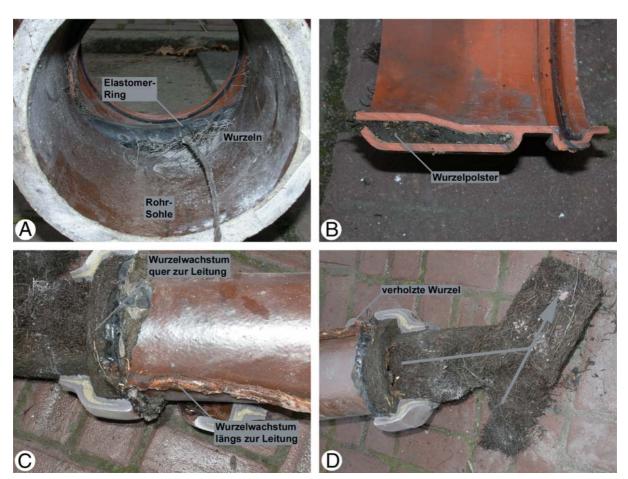


Abb. 128: Leitungsproben einer Regenwasserleitung. A Improvisierter Übergang von einer PVC- auf eine Keramikleitung. Ansicht gegen die Fließrichtung der Leitung. Zwischen dem eingelegten Elastomerring und dem Keramikrohr sind Wurzeln in den Querschnitt der Leitung gewachsen. B Längsschnitt des durchwurzelten PVC-Übergangstückes. Wurzeln haben hier den zur Verfügung stehenden Raum komplett ausgefüllt. C Durchwurzelte Rohrverbindung (Keramik mit Vergussdichtung), geöffnet. Die Wurzel ist längs zur Leitung gewachsen und in die Rohrverbindung eingewachsen. In der Muffe sind die Wurzeln quer zur Leitung gewachsen und haben den Raum in der Rohrverbindung ausgefüllt. Die Wurzeln sind durch die Rohrverbindung hindurch bis in den Querschnitt der Leitung gewachsen. D Wurzelpolster im Abzweig einer Regenwasserleitung. Der Abzweig wurde teilweise entfernt. Fließrichtung in Pfeilrichtung. Die Wurzel bilden ein dichtes Polster auf der Sohle der Leitung, welches die Form des Abzweiges abbildet. Die Wurzeln sind in Fließrichtung ca. 1,0 m weit gewachsen.

4.3.1.4 Analyse der Wurzelproben

Wurzeln, die innerhalb der Regenwasserleitungen gewachsen sind, weisen bei der lichtmikroskopischen Untersuchung nur wenige oder keine Schädigungen auf (Abb. 129 A). Die Wurzel besitzt ein intaktes Abschlussgewebe, ein regelmäßiges Rindenparenchym und eine Endodermis, die den Zentralzylinder umschließt. Die Wurzel war im Scheitel der Regenwasserleitung gewachsen und hatte bei starkem Niederschlag Kontakt zum Leitungsmedium. Links oben im Querschnitt ist eine Deformation des Organs zu erkennen. Die Wurzelprobe wurde aus dem Übergang von der PVC-Leitung auf die Keramikleitung entnommen (Abb. 127 E).

Wurzeln, die dauerhaft mit dem Inhalt des Regenwasserkanals in Berührung gekommen sind, lassen keine oder nur wenig Schädigungen erkennen (Abb. 129 B). Wurzeln, die aus dem Bereich der Sohle des Übergangsstückes entnommen wurden, sind im Querschnitt nicht kreisförmig. Die Oberfläche ist teilweise von einer Schicht aus Fremdstoffen bedeckt. Die Gewebe sind in ihrer Anordnung und Struktur intakt erhalten geblieben.

Wurzeln, die in der Rohrverbindung gewachsen sind, stand für das Wachstum nur wenig Raum zur Verfügung (Abb. 129 C). Das Abschlussgewebe des Organs ist durchgehend und wirkt, wie das Rindenparenchym, intakt. Im Bereich des Zentralzylinders fällt ein großer Anteil verholzter Zellwände durch ihre rote Färbung auf. Der Anteil verholzter Elemente ist bei diesen Wurzel höher als bei solchen, die außerhalb der Rohrverbindung gewachsen sind. Wurzeln, die innerhalb eines Regenwasserabzweiges, jedoch außerhalb der Rohrverbindung gewachsen sind, weisen keine Schädigungen auf (Abb. 129 D). Der Querschnitt zeigt ein intaktes Abschlussgewebe, mit wenigen anhaftenden Verunreinigungen, die nach Fixierung der Präparate erhalten geblieben sind. Anordnung und Struktur der weiteren Gewebe entsprechen dem Aufbau einer intakten Wurzel, die Endodermis ist deutlich als durchgehender Ring von Zellen mit verdickten Wänden zu erkennen. Es sind keine Schädigungen durch den Leitungsinhalt oder durch das Wachstum in der Leitung nachweisbar.

Von den verholzten Wurzeln, die in den Abzweig (Abb. 126 und Abb. 127 C) eingewachsen waren, wurden Proben genommen. Durch Zählen der Jahresgrenzen wurde das Alter der Wurzel bestimmt (Abb. 129 E). Die Jahresgrenzen sind durch Pfeile gekennzeichnet. Im Holz mehrjähriger Wurzeln werden Jahresgrenzen nur undeutlich ausgebildet. Im Querschnitt der Wurzel, die außerhalb der Leitung parallel gewachsen ist, sind sechs Jahregrenzen zu erkennen. Das Alter der Wurzel beträgt hier mindestens 6 Jahre. Bei Wurzeln, die unter räumlicher Enge in der Rohrverbindung des Abzweiges gewachsen sind, befindet sich das zentrale Xylem nicht in der Mitte des Querschnittes (Abb. 129 F). Es ist zu einer Seite hin verschoben (im Bild unten). Die Jahresgrenzen sind durch Pfeile gekennzeichnet. Das Alter der ältesten, in der Verbindung gefundenen Wurzel beträgt vier Jahre. Die Wurzeln, die im Querschnitt der Leitung vorgefunden wurden, hatten ein Alter von maximal 3 Jahren. Die Wurzel ist somit ungefähr 3 Jahre in der Verbindung gewachsen und hat hier die zur Verfügung stehenden Räume ausgefüllt. Erst nach dieser Zeit ist die Wurzel in die Leitung eingewachsen.

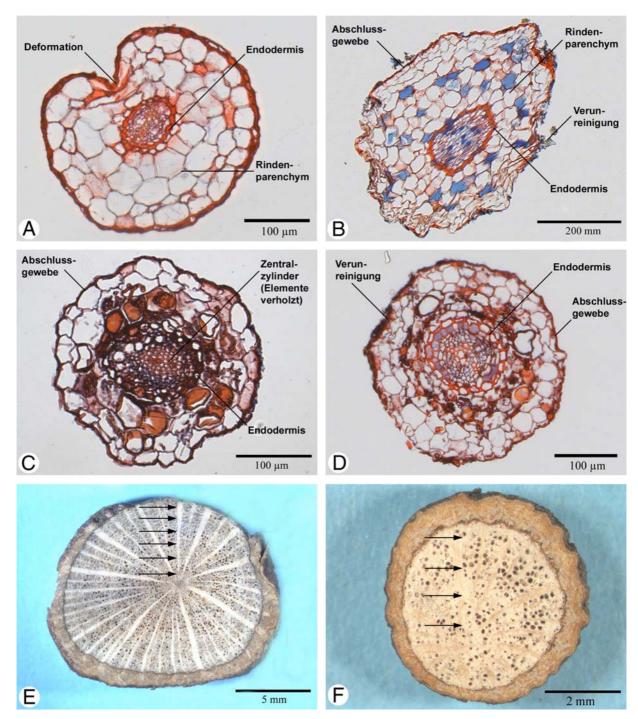


Abb. 129: Querschnitte von Wurzeln (*Platanus hybrida*), die an / in einer Regenwasserleitung gewachsen sind. A bis D Hellfeld-Durchlicht, E und F Auflicht. A In der Regenwasserleitung am Übergang von PVC auf Keramik, Scheitel (Abb. 127 E). B In der Regenwasserleitung Übergang von PVC auf Keramik, Sohle. C In der Rohrverbindung des Regenwasserabzweiges. D Innerhalb des Regenwasserabzweiges. E Außerhalb der Leitung. Sechs Jahresgrenzen durch Pfeile gekennzeichnet. F Innerhalb der Rohrverbindung des Regenwasserabzweiges. Vier Jahresgrenzen durch Pfeile gekennzeichnet.

4.3.2 Wuppertal

4.3.2.1 Anlass der Maßnahme

Die Maßnahme wurde mit dem Ziel durchgeführt, ein Abflusshindernis durch Wurzeleinwuchs in der Mischwasser-Hausanschlussleitung eines kirchlichen Gemeindehauses zu beseitigen.

Zu Beginn der Baumaßnahme wurden mit Hilfe einer Kanalspiegelung im Hauptkanal Wurzeln festgestellt, die sich im Bereich der Einbindung der später sanierten Hausanschlussleitung befanden.

Haus und Leitung wurden im Jahr 1956 erbaut. Die Anschlussleitung mit DN 150 aus Keramik ist über einen Abzweig an den Keramik-Straßenkanal mit DN 300 angebunden. Zum Zeitpunkt der Baumaßnahme befand sich auf dem Gelände des Gemeindehauses ein baumförmiger Weißdorn (*Crataegus spec. L.*), der in 1,0 m Höhe einen Stammdurchmesser von 0,4 m hatte. Die Entfernung von der Anschlussleitung beträgt 6,5 m. Zu Beginn des Jahres 2002 wurden hier mehrere Bäume anderer Arten entfernt, so dass als Herkunft der Wurzeln nicht allein der Weißdorn in Frage kommt.

Diese Baumaßnahme wurde im geringen Umfang dokumentiert, es wurde keine Übersichtszeichnung der Umgebung angefertigt. Eine Entnahme von Leitungs- und Wurzelproben wurde ebenfalls nicht durchgeführt.

Der Zustand der Leitung vor der Sanierung kann nicht durch Bilder aus dem Inspektionsvideo dokumentiert werden – die Aufnahmen wurden vom Netzbetreiber nicht zur Verfügung gestellt.

Aufgrund weiterführender Erkenntnisse bietet sich jedoch eine Darstellung an.

4.3.2.2 Aufgrabung / Schadensbild

Bei der Baumaßnahme wurde die Hausanschlussleitung freigelegt (Abb. 130 A). An den Rohrverbindungen im Gehweg war kein Wurzeleinwuchs zu beobachten. Die Leitung verläuft im Bereich des Gehweges neben einem Regenwassereinlauf, der an eine Hausanschlussleitung angebunden wurde.

Bei der Aufgrabung wurde deutlich, dass der Boden im Bereich des Regeneinlaufes stark durchwurzelt war (Abb. 130 D). Eine jetzt verholzte Wurzel ist außen am Regenwasserschacht in Richtung Oberfläche gewachsen. Die Wurzel hat sich nahe der Bodenoberfläche stark verzweigt. Die äußere Oberfläche des aus Ringen zusammengesetzten Einlaufschachtes war mit Wurzelgeflecht überzogen. Im Übergangsbereich von der

Abdeckung zum Schacht des Regeneinlaufes befindet sich ein dichtes Wurzelpolster. Verholzte Wurzeln haben ebenfalls die Fugen zwischen Schacht des Regenwassereinlaufes und Bordstein ausgefüllt.

Der Filtereimer des Regenwassereinlaufes war mit einem dichten Wurzelpolster gefüllt (Abb. 130 B). Der Eimer konnte nicht von Hand entnommen werden, sondern musste mit Hilfe des Baggers herausgezogen werden. Die eingewachsenen Wurzeln hatten einen festen Zusammenhalt und waren mit denen im Boden verbunden. Der im Eimer zur Verfügung stehende Raum wurde gleichmäßig und vollständig ausgefüllt. Das Polster bestand überwiegend aus Wurzeln, jedoch auch aus Blättern und anderen Reststoffen. Die im Inneren des Eimers gewachsenen Wurzeln waren zum größten Teil verholzt. Der Abfluss von Oberflächenwasser in die angebundene Leitung war durch komplettes Verstopfen mit Schmutzund Reststoffen nur in geringem Umfang möglich.

Am Abzweig des Straßenkanals wurden bei der vorausgehenden Kanalspiegelung Wurzeln in der Nähe der Einmündung nachgewiesen. Die Hausanschlussleitung wurde in diesem Bereich mit dem Bagger und teilweise mit der Hand aufgegraben. In der Nähe des Abzweiges im Straßenkanal waren an der Oberfläche der Leitung Wurzeln zu erkennen (Abb. 130 C). Der genaue Ort, an dem die Wurzeln in die Verbindungen der Leitungen eingedrungen waren, konnte nicht nachgewiesen werden. Der Abzweig im Hauptkanal wurde nicht ausgebaut.

Der Scheitel des letzten Rohres der Anschlussleitung, das in den Abzweig des Straßenkanals mündet, wurde während der Aufgrabung mit dem Bagger zerstört (Abb. 130 E). In der Leitung befanden sich Wurzeln, die an Rohrverbindungen des Straßenkanals in die Leitung eingewachsen waren und sich vermutlich in die Hausanschlussleitung hinein ausgebreitet haben. An den Rohrverbindungen des Straßenkanals konnten allerdings im Zuge der Baumaßnahme keine weiteren Proben entnommen werden.



Abb. 130: Baumaßnahme Wuppertal. A Lage der Hausanschlussleitung im Bereich des Gehweges. Im Vordergrund des Bildes ist ein Straßeneinlauf für Regenwasser zu erkennen, der von einem dichten Wurzelpolster umgeben war. Im Hintergrund des Bildes ist der Baum (Weißdorn) zu erkennen, dessen Wurzeln den Schaden verursacht haben könnten. B Durchwurzelter Eimer des Straßeneinlaufes. Der gesamte Raum ist von einem Polster aus Wurzeln und Reststoffen ausgefüllt. C Verholzte Wurzel an der Oberfläche einer Keramikleitung. Die Wurzel wächst längs der Leitung und ist an einer Rohrverbindung des Abzweiges in den Hauptkanal eingewachsen. D Verwurzelter Regenwassereinlaufschacht. Außen am Schacht ist eine verholzte Wurzel in Richtung Erdoberfläche gewachsen. Die Wurzel hat sich zu einem Wurzelpolster zwischen Schacht und Abdeckung des Einlaufes verzweigt. E Zerstörte Anschlussleitung und Abzweig des Straßenkanals. Wurzeln befanden sich in einer Rohrverbindung im Abzweig des Straßenkanals.

4.4 Schlussfolgerungen

Bei den Aufgrabungen war durchweg zu beobachten, dass die Umgebung von Leitungen, d.h. insbesondere der Leitungsgraben, für Wurzeln attraktiv ist. So spiegelt das Wachstum von Wurzeln und das entstehende Wurzelbild oftmals die Schichtgrenzen im Boden bzw. des Bettungsmaterials von Ver- bzw. Entsorgungsleitungen wider (vgl. Abb. 48 C und Abb. 115 C). Teilweise waren die Wurzeln parallel zu den Leitungen bzw. entlang der äußeren Rohroberfläche sowohl von Ent- (vgl. Abb. 48 C) als auch von Versorgungsleitungen (Abb. 115 C) gewachsen.

Bei Abwasserleitungen wurden verholzte Wurzeln freigegraben, die entlang der Rohrleitung im sogenannten Zwickelbereich von Rohrverbindung zu Rohrverbindung gewachsen waren. Die Räume (Ringraum) und Spalten (Ringspalt) vor dem Dichtmittel der Rohrverbindungen wurden in der Regel durch ein dichtes Wurzelpolster ausgefüllt. Die Wurzeln wachsen über mehrere Jahre in diesen Räumen, bis diese komplett ausgefüllt sind. In der Folge durchdringen die Wurzeln das Dichtelelement und wachsen in den Querschnitt der Leitung ein. Dort bilden Sie in Abhängigkeit vom Leitungsmedium in ihrer Größe und Position unterschiedlich ausgeprägte Abflusshindernisse aus (Abb. 45 B, Abb. 128 D). Der Einwuchs erfolgt in der Regel oberhalb der Sohle (Abb. 45 B) und nicht über den Sohlbereich. Das primäre Ziel scheint also nicht der Kontakt mit dem Abwasser zu sein.

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 hervorgingen.

Dichtefallenmodell:

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

Quellungsmodell:

Änderungen der Bodenfeuchtigkeit über die Zeit beeinflussen die Struktur von Böden und Wurzeln. Bestandteile des Substrates sind in der Lage unter Wasseraufnahme zu quellen und durch Wasserabgabe zu schwinden. Diese zeitliche Veränderungen des zur Verfügung stehenden Raumes im Boden kann ein Ausbreiten der Wurzeln beeinflussen. Quell- und Schwindvorgänge können wahrscheinlich auch in verholzten Wurzeln auftreten. Hierdurch können möglicherweise Kräfte auf Rohre und Rohrverbindungen wirken, die über den gemessenen, aus Dickenwachstum entstandenen Kräften liegen. So ist es ist denkbar, dass die hohen Kräfte, die für das Überwinden des Anpressdrucks einer Rohrverbindung notwendig sind, durch Quellung verholzter Zellwände erzeugt werden. In der Umgebung von Leitungen und deren Verbindungen, die unterhalb des Grundwasserstandes verlegt sind, treten nur geringe Schwankungen durch Quellungsvorgänge auf. Trifft dieses Modell zu, so tritt der Einwuchs von Wurzeln in Leitungen, die ständig unterhalb des Grundwasserstandes verlegt sind, selten auf.

Sauerstoffmodell:

Die Verfügbarkeit von Sauerstoff im Boden hat großen Einfluss auf die Ausbreitung von Wurzeln. Alle pflanzlichen Organe benötigen Sauerstoff zur Aufrechterhaltung ihres Stoffwechsels. Die Versieglung städtischer Böden hat zur Folge, dass der Eintrag von Sauerstoff in den Boden stark eingeschränkt ist. Abwasserleitungen werden meist als Freispiegelleitungen betrieben und ausreichend über Wartungs- und Inspektionsöffnungen (Schächte) belüftet. Der größte Anteil der Leitung ist mit Luft gefüllt. Bei vergossenen Dichtungen können im Vergussmaterial durch Schwinden Risse entstehen. Der in der Luft enthaltene Sauerstoff kann so in der Umgebung von Rohren und Rohrverbindungen in den Boden gelangen. Aber auch Rohrverbindungen mit Elastomerdichtungen können mit der Zeit gasundicht werden (vgl. [92]). Die Rohrverbindung und der angrenzende Boden wird dadurch möglicherweise für Wurzeln attraktiv. Wurzeln wachsen gemäß diesem Modell der Sauerstoffquelle entgegen und finden so die Rohrverbindung. Bei nicht gasdichten Rohrwerkstoffen kann auch bei intakten Leitungen Sauerstoff austreten, der einen Einfluss auf die Ausbreitung von Wurzeln haben kann.

Kombinationsmodell:

Das Einwachsen in die Leitung erfolgt im allgemeinen nicht, weil der Leitungsinhalt gute Bedingungen bereitstellt, der Einwuchs ist hingegen die logische Konsequenz des Zusammenspiels verschiedener Gegebenheiten in der Nähe der Leitung. Es ist anzunehmen, dass ein Zusammenspiel verschiedener Faktoren den Einwuchs von Wurzeln in Leitungen ermöglicht. Sowohl Dichte des Bodens, sein Quellverhalten, wie auch die Verfügbarkeit von Sauerstoff und der Zustand der Leitung haben einen Einfluß auf das Wurzelwachstum. Das Erkennen von Faktoren, die vor Ort einem Schaden Vorschub leisten, kann helfen, zukünftige Schäden zu vermeiden.

Bei den hier untersuchten Schadensfällen wurden alle Beschädigungen durch bedecktsamige Bäume (Laubbäume) verursacht. Der Einwuchs von Wurzeln nacktsamiger Bäume (Nadelbäume) konnte in keinem Fall festgestellt werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden: Das zur Leitung gerichtete Wurzelwachstum ist eine Reaktion auf die Umgebung der Leitung. Aus Leckagen austretendes Abwasser bzw. Nährstoffe sind von untergeordneter Bedeutung. Die Umgebungsbedingungen und Oberlächeneigenschaften des Rohres können den Einwuchs in die Leitung erheblich begünstigen. Erst im zweiten Schritt entscheiden die Rohrverbindungseigenschaften über das

Einwuchsrisiko. Der Einwuchsvorgang lässt sich durch Kombination biologisch-technischer Modelle beschreiben.

5 Experimentelle Untersuchungen

Auf Grundlage der bei den Baumaßnahmen beobachteten Einwuchsbilder, z.B. hinsichtlich Weg der Wurzel zum Rohr, in die Verbindung und durch die Verbindung, wurde ein Versuchsprogramm abgeleitet, um die im Kapitel 4.4 zusammengefassten Erkenntnisse weiter zu vertiefen. Hierzu gehörten im Einzelnen

- Bodenuntersuchungen, um die tatsächlichen Bodeneigenschaften in den von Wurzeln durchwachsenen Leitungsgräben und hier insbesondere im Umfeld von Wurzelschäden an Rohrverbindungen zu erfassen,
- Pflanzversuche, um den grundsätzlichen Einfluss der Bodeneigenschaften auf das Wurzelwachstum zu bestätigen,
- Wurzeldruckmessungen an Primärwurzeln, um die Bandbreite und hier insbesondere die Maximalwerte der zu erwartenden Wurzeldrücke einzuschätzen,
- Analysen von Rohrverbindungen, um mögliche Angriffspunkte der derzeit am Markt vertriebenen Verbindungssysteme gegenüber Wurzeleinwuchs zu erkennen.

5.1 Bodenuntersuchungen

5.1.1 Umfang

Im Rahmen des Projektes wurden bei vier Aufgrabungen Bodenproben zur Bestimmung der Korngößenverteilung entnommen. Bei den Baumaßnahmen in Herten und in Münster wurden darüber hinaus weitergehende Bodenuntersuchungen durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen war es, den Einfluss der Bodenparameter und mögliche Einflüsse auf den Weg der Wurzeln zum Rohr und am Rohr entlang zu erkennen. Dabei wurde auch die Durchwurzelung anderer Bodenbereiche wie z.B. unterhalb der Gehwege in die Betrachtung einbezogen. Da sich die Untersuchungen im Wesentlichen auf zwei Standorte beschränkten, können allgemeingültige Aussagen nur ansatzweise abgeleitet werden.

Die Untersuchungen stützen sich auf Methoden zur Entnahme **ungestörter Proben** sowie der Bestimmung **physikalischer** und **chemischer Parameter** und wurden an der Universität Duisburg-Essen, Lehrstuhl für Angewandte Bodenkunde durchgeführt [9].

Die physikalischen Parameter ergeben sich aus dem Aufbau des Bodengefüges und lassen sich durch

- die Korngrößenverteilung,
- die Porengrößenverteilung,

- den Bodenwassergehalt,
- die Rohdichte und
- den Druckwiderstand

beschreiben.

Chemische Parameter sind

- der pH-Wert,
- das Redoxpotential,
- der Humusgehalt,
- der Gesamtstickstoffgehalt,
- der potentielle pflanzenverfügbare Anteil an Phospor und
- der potentielle pflanzenverfügbare Anteil an Kalium.

Bei den Untersuchungsmethoden handelt es sich um Standardverfahren, wie sie unter anderem in Normen, dem Methodenbuch des Verbandes Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA) [95] und in [96] beschrieben sind. Tabelle 3 gibt eine Übersicht der durchgeführten Analyseverfahren.

Tabelle 3: Durchgeführte Analyseverfahren und zugrunde liegende Vorschriften bzw. Methodenbeschreibung.

Bestimmung von	Methode	Vorschriften / Methoden					
Trockenrohdichte / Porengrößen- verteilung	Entnahme ungestörter Bodenproben durch Stechringe à 250 cm³ und 920 cm³ zur Bestimmung der Trockenrohdichte und 100 cm³ zur Bestimmung der Porengrößenverteilung durch eine Wassergehalts-Saugspannungsbestimmung (pF-Messung). Die pF-Messungen erfolgten an 6 – 10 Proben je Horizont.						
Redoxpotential							
Druckwider- standsmessung	Mit Handpenetrometer						
Wassergehalt	Wägung vor und nach Trocknung der Bodenprobe bei 105 ° C, Berechnung des Wassergehaltes in Prozent	[96]					
Rohdichte trocken	Nach der Entnahme ungestörter Bodenproben in Stechringen mit bekanntem Volumen wird die Bodenmasse und der Wassergehalt ermittelt.	[96]					
Korngrößen- verteilung	Aufschluss durch Humuszerstörung mit H ₂ O, Dispergierung in Natrium Pyrophosphat Korngrößenbestimmung durch Pipett- und Siebanalyse	DIN ISO 11277 [98]					
pF-Messung	Wassergehalts-Saugspannungsbestimmung: Das Bodenwasser wird stufenweise durch steigenden Unterdruck für die pF-Stufen 10, 30, 50, 100 hPa nach Wolkewitz sowie für die pF-Stufen 300, 1000 und 15.000 hPa durch Überdruck nach Richards u. Firemann entfernt.	[99], [100], DIN 19683 [97]					
pH-Wert (CaCl ₂)	Elektrometrische Messung in Bodensuspension (10 g Feinboden + 25 ml Lösung bzw. Wasser) in 0,01 M CaCl ₂ -Lösung.	DIN ISO 10390 [101]					
Gesamtgehalt an Kohlenstoff (C), Stickstoff (N) und Schwefel (S)	der Bodenprobe bei ca. 1100°C aus den Kohlenstoff-Quellen	Keine					
Gehalt an a) Phosphor (P) b) Kalium (K)	Extraktion von Phosphor und Kalium durch eine saure Calciumlactat-Lösung (Doppellactat DL-Methode) und anschließend: Photometrische Bestimmung des Phosphors bei 576 mm Bestimmung des Kaliums am Flammen-Atomabsorptions-Spektrometer (AAS)	VDLUFA [95]					

5.1.2 Probenahme

Die Abwasserkanäle wurden in den betrachteten Fällen vor der Beprobung bis zum Rohrscheitel freigelegt. Die Beprobung erfolgte unter Berücksichtigung folgender Kriterien:

- Fehlen und Vorhandensein einer Durchwurzelung
- Humusgehalt der Böden

• Lage der Probennahmestellen in Rohrnähe, im Boden über dem Rohr und sofern zugänglich unter dem Rohr.

In Tabelle 4 und Tabelle 5 sind die Probenahmestellen im Rohrgraben aufgeführt.

Tabelle 4: Probennahme Baumaßnahme Herten, am 26. und 27.01.2004.

Ort	Tiefe [cm]	Vol.Gew Proben	pF-Proben	Druck- widerstand	Redoxpotential
	105	X	X	X	X
Links Wand (gagen die	140	X	-	-	-
Linke Wand (gegen die Fließrichtung)	155	X	X	X	X
rnebrichtung)	155	X	-	-	-
	205	X	X	X	X
	100	X	X	X	X
	115	X	-	-	-
Im Graben	130	X	-	-	-
(ausgehobener	150	X	X	X	X
Leitungsgraben)	180	X	-	-	-
	205	X	-	-	-
	240	X	-	-	-
50 cm Abstand vom Rohr	230	X	-	-	-
30 cm Abstand vom Rom	240	X	X	X	X
Rechts (gegen die	38	X	-	-	-
Fließrichtung) neben dem	50	X	-	-	-
Graben unter der Straße	62	X	-	-	-
Direkt neben dem Rohr	ca. 250	X	X	X	X
Direkt über dem Rohr	ca. 240	X	X	X	X

Tabelle 5: Probennahme Baumaßnahme Münster, am 02.03. 2004.

Ort	Tiefe [cm]	Vol.Gew Proben	pF-Proben	Druck- widerstand	Redox- potential
Neben dem Rohr	210	X	X	X	X
Unter der Muffe	230	X	X	X	X
Neben dem Rohrgraben aus nur mit Grobwurzeln durch- wurzeltem Bereich	190	X	X	X	X
Aus stark durchwurzeltem Bettungsmaterial	135	X	X	X	X
Neben Graben, kaum durchwurzelter Bereich	135	X	X	X	X
Sand direkt unter den Gehsteigplatten	0-5	X	X	X	X
Kaum durchwurzelter Bereich unter dem Gehweg	40	X	X	X	X

Da lediglich zwei Standorte untersucht wurden, reicht die Datengrundlage nicht aus, um eine Systematik der Einwirkung der einzelnen Bodenmerkmale in Leitungsgräben zu erarbeiten. Es wurden allerdings Bereiche stärkerer, geringerer und ohne Durchwurzelung beprobt, so dass eine Kennzeichnung, d.h. Typologie durchwurzelter und nicht durchwurzelter Böden im beprobten Leitungsbereich möglich wird.

5.1.3 Bodenart

Im Umfeld der Baumaßnahme in Herten herrschen mittel lehmige Sande (S13) vor. Schichtweise treten auch stark tonige Schluffe (Ut4) oder mittel tonige Sande (St3) auf. Auffallend ist das Vorherrschen von Mittel- und Feinsand sowie Grobschluffen. In etwa 1,55 m Tiefe treten stark tonige Schluffe auf, die mit ihrer Dominanz (55%) den Lössen im südlichen Ruhrgebiet ähneln. Die Füllböden im Bereich der Rohrbettung bestehen aus lehmigen Sanden (Die Dominanz von Mittelschluffen und starken Vorkommen von Grobschluffen sind wesentliche Merkmale von Lössen des Ruhrgebietes).

Füllboden und anstehende Böden bei der Baumaßnahme in Münster waren Sande bis schluffige Sande. Die Sande sind deutlich grobkörniger als bei der Baumaßnahme in Herten.

Bei der Baumaßnahme in Herten trat im stark tonigen Schluff (Ut4) keine Durchwurzelung auf. Die übrigen Bereiche waren sehr schwach durchwurzelt. Bei der Baumaßnahme in

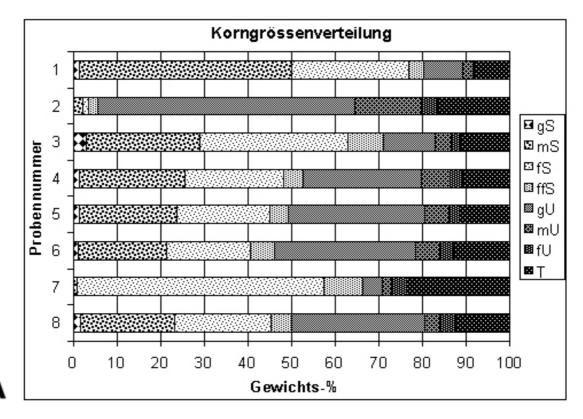
Münster wurden sowohl im Leitungsgraben als auch als anstehender Boden Sande vorgefunden, die sich nur gering voneinander unterschieden. Die Sande erschienen hier teils stark, teils kaum durchwurzelt.

Die Korngrößenverteilungen nach DIN 19683 Blatt 2 [102] aus Bodenproben beider Baumaßnahmen sind als Grafik der Abb. 131 und als Werte der Tabelle 6 zu entnehmen. Im Rahmen der Baumaßnahme in Herten wurden an folgenden Stellen Bodenproben zur Bestimmung der Korngrößenverteilung entnommen:

- 1. links neben Graben (linke Wand), 105 cm Tiefe
- 2. links neben Graben (linke Wand), 155 cm Tiefe
- 3. links neben Graben (linke Wand), 205 cm Tiefe
- 4. im Graben,100 cm Tiefe
- 5. im Graben, 150 cm Tiefe
- 6. neben Rohr ca. 50 cm Abstand, 230 cm Tiefe
- 7. direkt neben Rohr, 230 cm Tiefe
- 8. direkt über Rohr, 220 cm Tiefe.

Die oben angeführten Positionen entsprechen der Beschreibung der Probennahmeorte aus Tabelle 4. Bei der Baumaßnahme Münster wurden an nachfolgenden Positionen Proben zur Bestimmung der Korngrößenverteilung entnommen:

- 1. direkt neben Rohr (stark durchwurzelt), 210 cm Tiefe
- 2. unter der Muffe (stark durchwurzelt), 230 cm Tiefe
- 3. rechts neben dem Rohr (keine Fein- nur Grobwurzeln), 190 cm Tiefe
- 4. Rohrgraben (sehr stark durchwurzelter bereich), 135 cm Tiefe
- 5. neben Graben (sehr schwach durchwurzelter Bereich), 135 cm Tiefe
- 6. unter Gehwegplatte (kaum durchwurzelt, nur im humosen Bereichen) 40 cm Tiefe.



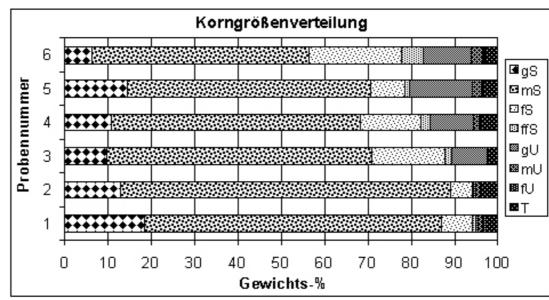


Abb. 131: **A** Korngrößenverteilung der Proben aus der Baumaßnahme in Herten. **B** Korngrößenverteilung der Proben aus der Baumaßnahme in Münster .

gS = Grobsand, mS = Mittelsand, fS = Feinsand, ffS = Feinstsand, gU = Grobschluff, mU = Mittelschluff, fU = Feinschluff, T = Ton.

Tabelle 6: Daten der Korngrößenverteilung von Proben aus den Baumaßnahmen in Herten und Münster.

gS = Grobsand, mS = Mittelsand, fS = Feinsand, ffS = Feinstsand, gU = Grobschluff, mU = Mittelschluff, fU = Feinschluff, T = Ton.

SI3 = mittel lehmiger Sand, Ut4 = stark toniger Schluff, Slu = lehmig schluffiger Sand, St3 = mittel toniger Sand, SI4 = stark lehmiger Sand, mSgs = Mittelsand - grob sandig, Su = mittel schluffiger Sand.

Proben	Tiefe	gS	mS	fS	ffS	gU	mU	fU	Ton	Ton	Schluff	Sand	Bodenart
herkunft	cm	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
	Baumaßnahme Herten												
Pos. 1	105	1,5	48,6	26,8	3,3	8,9	2,4	0,3	8,3	8,3	11,5	80,2	SI3
Pos. 2	155	0,1	2,1	1,3	2,2	58,9	15,0	3,8	16,6	16,6	77,7	5,7	Ut4
Pos. 3	205	3,1	25,8	33,9	8,2	11,8	3,7	2,0	11,4	11,4	17,5	71,1	SI3
Pos. 4	100	1,5	24,0	22,7	4,4	27,0	6,6	2,8	10,8	10,8	36,5	52,7	SI3
Pos. 5	150-160	1,3	22,4	21,3	4,2	31,2	5,6	2,3	11,6	11,6	39,1	49,3	SI3
Pos. 6	240	1,2	20,3	19,0	5,6	32,4	5,5	3,1	13,0	13,0	41,0	46,0	Slu
Pos. 7	240-250	0,0	0,9	56,6	8,8	4,6	2,0	3,4	23,8	23,8	10,0	66,2	St3
Pos. 8	240	1,7	21,5	21,9	4,8	30,3	3,4	3,7	12,5	12,5	37,5	50,0	SI4
			•	В	auma	ßnahr	ne Mü	inste	r				
Pos. 1	210	18,5	68,6	7,0	0,9	0,6	0,9	0,8	2,8	2,8	2,3	94,9	mSgs
Pos. 2	230	12,7	76,2	5,2	0,3	0,5	1,0	0,2	3,8	3,8	1,7	94,4	mSgs
Pos. 3	190	9,6	61,3	17,0	1,5	8,2	0,1	0,3	2,1	2,1	8,5	89,4	mSgs
Pos. 4	135	10,8	57,5	13,9	2,1	10,1	1,2	0,3	4,1	4,1	11,6	84,3	Su
Pos. 5	135	14,4	56,3	7,8	1,2	14,4	2,0	0,2	3,7	3,7	16,6	79,7	Su
Pos. 6	40-45	6,3	50,0	21,3	5,0	11,1	2,7	0,6	2,9	2,9	14,4	82,7	Su

5.1.4 Physikalische und chemische Merkmale

Die Ergebnisse der Untersuchung weiterer physikalischer und chemischer Merkmale sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Für beide Standorte sind die **Rohdichten** als mittel, vereinzelt als mittel bis hoch zu bewerten. Die niedrigsten Rohdichten zeigten sich an beiden Standorten in direkter Umgebung des

Rohres; sowohl über, als auch neben und unter dem Rohr. Dies zeigt deutlich, dass beim

Rohreinbau eine Verdichtung der Füllböden (Bettungsmittel) in Rohrnähe kaum erfolgte.

Die Baumaßnahme in Herten zeigt, dass im Füllgraben die Rohdichte mit der Tiefe zunimmt.

Die höchsten Rohdichten traten bei beiden Standorten im ungestörten Boden auf.

Die stärkste Durchwurzelung, bei der Baumaßnahme in Münster, trat zusammen mit der geringsten ermittelten Bodenrohdichte (1455g/dm³) auf. Wie ebenfalls bei der Baumaßnahme in Münster beobachtet werden konnte, können dichte Schichten ohne starke Feinwurzelausbildung durch Grobwurzeln durchdrungen werden.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass lockerer Boden die Wurzelausbreitung und Durchwurzelungsintensität fördert.

Die aktuellen Luftgehalte im Boden während der Probennahmetermine (26./27.01.2004, Herten und 02.03.2004, Münster), d.h. im Winter, waren bis auf eine Ausnahme mindestens mittel, in Münster sogar hoch bis sehr hoch. Die stärkste Durchwurzelung trat zusammen mit den höchsten Luftgehalten auf.

Nicht belüftet war nur der stark tonige Schluff (Ut4) im Bereich der Baumaßnahme in Herten. Die Wassergehalte können für die Baumaßnahme in Herten mit gering bis mittel beurteilt werden. In Münster, beim Vorliegen von Sanden sind sie als sehr gering zu bewerten. Ursache für die Unterschiede sind die Bodenarten, da das Wasserrückhaltevermögen von Sanden in der Regel geringer ist als das von Schluff.

Die gemessenen pH-Werte zeigen für beide Standorte eine schwache Versauerung an. Ausgenommen davon ist der Boden unter der Muffe in Münster. Hier war der Boden stark sauer.

Die Humusgehalte, dargestellt als C-Gehalte, sind gering. Schwach erhöht sind sie im Füllboden, in Rohrnähe und im Bereich stärkster Durchwurzelung.

Die Phosphatgehalte sind im Falle der Baumaßnahme in Herten deutlich höher als bei der Baumaßnahme in Münster. Dort sind sie allgemein sehr gering, während sie bei der Baumaßnahme in Herten vor allem mittel und direkt über dem Rohr vergleichsweise hoch sind. Beziehungen zur Durchwurzelung wurden nicht sichtbar. Die Phosphatgehalte sind wahrscheinlich zu hoch, um eine Differenzierung der Durchwurzelung zu bewirken.

Die Kaliumgehalte waren grundsätzlich gering, jedoch in einem einzelnen stark durchwurzelten Bodenbereich der Baumaßnahme in Münster erhöht. Der Kaliummangel des Sandes scheint die Durchwurzelung zu beeinflussen.

Experimentelle Untersuchungen 155

Tabelle 7: Physikalische und chemische Merkmale zum Probenahmezeitpunkt. TS = Trockensubstanz, Vgtr = Trockendichte, GPV = Gesamtporenvolumen, H₂O = Wassergehalt, pH = pH-Wert, Ton = Anteil Ton, DL-P₂O₅ = Konzentration an Phosphor, DL-K₂O = Konzentration an Kalium. C = Anteil Kohlenstoff, N = Anteil Stickstoff, C/N = Verhältnis Kohlenstoff/Stickstoff

Proben-	Tiefe	TS	Vgtr.	GPV	H_2O	Luftgehalt	pН	pН	Ton	DL-P ₂ O ₅	DL-K ₂ O	С	N	C/N
herkunft	[cm]	[%]	[g/cdm]	[Vol.%]	[Vol.%]	[Vol.%]	H_2O	CaCl ₂	[%]	[mg/kg]	[mg/kg]	[%]	[%]	[%]
Baumaßnahme Herten														
Pos. 1	105	94,32	1669	37	10	27	7,4	6,8	8,26	54	18	0,04	0,007	6,1
Pos. 2	155	82,39	1704	36	36	0	7,2	6,6	16,64	185	128	0,11	0,021	5,1
Pos. 3	205	90,55	1624	39	17	22	7,2	6,4	11,39	94	52	0,05	0,010	4,9
Pos. 4	100	87,23	1570	41	23	18	7,4	6,9	10,83	122	56	0,23	0,026	8,8
Pos. 5	150-160	85,61	1617	39	27	12	7,3	6,8	11,59	75	51	0,13	0,020	6,7
Pos. 6	240	84,53	1645	38	30	8	7,3	6,7	13,01	126	67	0,10	0,018	5,8
Pos. 7	240-250	83,30	1528	42	31	12	7,4	6,8	23,85	74	122	0,09	0,017	5,4
Pos. 8	240	85,21	1533	42	27	16	7,3	6,8	12,47	253	68	0,61	0,032	19,1
					Bauma	Bnahme Mü	inster							
Pos. 1	210	94,89	1560	41	8	33	7,5	6,5	2,78	13	61	0,20	0,014	14,4
Pos. 2	230	97,12	1537	42	5	37	5,4	4,2	3,85	11	111	0,28	0,021	13,4
Pos. 3	190	93,44	1722	35	12	23	7,1	6,3	2,11	11	23	0,03	0,007	4,3
Pos. 4	135	94,04	1456	45	9	36	7,2	6,2	4,06	21	122	0,33	0,020	16,3
Pos. 5	135	93,19	1800	32	13	19	7,5	6,8	3,67	11	53	0,07	0,009	7,3
Pos. 6	40-45	92,71	1616	39	13	26	7,4	6,9	2,92	28	61	0,19	0,014	13,5

Bewertung:

					DL-			
	Vgtr.	H_2O	Luftgehalt	DL-P ₂ O ₅	То	Tongehalten von		
	[g/dm³]	[Vol.%]	[Vol.%]	[mg/kg] < 5% 5-17 % 17-35 %				[%]
Sehr gering	< 1250	<13	<2	<30	-	-	-	<6
Gering	1250-1450	13-26	2-4	31-60	<40	<60	<80	6-12
Mittel	1450-1650	26-39	4-12	61-150	50-90	70-130	90-170	12-20
Hoch	1650-1850	39-52	12-20	151-300	100-150	140-220	180-280	20-30
Sehr hoch	>1850	>52	>20	>300	160-220	230-330	290-400	>30

(K- und P-Gehalte nach Landwirtschaftskammer Rheinland für Äcker)

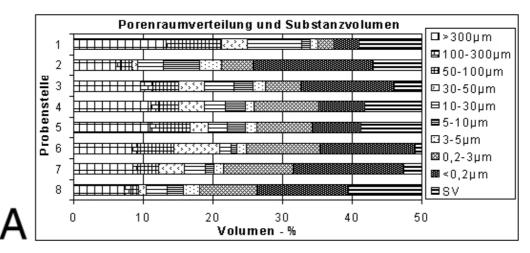
5.1.5 Porenraumgliederung (pF-Wassergehaltsbeziehung)

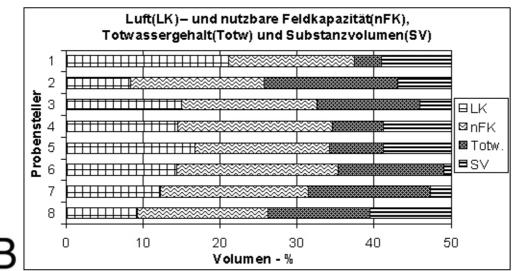
Von Interesse ist der Einfluss der gröbsten Poren, d.h. > 100-300 µm, die das Eindringen von Feinwurzeln ermöglichen, und die Versorgung der Wurzeln mit Luft- und Wasser.

In Abb. 132 A und Abb. 133 A sind die Volumenanteile der einzelnen untersuchten Porengrößenklassen dargestellt. Bei der Baumaßnahme in Herten weisen die Probenstellen Volumenanteile von 6 bis 13 % der Poren >300 μm auf. Einschränkend muss dazu ausgeführt werden, dass die Proben eine Neigung zur Quellung hatten und damit wahrscheinlich im eingebauten Boden die ermittelten Grobporengehalte geringer sind als die hier ermittelten. Die Luftkapazität in Abb. 132 B (LK) ist mit 8-17 Vol.% überwiegend hoch, so dass eine Behinderung des Wurzelwachstumes durch Luftmangel unwahrscheinlich ist. Das für Pflanzen verfügbare Wasser kann durch Messung der sogenannten nutzbaren Feldkapazität (nFK) ermittelt werden. Die Wasserversorgung ist aufgrund der gemessenen nFK-Werte als mittel zu bewerten. Die vorgefundenen aktuellen Wasser- und Luftgehalte in Abb. 132 C zeigen ein ähnliches Bild, wobei die Luftgehalte etwas höher und die Wassergehalte etwas niedriger als die LK und die nFK sind.

Beschränkungen des Wurzelwachstumes sind somit gering. Insgesamt war jedoch in dem Boden die Durchwurzelung schwach und beim Ut4 fehlte sie ganz. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass der Anteil an Poren >300 µm einen Einfluss hat.

Bei der Baumaßnahme in Münster lagen Sande und schluffige Sande vor. Im Bereich des Rohres lagerten sie sehr locker. Dies wirkt sich deutlich im Gehalt an Poren >300 µm aus. Er ist dort mit ca. 20 Vol.% sehr hoch. Dies zeigt sich auch in einer verstärkten Durchwurzelung dieser Bereiche. Die Sande weisen eine sehr hohe Luftkapazität (LK) und eine geringe nFK auf (s. Abb. 133 B). Der Boden ist somit sehr gut durchlüftet, so dass eine Begrenzung des Wurzelwachstumes durch Luftmangel nicht zu erwarten ist. Begrenzend könnte sich jedoch ein gering verfügbarer Wasservorrat im Sommer auswirken. Die aktuellen Luft- und Wassergehalte in Abb. 133 C entsprachen etwa den bei der pF-Messung bestimmten Werten.





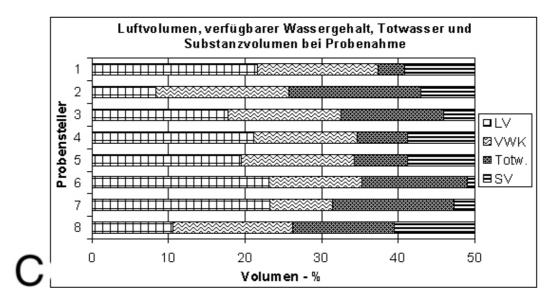
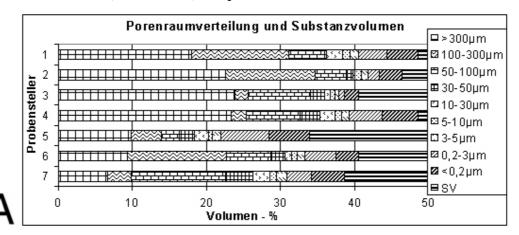
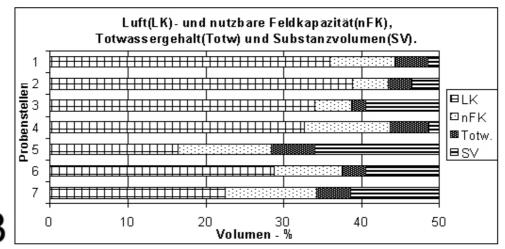


Abb. 132: A Porenraumverteilung und Substanzvolumen, Herten. B Luft (LK)- und nutzbare Feldkapazität (nFK),
Totwassergehalt (totw) und Substanzvolumen (SV), Herten. C Luftvolumen, verfügbarer Wassergehalt,
Totwasser und Substanzvolumen bei Probenahme, Herten.

LK = Luftkapazität, nFK = nutzbare Feldkapazität, Totw = Totwasser, SV = Substanzvolumen, VWK = verfügbare Wasserkapazität bzw. verfügbarer Wassergehalt

Die Probenentnahmeorte (Probestellen) entsprechen wiederum den Position in Tabelle 4





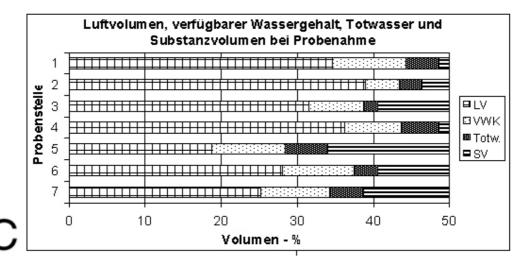


Abb. 133: A Porenraumverteilung und Substanzvolumen, Münster. B Luft (LK)- und nutzbare Feldkapazität (nFK),
Totwassergehalt (totw) und Substanzvolumen (SV), Münster. C Luftvolumen, verfügbarer Wassergehalt,
Totwasser und Substanzvolumen bei Probenahme, Münster.

LK = Luftkapazität, nFK = nutzbare Feldkapazität, Totw = Totwasser, SV = Substanzvolumen, VWK = verfügbare Wasserkapazität bzw. verfügbarer Wassergehalt

5.1.6 Schlussfolgerungen

Die Bodenarten bei den beiden Baumaßnahmen, in Herten und in Münster, unterschieden sich deutlich. In Herten waren es lehmige Sande und in Münster Sande und schluffige Sande. Die Durchwurzelung erfolgte bevorzugt in reinen Sanden. Ansteigende Schluff- und Tongehalte verringerten die Durchwurzelung. An beiden Standorten waren die Füllböden sehr locker. Besonders ausgeprägt war dies im Nahbereich der Rohre. Dadurch wurde besonders der Anteil sehr grober Poren erhöht. Dies führte zu einem starken Wurzelwachstum. Ein möglicher Ansatzpunkt für eine Begrenzung des Wurzelwachstums in Füllböden von Rohrleitungsgräben wäre somit die stärkere Verdichtung der Füllböden in Rohrnähe.

Grundsätzlich sei betont, dass die o.a. Untersuchungen noch keine allgemeingültigen Aussagen erlauben, da lediglich bei zwei Baumaßnahmen weitergehende Bodenuntersuchungen durchgeführt wurden. Diese Untersuchungen können allerdings als erste Erhebung zum Zustand von Rohrleitungsfüllböden unter Straßen bewertet werden.

5.2 Pflanzversuche mit Weiden

Die bei den Aufgrabungen gewonnenen Erkenntnisse lassen darauf schließen, dass die Struktur des Bettungsmaterials einen Einfluss auf die Ausbreitung von Wurzeln haben kann. Zur Überprüfung dieser Hypothese wurden Kulturversuche mit Wurzeln in unterschiedlichen Wuchssubstraten durchgeführt. Bei diesen Versuchen wurde die Reaktion von Wurzeln bei Wachstum an den Grenzen zweier unterschiedlicher Böden untersucht (Kapitel 5.2.1).

Daneben kommen Wurzeln bei Wachstum in Leitungen mehr oder weniger stark mit dem Leitungsinhalt in Kontakt. Grundsätzlich wird angenommen, dass das Wachstum von Wurzeln durch Abwasser angeregt bzw. die Wuchsrichtung der Wurzeln beeinflusst wird. Zur Untersuchung dieser Annahmen wurden Kulturversuche mit Wurzeln in simuliertem Abwasser und im Frischwasser unter reproduzierbaren Bedingungen durchgeführt (Kapitel 5.2.2). Die Wurzeln der kultivierten Pflanzen wurden mikroskopisch auf Schäden und Veränderungen untersucht und mit Hilfe einer Luft- bzw. Sauerstoffquelle im Kulturmedium der Einfluss von Sauerstoff auf die Ausrichtung des Wurzelwachstums beobachtet.

Als Versuchspflanzen wurden in allen Fällen Weiden (*Salix spec.*) verwendet, da sie ein schnellwachsendes und ausdauerndes Wurzelsystem besitzen und problemlos aus Stecklingen herangezogen werden können. Die Stecklinge wurden im Februar 2003 bewurzelt und 8 Wochen in Töpfen kultiviert.

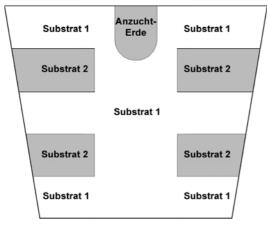
5.2.1 Kulturversuche

Die Porosität eines Substrates kann einen entscheidenden Einfluss auf das Wachstum von Wurzeln haben. Wurzeln müssen die darin auftretenden Poren für ihr Wachstum erschließen. Der Widerstand, den die Wurzeln dabei überwinden müssen, wird von der Größe der Poren im Substrat bestimmt.

Für die Versuche wurde eine künstliche Schichtung von zwei Substraten mit unterschiedlichen Porenräumen in Pflanzgefäßen angelegt. Als Substrat mit hohem Porenanteil und guter Durchwurzelbarkeit wurde Komposterde ausgewählt, die für die Containerkultur im Botanischen Garten der Ruhr-Universität Bochum eingesetzt wird. Die Komposterde ist das Produkt natürlicher Kompostierung von organischem Material. Für die Herstellung von Bodenbereichen mit geringem Porenanteil und geringer Durchwurzelbarkeit wurde Bentonit eingesetzt. Das eingesetzte Material besteht aus Tonmineralien mit einer mittleren Partikelgröße von 0,063 mm. Es hat eine Korndichte von 2,65 g/cm³. Im eingebauten Zustand kann die Dichte zwischen 0,8 g/cm³ (Schüttdichte) und 2,39 g/cm³

(Dichte im Anlieferungszustand) variieren [103]. Die geringe Größe der Partikel hat zur Folge, dass die für das Wachstum von Wurzeln notwendigen Räume (Bodenporen) mit einer Größe ab 100 µm nicht auftreten [104]. In das Material aufgenommenes Wasser kann aufgrund der hohen Saugspannung des Bentonits nicht von den Wurzeln aufgenommen werden. Das Wachstum von Wurzeln in das Bentonit herein ist nahezu ausgeschlossen, so dass Bodenbereiche, die aus Bentonit bestehen, die Ausbreitung begrenzen können.

Es wurden sowohl Pflanzgefäße hergestellt, bei denen die Füllung der zentralen Säule aus Komposterde bestand, als auch solche, bei denen sie mit Bentonit angefüllt wurde (Abb. 134 A). Die Füllung der Säule mit Bentonit hat zur Folge, dass die mit den Pflanzen eingebrachte Anzuchterde von Bentonit umgeben ist.





A

Abb. 134: Schichtung der Wuchssubstrate. **A** Schematischer Längsschnitt durch ein Pflanzgefäß. **B** Verfüllen der verschiedenen Substratschichten.

Die Substrate wurden in horizontalen Schichten wechselweise um eine zentrale Säule aus einem der Substrate eingebracht. Ein Kunststoffrohr mit einem Innendurchmesser von 150 mm wurde senkrecht auf den Boden des Gefäßes gestellt. Der verbleibende Raum wurde in Schichten von 0,05 m Dicke wechselweise mit den zwei Substraten gefüllt (Abb. 134 B). Das Rohr wurden bis zur Oberkante des Bodens im Pflanzgefäß gefüllt und sorgsam nach oben herausgezogen, um die Lage der Bodenschichten möglichst wenig zu verändern.

Ziel der Versuche ist es, den Einfluss von Wuchssubstraten mit verschiedenen Porenräumen und damit unterschiedlicher Durchwurzelbarkeit auf die Ausbreitung darin kultivierter Wurzeln zu untersuchen.

In die Pflanzgefäße werden zum einen Bodenbereiche mit Komposterde und zum anderen Bodenbereiche mit Bentonit eingebaut. Gemäß der Annahme, dass der Porenraum eines Substrates das Wurzelwachstum beeinflusst, sollten sich die Wurzeln der Versuchspflanzen

zum Ende der Versuche nur im Bereich der Erde befinden. Es ist zu erwarten, dass die Bentonit-Bereiche frei von Wurzeln bleiben.

Bei Kontrollversuchen wird eine umgekehrte Abfolge der Substrate eingebaut. Das Vertauschen der Abfolge der Materialien in den Schichten und der Säule hat zur Folge, dass die Wurzeln durch die Bereiche aus Bentonit hindurchwachsen müssen, um Bereiche aus Komposterde zu erreichen (Abb. 134 A). Für die Versuche wurden jeweils fünf Gefäße pro Füllung bepflanzt und für drei Monat im Freiland kultiviert. Alle Gefäße wurden gleichmäßig bewässert. Die fünf Versuchspflanzen in den Versuchsgefäßen sind ohne sichtbare Beschädigung oder Mangel aus der dreimonatigen Kultur hervorgegangen. Sproß, Blätter und Wurzeln machten bei Öffnen der Gefäße äußerlich eine vitalen Eindruck.

Für die Untersuchung der Ausbreitung der Wurzeln im Boden wurden die Pflanzgefäße mit einer Gartenschere längs aufgeschnitten und eine Hälfte des Gefäßes abgenommen. Ein großer Anteil der Wurzeln befindet sich im Bereich der Oberfläche und am Boden des Topfes (Abb. 135). Wie erwartet befanden sich die Wurzeln nur in den Schichten aus Komposterde. In den Schichten aus Bentonit waren keine Wurzeln zu erkennen. Die äußere Oberfläche der Ben-



Abb. 135: Seitlich geöffnetes Pflanzgefäß. In den Schichten aus Bentonit sind keine Wurzeln zu erkennen.

tonitschichten, die mit der Innenseite des Pflanzgefäßes in Kontakt gekommen ist, wirkt abgerissen und zerfurcht. Es ist zu erkennen, dass diese Oberfläche an der Gefäßwand gehaftet hat. Die Feuchtigkeit der Bentonitschichten war im Gegensatz zur Komposterde hoch, das Bentonit war plastisch verformbar und zu Ringen verfestigt.

Bei den Pflanzgefäßen wurde die Hälfte der Füllung bis auf die untere Schicht Komposterde entfernt (Abb. 136). Der Bereich der zentralen Säule, die hier mit Komposterde gefüllt war, ist von Wurzeln der Weide durchwurzelt. Es waren sowohl Wurzeln mit geringem Durchmesser (ca. 1 mm), als auch solche mit einem großen Durchmesser (bis 3 mm) zu erkennen. Ein Teil der Wurzeln, die sich in der unteren Boden-



Abb. 136: Pflanzgefäß nach dreimonatiger Kultur, Füllung zur Hälfte entfernt.

schicht des Gefäßes befinden, ragen am äußeren Rand des Pflanzgefäßes nach oben.

Die Wurzeln im Pflanzgefäß wurden mit Wasser freigespült, um ihre Ausbreitung in zwischen den Bodenschichten erkennen (Abb. 137). Die obere Bodenschicht war stark durchwurzelt, hier treten hauptsächlich feine Wurzeln (bis 1,5 mm Durchmesser auf). Im zentralen Bereich aus Bentonit durchziehen mehrere deutlich verholzte Wurzeln (Durchmesser über 1,5 mm) das Pflanzgefäß in Längsrichtung. Von diesen zweigen auf Höhe der Bentonit-Schichten Seitenwurzeln von nur geringer Länge ab (Pfeil 1). Diese Seitenwurzeln reichen bis an den Rand der Bentonit-Schichten. Die zwischen den horizontalen Schichten aus Bentonit wachsenden Seiten-



Abb. 137: Geöffnetes Pflanzgefäß, Wurzeln mit Wasser freigespült. Die Wurzeln sind nicht in das Bentonit gewachsen.

wurzeln erreichen eine größere Länge. Sie reichen nahezu bis zur Wand des Pflanzgefäßes (Pfeil 2). Die untere Bodenschicht enthält feine und verholzte Wurzeln. Verholzte Wurzeln befinden sich in der unteren Substratschicht direkt am Boden des Pflanzgefäßes.

Eine Betrachtung der unteren Bodenschichten zeigt, dass hier ein Teil der Wurzel entlang der Kontaktfläche von Komposterde und Pflanzgefäß gewachsen ist (Abb. 138). In der unteren Schicht des Gefäßes sind Wurzeln mit einem großen Durchmesser (ca. 3 mm, Pfeile) zu erkennen, die an der Komposterde entlang wachsen, jedoch die Erde nicht durchdringen. Wurzeln mit einem geringen Durchmesser (ca. 1 mm) überziehen die Kontaktfläche der Erde als ein



Abb. 138: Untere Bodenschicht eines Pflanzgefäßes. Eine Hälfte wurde entfernt. Ein großer Teil der Wurzeln ist direkt am Boden des Gefäßes gewachsen.

braunes Geflecht und durchwurzeln sie nur in der unteren Bodenschicht. Am Boden des Gefäßes sind Wurzeln zu erkennen, die direkt nebeneinander parallel gewachsen sind (Abb. 138, unten).

Die untere Bodenschicht des Gefäßes ist stark durchwurzelt (Abb. 139). Die verholzten Wurzeln auf dem Boden des Pflanzgefäßes sind vom Zentrum aus zum Rand gewachsen. Die Wurzeln haben sich entlang der Wände bzw. des Bodens des Gefäßes ausgebreitet. Bei einigen Wurzeln sind die Spitzen bzw. der Bereich 2-3 cm basal davon stark verdickt (Abb. 140). Derartig ausgebildete Wurzelspitzen traten vornehmlich an Stellen auf, an denen die Wur-



Abb. 139: Seitlich geöffnetes Pflanzgefäß von unten.

Am Boden des Pflanzgefäßes sind verholzte

Wurzeln zu erkennen.

zeln bei Wachstum Kontakt mit der Wand oder dem Boden des Gefäßes hatten. In den verdickten Bereich verzweigen die Wurzeln sich nur wenig oder gar nicht.

Die Wurzeln sind entlang der Gefäßwand bzw. des Bodens gewachsen (Abb. 140). Die Wurzel mit stark verdicktem Spitzenbereich ist am Boden des Gefäßes entlang über den Rand gewachsen. Ihr weiteres Wachstum verlief schräg entgegen der Erdschwerkraft entlang der Gefäßwand (Abb. 138 und Abb. 139). Es ist denkbar, dass der als Folge von Trocknungs- und Schrumpfungsprozessen entstehende Raum zwischen der Füllung des Pflanzgefäßes und der Wand, für die Wurzeln einen leicht durchwurzelbaren Bereich bildet.



Abb. 140: Untere Bodenschicht eines Pflanzgefäßes.

Die Wurzeln sind am Rand des
Pflanzcontainers entlang gewachsen.

Um die o.a. Ergebnisse zu überprüfen, wurden sogenannte Kontrollversuche durchgeführt.

Die Versuchspflanzen der Kontrollversuche zeigten bereits in den ersten Wochen der Kultur ein langsameres Wachstum als die der zuvor beschrieben Pflanzen. Im Vergleich war das Wachstum des Sprosses wie auch die Anzahl der Blätter gemindert. Die Blätter waren deutlich schwächer gefärbt. Bei Öffnen der Pflanzgefäße zeigte sich, das der mechanische Halt der Pflanzen durch ihre Wurzeln in der zentralen Säule aus Bentonit nur gering war.



Abb. 141: Versuchspflanze nach dem Kontrollversuch.

Die Pflanze ist verkümmert.

Für die Analyse des Wurzelwachstums in den Pflanzgefäßen war es nötig, komplette Füllung durch Umdrehen und Ausgießen der Gefäße zu entfernen. Der Zusammenhalt der Schichten, die Komposterde bestanden, ist durch Fehlen der verfestigenden Wirkung einer Durchwurzelung nicht erhalten geblieben (Abb. 142). Die Füllung der Gefäße der Kontrollversuche wurde wie beschrieben durch Umkippen entnommen. Nach Entnahme der Füllung aus dem Gefäß wurde deutlich, dass das Wuchssubstrat nicht so durchwurzelt wurde, wie es bei den zuvor be-



Abb. 142: Füllung eines Gefäßes der Kontrollversuche (auf dem Kopf stehend).

schriebenen Versuchspflanzen der Fall war. Die Bereiche der Gefäße, in denen sich Komposterde in Schichten befand, wurden nicht von den Wurzeln erreicht und durchwurzelt.

Die Ausbreitung der Wurzeln blieb in den Bereichen die von Bentonit aus, eingenommen wurden (Abb. 143). Die im Bild untere Bentonitschicht stellte Pflanzgefäß die Oberfläche dar. Die Wurzeln beschränken sich auf den Bodenraum, den die Anzuchterde eingenommen hat, und in der die Weiden vor dem Umpflanzen in die Versuchsgefäße kultiviert worden sind. Im unteren Teil der Pflanzgefäße (im Bild oben) wurden keine Wurzeln festgestellt. Das Wurzelsystem war hier verkümmert und ist andere Teile der nicht in Füllung vorgedrungen. Das Bentonit war feucht, plas-



Abb. 143: Füllung eines Pflanzgefäßes der Kontrollversuche. Die Füllung wurde längs halbiert. Die Bereiche mit Bentonit sind frei von Wurzeln.

tisch verformbar und zu einem wurzelfreien Ring verfestigt.

Bei den Kontrollversuchen waren die Wurzeln der Weide auf einen kleinen Bereich beschränkt (Abb. 144). Die Wurzeln haben lediglich den Raum an der Oberfläche des Pflanzgefäßes eingenommen, in den sie mit einem Ballen Anzuchterde gepflanzt worden sind. Die Anzuchterde ist komplett durchwurzelt, die Wurzeln haben sich nicht in das umgebende Bentonit ausgebreitet. Der aus Bentonit bestehende Bodenraum ist frei von Wurzeln.



Abb. 144: Rest der Anzuchterde nach Durchführung der Kontrollversuche. Die Wurzeln sind nicht in das Bentonit gewachsen. Sie beschränken sich auf den Bereich der Anzuchterde.

5.2.2 Verhalten in simuliertem Abwasser und im Frischwasser

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

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

Wenn die Annahme zutrifft, dass das Wachstum der Wurzel maßgeblich durch die Verfügbarkeit von Luft bzw. von Sauerstoff beeinflusst wird, ist zu erwarten, dass im Bereich einer Sauerstoffquelle erhöhtes Wachstum zu bemerken ist. Die Verfügbarkeit von Sauerstoff im Kulturmedium als Folge der Belüftung mit Pressluft könnte dazu führen, dass die Folgen eines stark Sauerstoff zehrenden Kulturmediums durch die Belüftung abgemildert werden. Im Zuge der Versuche wurde ebenfalls der Einfluss der Belüftung auf die Wurzeln, die in den Schmutzwassermodellen kultiviert wurden, ermittelt. Es ist denkbar, dass Wurzeln mit Belüftung bessere Bedingungen zum Überleben vorfinden, als solche ohne Belüftung.

Im Folgenden werden die typischen Versuchsbedingungen und Wurzelschnitte der eingesetzen Stecklinge dargestellt und bewertet.

Die Wurzeln, die in Wasser gewachsen sind, haben eine helle Färbung und verzweigen sich nur mäßig (Abb. 145). Die Wurzeln treten zahlreich an den Stellen auf, an denen sich Lentizellen befanden. Bei Querschnitten, die den Bereich nahe der Wurzelspitze einer Wurzel wiedergeben, umschließt das Abschlussgewebe das Organ als durchgehende Schicht (Abb. 146). Der Bereich der Rinde besteht aus regelmäßig angeordneten Zellen. Schädigungen durch die Kultur im Wasser ohne Belüftung werden nicht deutlich. Die starke Rotfärbung im Vergleich zu den folgenden Abbildungen kann mit einer zu großen Dauer der Safraninfärbung bei diesem Objekt begründet werden.



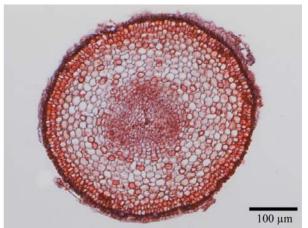


Abb. 145: Wurzeln einer Versuchspflanze, die in Wasser ohne Zufuhr von Luft kultiviert wurden.

Querschnitt einer Wurzel, nach Kultur in Wasser, ohne Luft.

Die Wurzeln, die in Wasser gewachsen sind und belüftet wurden, haben von außen eine dunkle Färbung (Abb. 147). Die Seitenwurzeln wurden bei diesen Pflanzen zahlreicher angelegt als bei denen, die im Wasser ohne Belüftung kultiviert wurden. Im Querschnitt ist zu erkennen, dass die Gewebe und Zellen regelmäßig angeordnet sind (Abb. 148). Abschlussund Leitgewebe sind intakt und vorhanden. Es treten keine nachweisbaren Schädigungen auf.

Abb. 146:

Abb. 148:



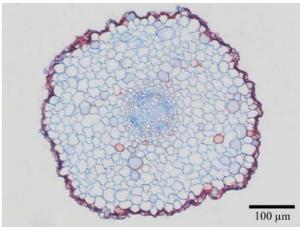


Abb. 147: Wurzeln einer Versuchspflanze, die in Wasser mit Zufuhr von Luft kultiviert wurden.

Querschnitt einer Wurzel, Kultur mit Luft, in Wasser.

Wurzeln, die in Schwemmmist ohne Belüftung gewachsen sind, haben äußerlich eine graue Färbung, die in Abb. 149 besonders bei Wurzeln nahe dem Wasserspiegel zu erkennen ist. Die Wurzeln sind bei dieser Versuchsreihe ebenfalls zahlreich an den Stellen der Lentizellen gewachsen und erhalten geblieben. Bei Querschnitten von Wurzeln, die ohne Belüftung in Schwemmmist kultiviert wurde, haben die Zellen der Rinde teilweise den Kontakt zum Abschlussgewebe verloren (Abb. 150). In der Wurzel befanden sich daher zusammenhängende Hohlräume, die das Organ in Längsrichtung durchzogen haben. Die Struktur der Wurzeln, die in Schwemmmist kultiviert und belüftet wurden, war verändert.



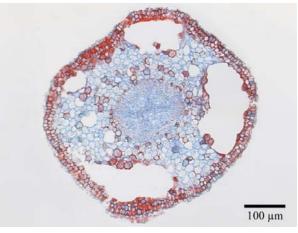


Abb. 149: Wurzeln einer Versuchspflanze, die in Schwemmmist 1:10 verdünnt ohne Zufuhr von Luft kultiviert wurden.

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

Versuchspflanzen, die in einem stark Sauerstoff zehrenden Kulturmedium bei gleichzeitiger Belüftung kultiviert wurden, hatten weniger Wurzeln als solche, die in Wasser kultiviert und belüftet wurden. Die Wurzeln wurden im Rahmen der Versuche nicht ausgezählt. Es war jedoch deutlich erkennbar, dass Pflanzen, die in Wasser kultiviert wurden (Abb. 145, Abb. 147), am Ende der Kultur eine größere Anzahl Wurzeln hatten als solche, die im Schwemmmist gewachsen waren (Abb. 151, Abb. 153). Die Wurzeln waren von außen betrachtet hell und vital, der Querschnitt (Abb. 152) zeigt eine regelmäßige Anordnung von intakten Geweben und Zellen. Sowohl Abschluss- als auch Leitgewebe waren vollständig erhalten, die Wurzeln ließen kein Anzeichen einer Schädigung erkennen. Ein Teil der Wurzeln hatte sich verzweigt.

Abb. 150:



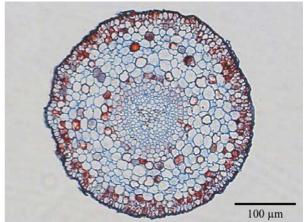


Abb. 151: Wurzeln einer Versuchspflanze, die in Schwemmmist 1:10 verdünnt mit Zufuhr von Luft kultiviert wurden.

Querschnitt einer Wurzel, die in Schwemmmist 1:10 verdünnt mit Zufuhr von Luft kultiviert wurde.

Wurzeln, die in simuliertem Abwasser mit hoher chemischer Verunreinigung kultiviert wurden, zeigen deutlichere Schädigungen als die Wurzeln, der in den anderen Medien kultivierten Pflanzen. Die Wurzeln sind weitgehend unverzweigt. Im Querschnitt ist zu erkennen, dass hier die Zellen unregelmäßiger angeordnet sind (Abb. 154). Diese Wurzel ist im Umfang weniger rund als die, die in den anderen Medien gewachsen sind. Die einzelnen Zellen sind zum Teil kollabiert, ihre Zellwände wirken aufgelöst und waren bei Betrachtung mit dem Mikroskop nur schwer zu fokussieren. Die Zellwände der Wurzeln, die ohne Belüftung im Waschmaschinenabwasser kultiviert wurden, sind nur gering verholzt. Hier treten Wurzeln auf, in deren Querschnitt mit der Safraninfärbung keine verholzten Zellwände angefärbt wurden. Sowohl im Abschlussgewebe als auch in den Leitelementen wird keine Verholzung durch eine Färbung mit Safranin nachgewiesen.

Abb. 152:



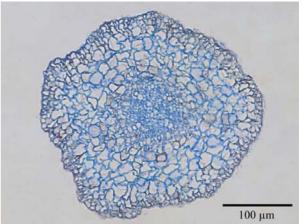


Abb. 153: Wurzeln einer Versuchspflanze, die in Abwasser aus einer privaten Hebeanlage 1:10 verdünnt ohne Zufuhr von Luft kultiviert wurden.

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

Die Pflanzen, die in Waschmaschinenabwasser bei Belüftung kultiviert wurden, haben nur wenige Wurzeln (Abb. 155). Der Aufbau der Gewebe ist regelmäßig. Das Abschlussgewebe umgibt die Wurzel als zusammenhängende Zellschicht. Die Zellen der Rinde haben eine regelmäßige Form, sie sind im Querschnitt annähernd kreisförmig. Die Endodermis ist nicht als zusammenhängender Ring von Zellen zu erkennen. Die zentralen Leitelemente sind im Querschnitt nicht regelmäßig angeordnet. Die Zellen sind gegeneinander verschoben.

Abb. 154:



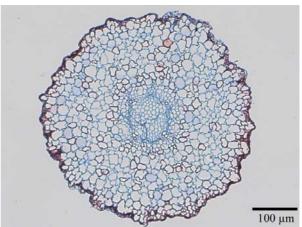


Abb. 155: Wurzeln, die in Abwasser aus einer privaten Hebeanlage 1:10 verdünnt mit Zufuhr von Luft kultiviert wurden.

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

In keinem Fall war erkennbar, dass das Wachstum zur Sauerstoffquelle gerichtet war. Die Wurzeln haben sich in allen Kulturmedien ungerichtet in den Gefäßen ausgebreitet.

Abb. 156:

5.3 Erfassung von Wurzeldrücken

Wurzel können aktiv Hohlräume im Boden erweitern. Die hierfür notwendigen Kräfte bzw. Spannungen entstehen während ihres Dickenwachstums. Um die durch Wurzelwachstum im Boden entstehenden Spannungen bzw. Kräfte zu erfassen, wurden Druckmessungen an Primärwurzeln von Erbsen (*Pisum sativum*) durchgeführt. Die Wurzeln wachsen im Versuch in konisch zulaufenden Aussparungen einer Gipsplatte und können mit fortschreitendem Dickenwachstum Druck gegen eine Druckmessfolie [105] aufbauen (Abb. 157 A). Die entstehenden Spannungen werden dabei zeitlich und über die Angriffsfläche verteilt erfasst. Die entstehenden Spannungen werden mit Hilfe eines Messsystems räumlich aufgelöst und entsprechend dargestellt. Die Messungen finden im Bereich einer Fläche von 84 x 84 mm statt. Die eingesetzte Druckfolie mit einer Dicke von ca. 0,3 mm läßt Messungen bis 24 bar zu. Die Daten werden in einer Matrix von 44x44 Messpunkten aufgenommen und visualisiert.

Die in die kreisförmigen Löcher der Druckplatten eingesetzten Keimlinge von *Pisum sativum* 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. 157 A). Die Wurzeln können durch den engen Kontakt der auf einer Plexisglasplatte liegenden Druckfolie mit der Druckplatte den in der Platte vorhandenen Kanal nicht verlassen. Darüber hinaus wurden die Druckplatten mit Gewichten belastet, damit diese nicht durch die Wurzeln angehoben werden konnten. Die Keimlinge von *Pisum sativum* wurden während der Messungen automatisch bewässert.

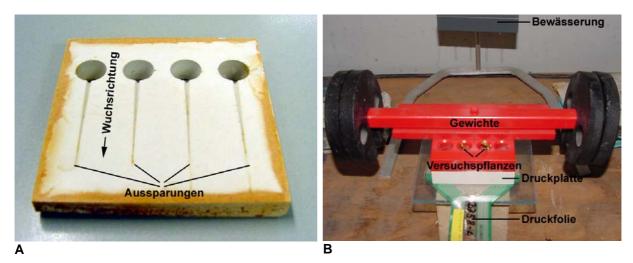


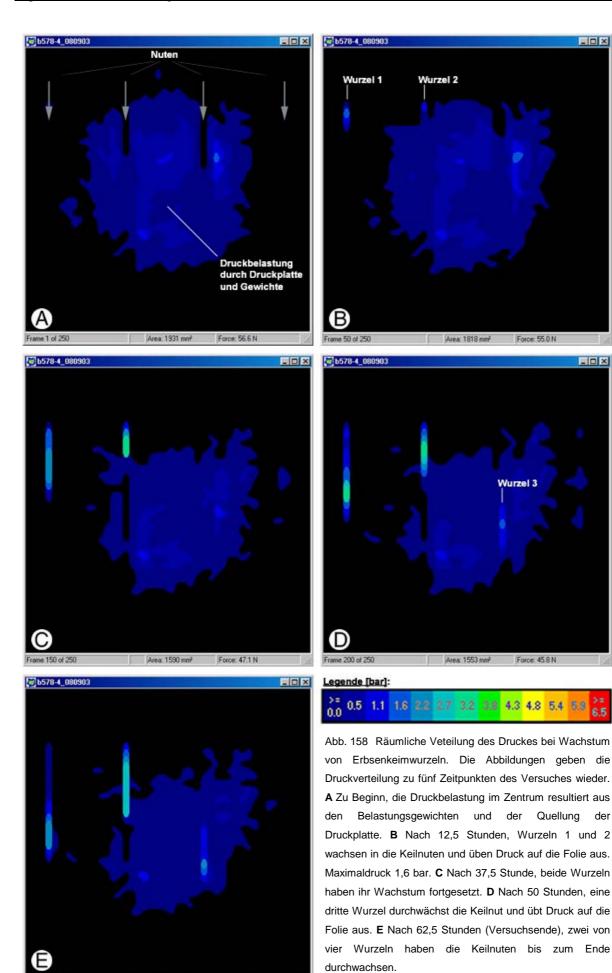
Abb. 157: Versuchsaufbau für Druckmessungen an Wurzeln. A Druckplatte aus Gips. Die braune Färbung wird durch Oxidation der Gussform ausgelöst, die als äußere Begrenzung bei Herstellung der Platten eingesetzt wurde. Sie hat keine Auswirkungen auf den Verlauf der Versuche. B Versuchsaufbau zur Messung des Wurzeldruckes. Es sind zwei Versuchspflanzen erkennbar.

Mit den eingesetzten Messmethoden wird der Druck gemessen, der bei Wachstum von primären Erbsenwurzeln in radialer Richtung erzeugt wird. Abb. 158 zeigt die Druckverteilung zu fünf Zeitpunkten während der Messung. Durch die einheitliche Skalierung ist der zeitliche Druckverlauf unmittelbar erkennbar. Die gemessenen maximalen Druckwerte und deren Verlauf sind in. Abb. 159 wiedergegeben. Der Druck, der zu Beginn der Versuche auf der Druckmessfolie gemessen wurde (Abb. 158 A), resultiert aus der Belastung der Folie durch die Druckplatte und die Gewichte. Die Aussparungen sind als Bereiche mit geringerem Druck zu erkennen. Der maximale Druckwert wurde nach einer Zeit von 48,4 Stunden mit 5,9 Bar gemessen. Der anschließende Druckabfall wird auf ein verändertes Wurzelbild, d.h. eine Zunahme von Feinwurzeln mit in der Summe größerer Druckfläche, zurückgeführt. Grundsätzlich bestätigt dies die Annahme, dass Wurzeln sich unter Druck den Umgebungsbedingungen anpassen (vgl. Kapitel 3.1.1).

Zur Bestätigung der o.a. Versuche bieten sich ergänzende Versuche mit Keimwurzeln verschiedener Baumarten an. Bei diesen ist jedoch ein ähnliches Verhalten zu erwarten, da sich der Aufbau der Primärwurzeln der verschiedenen Baumarten nicht grundsätzlich von den Primärwurzeln der eingesetzten Erbsen unterscheidet (vgl. Kapitel 3.1.1).

-IDX

- D X



Area: 1473 mm² Force: 42.7 N

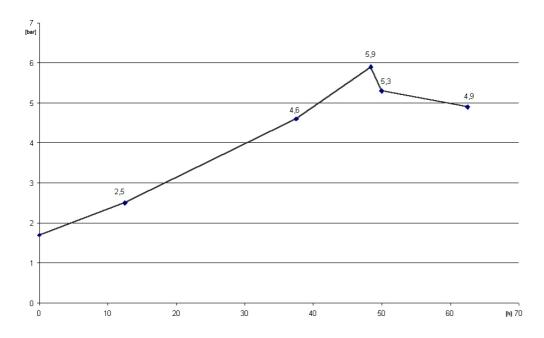


Abb. 159: Maximale Druckwerte im zeitlichen Verlauf.

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

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

Die Ergebnisse der Druckmessungen an Wurzeln bilden eine Grundlage für die Bewertung von Ergebnissen aus Messungen des Anpressdrucks von Dichtmitteln in Rohrverbindungen. Die maximal einwirkenden Wurzeldrücke stellen dabei einen kritischen Schwellenwert dar.

5.4 Analyse von Rohrverbindungen

5.4.1 Vorgehensweise und Versuchsaufbau

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden 11 Rohrverbindungen ausgewählt, um ihren geometrischen Aufbau und die aktivierbaren Anpressdrücke näher zu untersuchen. Die Betrachtung beschränkte sich grundsätzlich auf Rohre, die vorwiegend im Bereich der Grundstücksentwässerung eingesetzt werden (ca. DN 150). Rohre kleiner Nennweite verstopfen bei Wurzeleinwuchs vergleichsweise schnell und stellen daher einen Problemschwerpunkt dar. Darüber hinaus existieren hier zahlreiche unterschiedliche Verbindungssysteme, die mit einem ähnlichen Versuchsaufbau untersucht werden können. In der Regel wurden die Rohrverbindungen aufgeschnitten, um den Verbindungsquerschnitt sichtbar zu machen und so die Funktionsweise beschreiben zu können. Fünf unterschiedliche Rohrverbindungen wurden weitergehend untersucht. Zum einen wurde mit Hilfe drucksensitiver Folien (Druckfolien) die Anpressdruckverteilung der eingebauten Elastomerdichtungen bestimmt. Zum wurden anderen die Anpressflächen Die Ouerschnittbildern ermittelt. betrachteten Rohrverbindungssysteme die durchgeführten Untersuchungen sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

Tabelle 8: Untersuchungen an Rohrverbindungen, Art und Umfang

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

Für die Bestimmung der Anpressdrücke sowie der korrespondierenden Dichtflächen wurden die mit Druckfolien [105] bestückten Rohrverbindungen in einem für Rohrquerschnitte bis ca. DN 150 konzipierten Scherlastversuchsstand untersucht (Abb. 160). Die Position der Druckfolie ist in Abb. 161 A und B dargestellt. Eine in den Scherlastversuchsstand eingebaute Rohrverbindung mit Druckfolie zeigt Abb. 161 C. Die Druckfolien wurden auf dem Spitzende befestigt, in die Muffe eingeschoben, in den Scherlastversuchsstand eingebaut und nehmen ausschnittsweise die im Kreisring wirkende Anpressdruckverteilung zwischen Spitzende und Elastomerdichtung auf. Es können Drücke bis 34,5 bar (500 psi) auf einer Fläche von 82,5 × 306 mm gemessen werden. Die Daten werden in eine Matrix von 34 × 44 Messpunkten umgesetzt. Die einzelnen Zellen der Druckfolie haben jeweils eine Größe von 2,54 x 6,99 mm. Die Anpressflächentiefe wird somit mit einer Auflösung von 2,54 mm gemessen und ergibt sich aus der Summe aller Messzellen, die den messbaren Schwellenwert von 0,1 bar überschreiten. Der an einer Stelle des Rohrumfangs über die Anpressflächentiefe maximal messbare Anpressdruck wird als "maßgeblicher Anpressdruck" definiert, da er von einer einwachsenden Wurzel an dieser Stelle des Rohrumfangs mindestens überwunden werden muss. Als kritische Bereiche des Rohrverbindung sind dann diejenigen Bereiche des Rohrumfangs zu bewerten, an denen der maßgebliche Anpressdruck vergleichsweise gering ist.

Im Versuch wurden auf die Rohrverbindungen stufenweise Scherlasten bis zu den in den jeweiligen Rohrnormen geforderten Scherlasten F_S aufgebracht (vgl. Tabelle 1) und die Messdaten insbesondere hinsichtlich der Anpressdruckverteilung, kritischen Verbindungsbereiche und maßgeblichen Anpressdrücke bzw. Anpressflächentiefen an diesen Stellen ausgewertet.

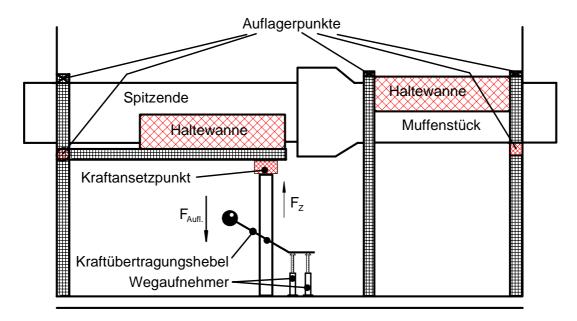


Abb. 160: Versuchstand zur Messung des Anpressdruckes an einer Rohrverbindung. Die Scherlast wird durch Gewichte erzeugt und mittels Hebel auf das Spitzende gelenkt.

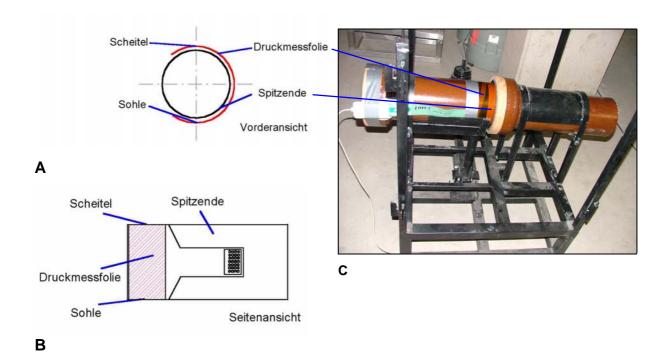


Abb. 161: Messung des Anpressdruckes bei Einwirken einer Scherlast. A Druckfolie auf dem Spitzende einer Rohrverbindung, Querschnitt. B Druckfolie auf dem Spitzende einer Rohrverbindung, Ansicht. C In den Scherlastversuchsstand eingebaute Rohrverbindung.

Im Folgenden sind die Anpressdruck- und Anpressflächenverteilung beispielhaft für eine Rohrverbindung ohne Scherlast (Abb. 162) und mit Scherlast (Abb. 163) dargestellt. Die in Abb. 164 dargestellte Farbskala spiegelt die gemessenen Druckwerte wider.



Abb. 162: Anpressdruckbild einer Rohrverbindung von der Rohrsohle bis zum Rohrscheitel ohne Scherlast.

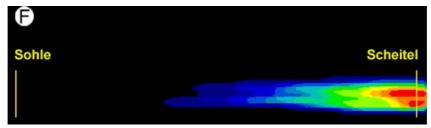


Abb. 163: Anpressdruckbild einer Rohrverbindung von der Rohrsohle bis zum Rohrscheitel unter Scherlast.



Abb. 164: Farbskala zur Darstellung der Anpressdrücke.

Begleitend zu den Druckmessungen wurden zusammengefügte Rohrverbindungen gleicher Bauart längs aufgeschnitten und vermessen, um die Anpressflächentiefen, die mit Hilfe der Druckfolien ermittelt worden sind, auf Plausibilität zu überprüfen. Dabei wurde die Anpressflächentiefe optisch abgeschätzt (Abb. 165) und berücksichtigt, dass es aufgrund der Schnittführung (Kreisringöffnung) auch zu nicht realistischen Verformungsbildern kommen kann. Eine besondere Bedeutung kommt den Schnitten mit Blick auf die möglichen Angriffspunkte von Wurzeln zu. Hierbei sind die Abmessungen und Ausbildung des Ringspaltes, des Ringraumes und des Zwickels von Bedeutung (Abb. 165).

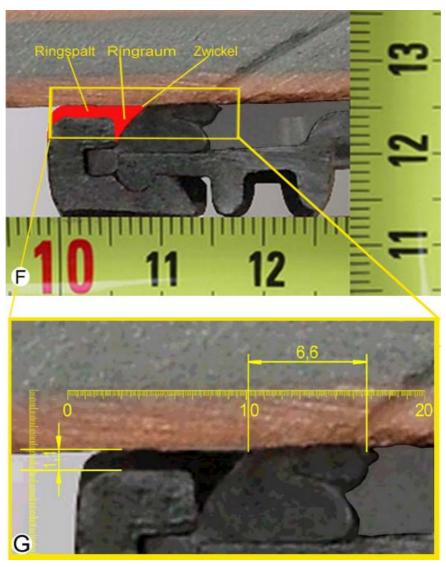


Abb. 165: Bestimmung der Anpressdruckfläche durch optischen Vergleich [mm]. Hier beträgt die Anpressflächentiefe 6,6 mm.

5.4.2 Keramik-/Steinzeugrohre

5.4.2.1 Cerafix, Steckmuffe L, Deutsche Steinzeug GmbH

Das Dichtungssystem der Steckmuffe L der Steinzeug GmbH [106] (vgl. Abb. 166 A und B) besteht aus einer Elastomerdichtung, welche die Form einer Lippe hat und in die ein Metallspannring eingearbeitet ist. Das Dichtelement (Lippendichtung aus Kautschuk-Elastomer) ist mit Vergussmaterial aus Polyestherharz mit der Muffe kraftschlüssig verbunden (vgl. Abb. 166 C). Beim Zusammenfügen der Rohrverbindung klappt die Lippe um und wirkt wie eine Kompressionsdichtung (vgl. Abb. 166 D). Vor der umgeklappten Dichtung verbleibt ein Ringraum von ca. 10 mm Länge und 4 mm Höhe. Die Dichtfläche hat im unbelasteten Zustand eine gemessene Tiefe von ca. 19 mm (vgl. Abb. 166 E).

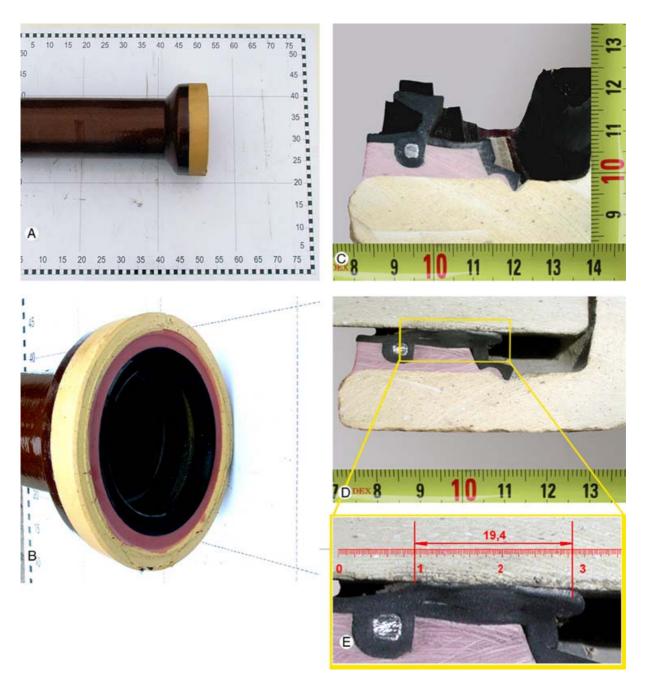


Abb. 166: Steinzeugrohr Cerafix DN 100 mit Steckmuffe L:

A Steinzeugrohr Cerafix DN 100, Ansicht. B Steinzeugrohr Cerafix DN 100, Blick in der Muffe. C Unbelasteter Zustand des Dichtsystems (Lippendichtung und Vergussmaterial). D Rohrverbindung nach dem Zusammenfügen. Die Lippedichtung wirkt jetzt als Kompressionsdichtung. E Detail der Dichtungsanpressfläche. Gemessene Anpressflächentiefe = 19,4 mm (ohne Scherlast).

Die Änderung des Anpressdrucks unter stufenweiser Steigerung der Scherlast auf das Spitzende einer Cerafix-Rohrverbindung DN 100 bis zur Maximallast von 2500 N ist in Abb. 167 A bis F dargestellt. Die Versuche wurden ohne eine Scherwegbegrenzung von 6 mm nach DIN EN 295 [74] durchgeführt. Im unbelasteten Zustand war der maßgebliche Anpressdruck über den Umfang annähernd gleichmäßig. Die Druckwerte liegen zwischen 5,3 und 7,4 bar (vgl. Abb. 167 A). Die durch die Druckfolien ermittelte minimale Anpressflächentiefe beträgt

ca. 12,7 mm. Die stufenweise aufgebrachte Scherlast führt zu einer Entlastung der Rohrverbindung im Bereich der Rohrsohle sowie zu einer stufenweisen Belastung im Bereich des Scheitels. Bei Erreichen der maximalen Scherlast wurde in der Rohrsohle ein maßgeblicher Anpressdruck von 3,3 bar gemessen (vgl. Abb. 167 E). Die Anpressflächentiefe in der entlasteten Rohrsohle verringerte sich auf 10,2 mm. Der Anpressdruck im Rohrscheitel erreichte einen Maximalwert von über 18,5 bar (vgl. Abb. 167 E). Bei Einwirken der maximalen Scherlast über eine Zeitdauer von 1,5 Stunden waren keine nennenswerten Änderungen der Anpressdruckverteilung zu erkennen (vgl. Abb. 167 F).

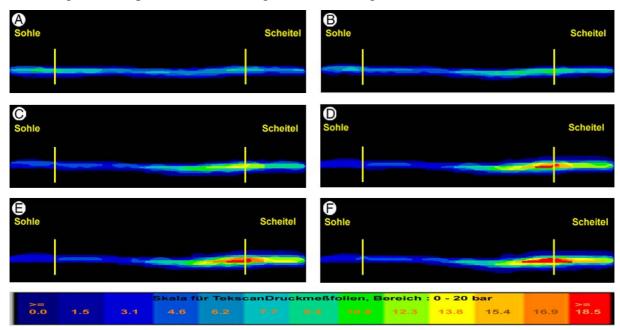


Abb. 167: Messung des Anpressdrucks und der Anpressfläche mittels einer Druckfolie [105]. A Ohne Auflast: Maßgeblicher Anpressdruck von mindestens 5,3 bar. B Laststufe 1: Scherlast in Höhe von 768 N. Maßgeblicher Anpressdruck von 4,3 bar in der Rohrsohle. C Laststufe 2: Scherlast in Höhe von 1539 N. Maßgeblicher Anpressdruck von 3,8 bar in der Rohrsohle. D Laststufe 3: Scherlast in Höhe von 2313 N. Maßgeblicher Anpressdruck von 3,8 bar in der Rohrsohle. E Laststufe 4: Scherlast in Höhe von 2500 N. Maßgeblicher Anpressdruck von 3,3 bar in der Rohrsohle. F Laststufe 4 wird über einen Zeitraum von 1,5 Stunden konstant gehalten. Es treten keine signifikanten Änderungen auf.

5.4.2.2 Eurotrad, Steckmuffe L, Euroceramic GmbH

Bei der Rohrverbindung handelt es sich um eine Steckmuffe L nach DIN EN 295 [74] bestehend aus Spitzende, Muffe und einer Elastomerdichtung (vgl. Abb. 168 A und B). Die Elastomerdichtung wird über einen, in das Elastomer integrierten Spannring in einer Sicke gegen Verschiebung gesichert (vgl. Abb. 168 C). Im unbelasteten Zustand (vgl. Abb. 168 C) erscheint das Elastomerprofil als Lippendichtung. Beim Zusammenfügen des Rohres klappt das Profil um und wirkt ähnlich einer Kompressionsdichtung (vgl. Abb. 168 D).



Abb. 168: Rohrverbindung Eurotrad: A Längsansicht des Rohres. B Ansicht des fest eingebauten Dichtmittels. C Längsschnitt durch die unbelastete Rohrverbindung. D Längsschnitt durch die belastete Rohrverbindung. E Maße der Anpressfläche des Dichtmittels.

Die Änderung des Anpressdrucks für die Rohrverbindung unter steigender Scherlast ist in Abb. 169 A bis F dargestellt. Die Versuche wurden ohne eine Scherwegbegrenzung von 6 mm nach DIN EN 295 [74] durchgeführt. Nach dem Zusammenfügen der Rohrverbindung wurde in der unbelasteten Rohrverbindung über den gesamten Rohrumfang ein maßgeblicher Anpressdruck in Höhe von ca. 0,8 bar gemessen (vgl. Abb. 169 A). Die Anpressflächentiefe beträgt ca. 2,54 mm. Bereits nach dem Aufbringen der ersten Scherlaststufe in Höhe von 768 N konnte an der entlasteten Rohrsohle kein Anpressdruck größer 0,1 bar mehr gemessen werden. Bei weiterer Belastung bis zur maximalen Scherlast von 3750 N (vgl. Abb. 169 B bis E) vergrößert sich der Bereich ohne messbaren Anpressdruck deutlich. Bei Einwirken der maximalen Scherlast über eine Zeitdauer von 1,5 Stunden waren keine nennenswerten Änderungen der Anpressdruckverteilung zu erkennen (vgl. Abb. 169 F).

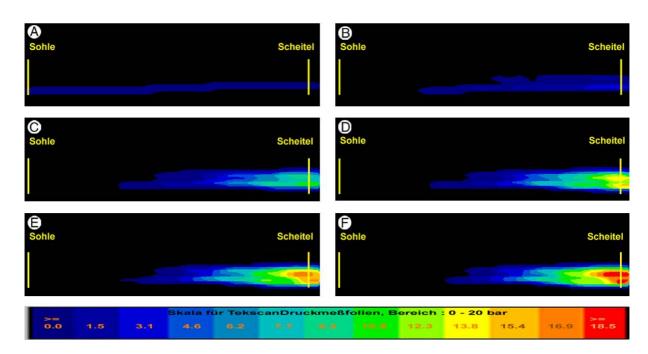


Abb. 169: Messung des Anpressdrucks und der Anpressfläche mittels einer Druckfolie [105]. A Ohne Auflast: Gleichmäßiger Anpressdruck in Höhe von 0,8 bar in der Rohrverbindung. B Laststufe 1: Scherlast in Höhe von 768 N. Kein Anpressdruck in der Rohrsohle. C Laststufe 2: Scherlast in Höhe von 1539 N. Kein Anpressdruck in der Rohrsohle. D Laststufe 3: Scherlast in Höhe von 2313 N. Kein Anpressdruck in der Rohrsohle. E Laststufe 4: Scherlast in Höhe von 3750 N. Kein Anpressdruck in der Rohrsohle. F Laststufe 4 wird über einen Zeitraum von 1,5 Stunden konstant gehalten. Keine signifikanten Änderungen.

5.4.2.3 Eurotop, Überschiebkupplung, Euroceramic GmbH

Bei dieser Rohrverbindung handelt es sich um Überschiebkupplungen (vgl. Abb. 170 B und D) für muffenlose Rohre aus unglasiertem Steinzeug (vgl. Abb. 170 A und C). Als Dichtung wird eine Lippendichtung verwendet, die durch einen Klemmring in ihrer Lage in der Überschiebkupplung gehalten wird (vgl. Abb. 170 E). Beim Zusammenfügen wird die Lippe abgewinkelt und dichtet den Querschnitt ab (vgl. Abb. 170 F). Die Dichtfläche im unbelasteten Zustand hat eine gemessene Tiefe von 6,6 mm. Der Ringspalt hat eine Länge von 9 mm und ein Höhe von 1,1 mm. Er wird ergänzt um einen 1,9 mm hohen und 3 mm breiten dreieckförmigen Ringraum (vgl. Abb. 170 G).



Abb. 170: Rohrverbindung Eurotop mit Überschiebkupplung, Euroceramic

A Unglasiertes muffenloses Rohr DN 150, Draufsicht. B Überschiebkupplung, Draufsicht. C Unglasiertes muffenloses Rohr DN 150, Ansicht. D Überschiebkupplung, Ansicht. E Unbelasteter Zustand des Dichtsystems eines Euroceramikrohres DN 150, Eurotop, Überschiebmuffe mit Dichtung aus SBR. F Zusammengefügtes Eurotoprohr, Detail. G Detail der Dichtungsanpressfläche. Gemessene Anpresstiefe = 6,6 mm (ohne Scherlast).

Im unbelasteten Zustand variiert der maßgebliche Anpressdruck über den Umfang zwischen 2,8 und 4,3 bar. Die Scherlasten wurden in einem ersten Versuch ohne Auflagerung der Überschiebkupplung aufgebracht. Die Änderung der Anpressdruckverteilung unter stufenweiser Erhöhung der Scherlast ist in Abb. 171 A bis E dargestellt. Die Form des Druckbildes verändert sich während der Laststeigerung, weil sich die Überschiebkupplung am Spitzende abwinkelt. Aufgrund dieser geometrisch nichtlinearen Verschiebungen, wurde die Anpressdruckverteilung abschließend im scherlastfreien Zustand nach einer Belastungszeit

von 1,5 Stunden ermittelt (Abb. 171 F). Die Nichtlinearität wird auch dadurch deutlich, dass eine Verringerung des Anpressdrucks unter Scherlast im Sohlenbereich nur nach Aufbringen der ersten Scherlaststufe festgestellt werden konnte (vgl. Abb. 171 B). Der maßgebliche Anpressdruck fällt hier auf einen Wert von 1,7 bar ab. Bei weiterer Laststeigerung steigt dieser Wert jedoch wieder an, da es durch die beginnende Abwinkelung zu einer untypisch starken Kompression der Dichtung kommt.

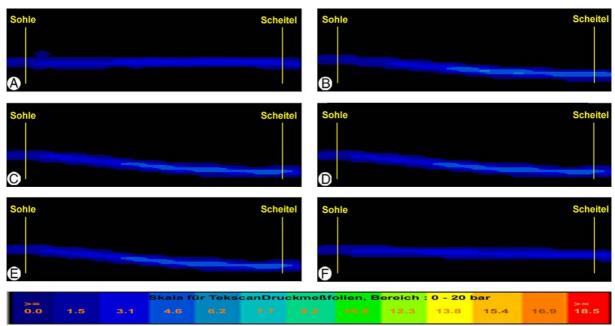


Abb. 171: Messung des Anpressdrucks und der Anpressfläche mittels einer Druckfolie [105]. Rohrverbindung Eurotop mit Überschiebkupplung, Euroceramic, Scherlasten ohne Muffenunterstützung. A Keine Scherlast, maßgeblicher Anpressdruck in Höhe von 2,8 bar in der Sohle. B Laststufe 1: Scherlast von 768 N. Maßgeblicher Anpressdruck von min 1,7 bar in der Rohrsohle. C Laststufe 2: Scherlast in Höhe von 1539 N. Maßgeblicher Anpressdruck von min 2,4 bar in der Rohrsohle. D Laststufe 3: Scherlast in Höhe von 2313 N. Maßgeblicher Anpressdruck von min 2,8 bar in der Rohrsohle. E Laststufe 4: Scherlast in Höhe von 3750 N. Maßgeblicher Anpressdruck von min 2,8 bar in der Rohrsohle. F Laststufe 4 wird über einen Zeitraum von 1,5 Stunden konstant gehalten. Es sind keine signifikanten Änderungen zu erkennen.

Anschließend wurde dieselbe Eurotop-Rohrverbindung erneut eingebaut und der Scherweg durch Auflagerung der Überschiebkupplung auf 6 mm begrenzt. Abb. 172 zeigt die gemessenen Anpressdruckverteilung für die einzelnen Scherlaststufen. Auffallend ist die Abweichung der Druckverteilung im Vergleich zum ersten Versuch schon im unbelasteten Zustand (vgl. Abb. 171 A und Abb. 172 A). Der maßgebliche Anpressdruck beträgt in der Rohrsohle 0,9 bar. Beim Aufbringen der Scherlasten ist eine Verringerung des maßgeblichen Anpressdrucks in der Rohrsohle auf ca. 0,5 bar festzustellen (vgl. Abb. 172 B bis E). Die Dauerbelastung über 1,5 Stunden zeigte keine messbaren Auswirkungen auf die Anpressdruckverteilung (vgl. Abb. 172 F).

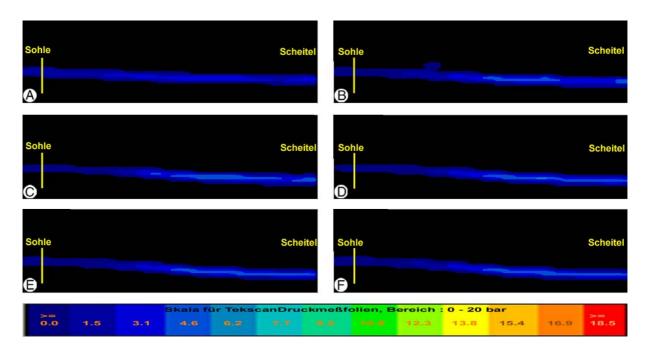


Abb. 172: Messung des Anpressdrucks und der Anpressfläche mittels einer Druckfolie [105]. Rohrverbindung Eurotop mit Überschiebkupplung, Euroceramic, Scherlasten mit 6 mm Scherwegbegrenzung. A Keine Scherlast, Maßgeblicher Anpressdruck in Höhe von 1,5 bar in der Sohle. B Laststufe 1: Scherlast von 768 N. Maßgeblicher Anpressdruck von 0,8 bar in der Rohrsohle. C Laststufe 2: Scherlast in Höhe von 1539 N. Maßgeblicher Anpressdruck von 0,8 bar in der Rohrsohle. D Laststufe 3: Scherlast in Höhe von 2313 N. Maßgeblicher Anpressdruck von 0,8 bar in der Rohrsohle. E Laststufe 4: Scherlast in Höhe von 3750 N. Maßgeblicher Anpressdruck von 0,8 bar in der Rohrsohle. F Laststufe 4 wird über einen Zeitraum von 1,5 Stunden konstant gehalten. Es sind keine signifikanten Änderungen zu erkennen.

5.4.2.4 BENOR, Steckmuffe L

Bei dieser Rohrverbindung handelt es sich um eine Steckmuffe L der DIN EN 295 [74]. Die im unbelasteten Zustand als Lippendichtung ausgebildete Elastomerdichtung wird bei dieser Ausführung der Steckmuffe L an die Muffe angeklebt (vgl. Abb. 173 A). Während des Zusammenfügens der Rohrverbindung (vgl. Abb. 173 B) wird die senkrecht stehende Lippe umgeklappt und wirkt zusammen mit dem waagerecht abstehenden Teil der Elastomerdichtung (vgl. Abb. 173 A) ähnlich einer Kompressionsdichtung. Der in Abb. 173 B zu erkennende Raum an der Außenseite der Elastomerdichtung ist ca. 12 mm lang und 4 mm hoch. Der Raum vor dem Dichtelement (Ringraum) zwischen Spitzende und Muffe ist 6 mm hoch. Der Zwickel zwischen Dichtelement und Muffe, in Abb. 173 B rechts zu erkennen, ist stark ausgeprägt und läuft spitz zu.

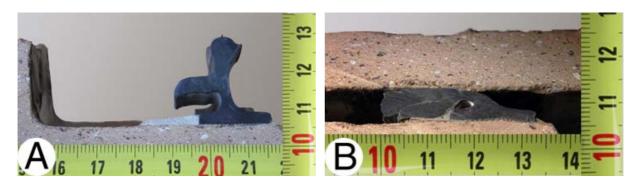


Abb. 173: Längsschnitt durch das Dichtsystems eines Steinzeugrohres DN 150, Hersteller BENOR, Steckmuffe L..

A Unbelasteter Zustand. B Eingebauter Zustand.

5.4.3 Rohre aus PVC

5.4.3.1 KG-Rohr, Lippendichtung, Pipelife Deutschland GmbH & Co. KG

Bei dieser Rohrverbindung handelt es sich um eine Steckverbindung bestehend aus Spitzende und Muffe (vgl. Abb. 174 A und B). Das Dichtmittel, eine Elastomerlippendichtung, wird in eine Sicke eingelegt und dadurch gegen Verrutschen gesichert (vgl. Abb. 174 C). Beim Zusammenfügen der Rohre wird die Lippe abgewinkelt und dichtet die Verbindung ab. Der Ringspalt zwischen Spitzende und Muffe hat eine Größe von 1 mm (Abb. 174 D). Der Ringraum vor der Dichtung ist 8 mm breit und 3 mm hoch. Ein Zwickel ist vorhanden. Die gemessene Tiefe der Anpressfläche beträgt ca. 7 mm (vgl. Abb. 174 E).

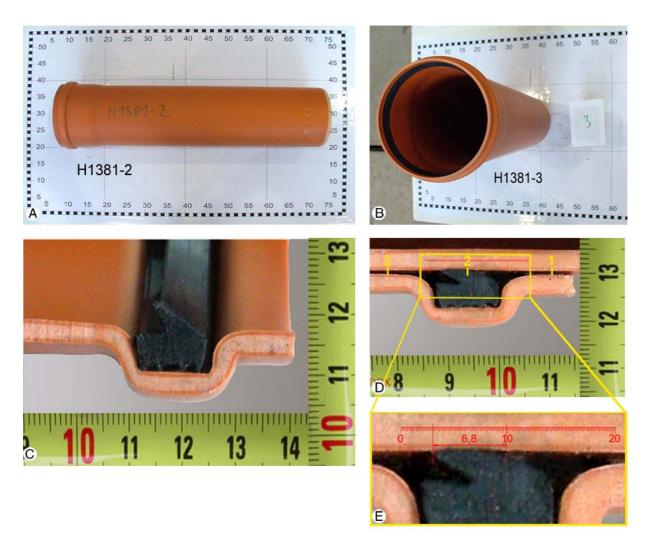


Abb. 174: PVC Rohrverbindung Typ KG-Roht DN 160, Pipelife GmbH & Co. KG:

A KG-Rohr, Draufsicht. B KG-Rohr, Ansicht. C Detaildarstellung der Elastomerdichtung in der Sicke.

D Detaildarstellung der zusammengefügten Rohrverbindung mit Druckübertragungszonen (1,2,3). E Detail der Dichtungsanpressfläche. Gemessene Anpressflächentiefe = 6,8 mm (ohne Scherlast).

Infolge der geringen Spaltmaße zwischen Spitzende und Muffe ergeben sich die in Abb. 175 dargestellten Druckbilder. Neben dem Anpressdruck des Dichtmittels selbst, in Abb. 175 A bis D mit einer 2 gekennzeichnet, ist auch eine direkte Druckübertragung zwischen der Rohroberfläche des Spitzendes und dem Muffenende zu erkennen (in Abb. 175 A bis D jeweils mit einer 1 bzw. 3 gekennzeichnet). Eine Änderung der Anpressdruckverteilung wurde im Dichtelement unter Scherlast kaum festgestellt. Offensichtlich werde die Scherlasten direkt im vorliegenden Fall über die Druckübertragungszone 3 vom Spitzende auf die Muffe übertragen. Dabei kommt es auch zu Druckkonzentrationen im Kämpfer, die möglicherweise auf eine Ovalisierung des Rohrquerschnittes zurückzuführen sind. Im scherlastfreien Zustand konnte ein maßgeblicher Anpressdruck in Höhe von 1,9 bar ermittelt werden. Unter Scherlast sinkt dieser Wert auf 1,3 bar ab. In allen Laststufen ergibt sich eine Dichtflächentiefe von 10,2

mm. Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass offen bleibt, inwieweit die beobachtete Form der Druckübertragung in der Praxis üblich ist.

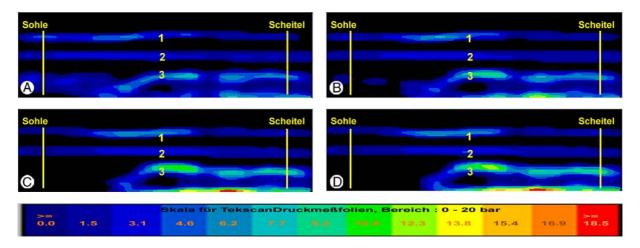


Abb. 175: Messung des Anpressdrucks und der Anpressfläche mittels einer Druckfolie. Rohrverbindung KG-Rohr, Pipelife GmbH & Co. KG. A Ohne Auflast: Maßgeblicher Anpressdruck in Höhe von mindestens 1,5 bar. B Laststufe 1: Scherlast von 768 N. Maßgeblicher Anpressdruck von 1,5 bar in der Rohrsohle. C Laststufe 2: Scherlast in Höhe von 1539 N. Maßgeblicher Anpressdruck von 1,5 bar in der Rohrsohle. D Laststufe 4 wird über einen Zeitraum von 1,5 Stunden konstant gehalten. Es sind keine signifikanten Änderungen zu erkennen.

5.4.3.2 ConneX®-Dichtsystem, Funke Kunststoffe GmbH

Das CI-Dichtungssystem wird als Verbindungssystem für Connex®-Kanalrohre eingesetzt. Das Dichtelement besteht aus zwei Komponenten, einem Elastomer, in Abb. 176 A und B schwarz dargestellt, das die Rohrverbindung nach dem Zusammenfügen abdichtet, und einem Spannring, in Abb. 176 A und B gelb dargestellt. Beide Komponenten bilden eine Einheit. Im unbelasteten Zustand gleicht der elastomere Teil des Dichtsystems einer Lippendichtung (vgl. Abb. 176 A). Im belasteten Zustand wird die Lippe gegen den gelben Spannring gepresst und komprimiert. Der Ringraum ist ca. 20 mm lang und bis zu 3 mm hoch (vgl. Abb. 176 B). Der davor liegende Ringspalt ist ca. 2 mm hoch. Der Zwickel an der Elastomerdichtung läuft spitz zu.

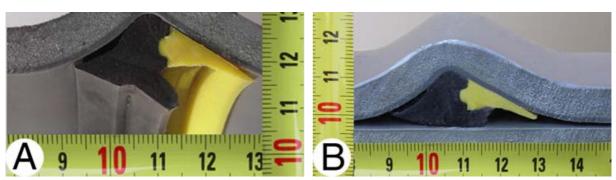


Abb. 176: Längsschnitt eines PVC- U ConneX[®] Kanalrohres DN 300: A Unbelasteter Zustand. B Eingebauter Zustand.

5.4.4 Tyton®-Verbindung, Saint-Gobain Gussrohr GmbH

Bei dieser Rohrverbindung handelt es sich um eine Steckverbindung (vgl. Abb. 177 A und C), bei der die Abdichtung durch einen besonders profilierten Dichtring erreicht wird. Dieser besteht aus einer härteren und einer weicheren Gummimischung. Der härtere Teil wird in eine Sicke in der Rohrmuffe eingelegt und dient als Verschiebesicherung. Die weichere Gummimischung dichtet das Rohr zwischen Spitzende und Muffe ab (vgl. Abb. 22 und Abb. 23 bzw. Abb. 177 B). Diese Rohrverbindung wurde nicht aufgeschnitten und vermessen. Aufgrund der im technischen Regelwerk angegebenen Maßtoleranzen kann mit einem ca. 2 mm hohen Ringraum gerechnet werden (vgl. [87]).

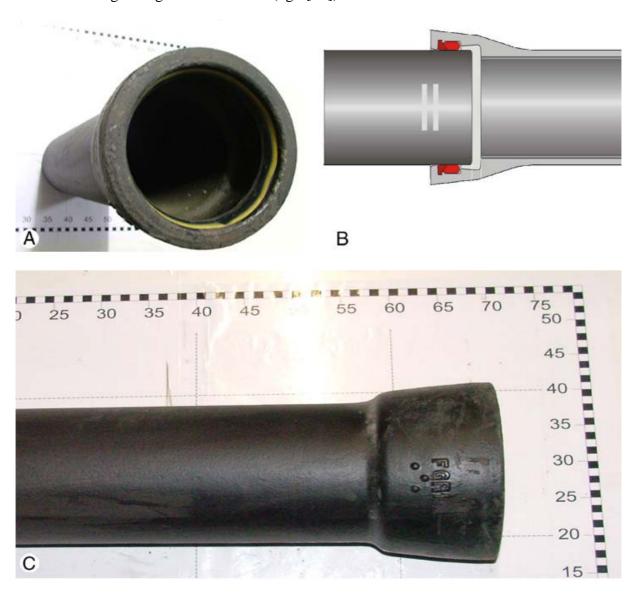


Abb. 177 Rohrverbindung Tyton für duktile Gussrohre

A Tyton-Muffe, Ansicht. B Schnittbild der Rohrverbindung C Tyton-Muffe, Draufsicht.

Im scherlastfreien Zustand wurde ein maßgeblicher Anpressdruck zwischen 6,6 und 13,5 bar in der Rohrverbindung gemessen (vgl. Abb. 178 A). Die Tiefe der korrespondierenden

Anpressfläche beträgt 27,9 mm. Bei Steigerung der Scherbelastung bis 4500 N nimmt der maßgebliche Anpressdruck in der Rohrsohle auf 2,6 bar ab. Die Dichtfläche hat dabei eine Tiefe von 15,2 mm (vgl. Abb. 178 B bis E). Die Dauerbelastung über 1,5 Stunden zeigte nur unwesentliche Auswirkungen auf die Anpressdruckverteilung (vgl. Abb. 178 F).

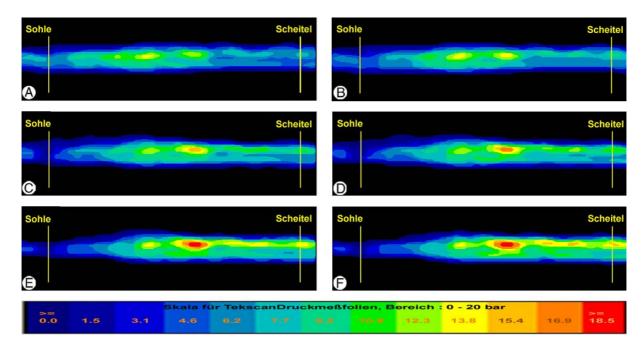


Abb. 178 Messung des Anpressdrucks und der Anpressfläche mittels einer Druckfolie [105]. Rohrverbindung Tyton DN 150. A Ohne Auflast: Maßgeblicher Anpressdruck in Höhe von mindestens 6,6 bar. B Laststufe 1: Scherlast von 971 N. Maßgeblicher Anpressdruck von 5,5 bar in der Rohrsohle. C Laststufe 2: Scherlast in Höhe von 1942 N. Maßgeblicher Anpressdruck von 3,1 bar in der Rohrsohle. D Laststufe 3: Scherlast in Höhe von 2914 N. Maßgeblicher Anpressdruck von 3,1 bar in der Rohrsohle. E Laststufe 4: Scherlast in Höhe von 4500 N. Maßgeblicher Anpressdruck von 2,6 bar in der Rohrsohle. F Laststufe 4 wird über einen Zeitraum von 1,5 Stunden konstant gehalten. Keine signifikanten Änderungen zu E.

5.4.5 GFK-FWC-Kupplung, Hobas Rohre GmbH

Bei der FWC-Kupplung handelt es sich um eine Überschiebkupplung für muffenlose Rohre aus GFK. Die Überschiebkupplung besteht aus einem elastomeren Dichtelement. Die Dichtwirkung zum Spitzende wird über jeweils eine Lippendichtung sichergestellt. Auf der Außenseite des elastomeren Dichtelementes befinden sich sogenannte Schwalbenschwänze. Diese sorgen für die Verankerung des Dichelementes in der GFK- Kupplung. In Abb. 179 A ist die Überschiebkupplung im unbelasteten Zustand, in Abb. 179 B im belasteten Zustand dargestellt. Der Raum vor der Dichtfläche ist 10 mm lang und 1 mm hoch.





Abb. 179: Längsschnitt der Rohrverbindung eines HOBAS-GFK-Rohres, DN 300, FWC-Kupplung: A Unbelasteter Zustand. **B** Eingebauter Zustand.

5.4.6 Rohre aus Polyethylen

5.4.6.1 Rehau Awadukt PE-System

Bei dieser Rohrverbindung handelt es sich um eine profilierte Elastomerlippendichtung (vgl. Abb. 180 A), die verschiebesicher in eine Sicke eingelegt wird. Im belasteten Zustand (vgl. Abb. 180 B) wird die Lippe gegen den in der Sicke befindlichen Teil der Elastomerdichtung gepresst. Der Ringraum vor der Dichtfläche ist 4 mm lang und 3 mm hoch. Der Ringspalt hat eine Höhe von 1 mm. Der Zwickel an der Elastomerdichtung läuft spitz zu.

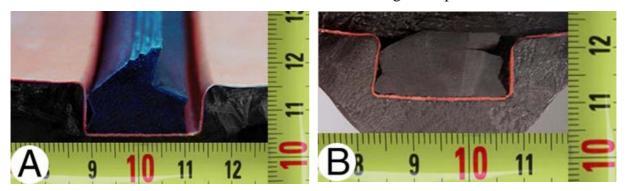


Abb. 180: Längsschnitt durch die Rohrverbindung eines Rehau-Awadukt-PE-Rohres: **A** Unbelasteter Zustand. **B** Eingebauter Zustand.

5.4.6.2 Friatec-Schweißverbindung

Bei dieser Art der Rohrverbindung handelt es sich um eine Überschiebkupplung, die mit den Spitzenden von Rohren aus PE mittels Heizwendelschweißen verbunden wird [107]. Ein Schnitt durch die Heizwendel einer geschweißten Rohrverbindung ist in Abb. 181 dargestellt. Die Verbindung hat einen 2 mm großen Ringspalt.

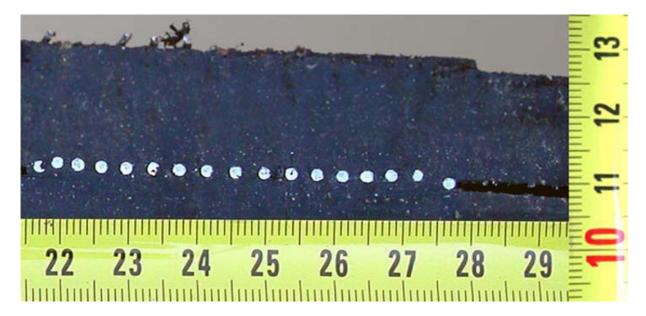


Abb. 181: Detail einer geschweißten Verbindung eines PEHD-Rohres mit Überschiebkupplung der Fa. Friatec.

5.4.7 Dreikammerdichtung, Betonrohre

Bei dieser Rohrverbindung handelt es sich um eine Kompressionsdichtung. Das Dichtelement verfügt über drei Luftkammern sowie über eine profilierte Dichtfläche (vgl. Abb. 182 A). Das Dichtprofil ist an zwei Stellen durch Schwalbenschwanzprofile im Beton verankert. Der Belastungszustand ist in Abb. 182 B dargestellt. Beim Zusammenfügen werden die Lufkammern des Dichtprofils komprimiert. Der Ringraum vor der Dichtfläche ist 10 mm lang und 5 mm hoch. Es besteht kein Ringspalt. Der Zwickelbereich läuft spitz zu.

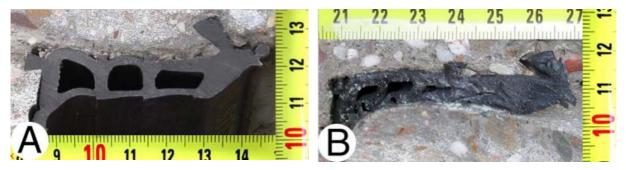


Abb. 182: Längsschnitt eines Betonrohres mit Dreikammerdichtung: A Unbelasteter Zustand. B Eingebauter Zustand.

6 Wurzelfestigkeit

Die Erfassung der Wurzelfestigkeit gewinnt eine besondere Bedeutung bei der Bewertung bestehender Verbindungssysteme, der Optimierung von Bauteilentwicklungen sowie der Auswahl und Entwicklung geeigneter Sanierungssysteme. Im Folgenden wird ein möglicher Ansatz zur Beschreibung des Phänomens Wurzelfestigkeit mit Blick auf die in Kapitel 5.4 dargestellten Verbindungssysteme beschrieben.

6.1 Einflüsse auf die Wurzelfestigkeit

Die Wuchsrichtung von Wurzeln und die Ausbildung des gesamten Wurzelwerks (Wurzeldicke, Anzahl der Feinwurzeln etc.) wird von unterschiedlichen Faktoren beeinflusst, wie z.B. Bodenarten, Verdichtungsunterschiede und Sauerstoffangebot. Diese Faktoren können sich im Umfeld von Rohren und deren Verbindungen zeitlich und räumlich verändern. Der Wachstumsprozess selbst ist wiederum in drei Phasen zu unterteilen, dem Heranwachsen an die Rohrverbindung, dem Eindringen in die Verbindung und dem Durchdringen des Dichtungsbereichs. Entsprechend kann dem Wurzeleinwuchs an der Rohrverbindung entgegengewirkt werden, indem bereits das Eindringen der Wurzel in den Verbindungsbereich verhindert wird, der Anpressdruck der Dichtung über dem zu erwartenden Wurzeldruck liegt und/oder die Geometrie der Dichtung einen Angriff der Wurzeln erschwert (vgl. Abb. 183).

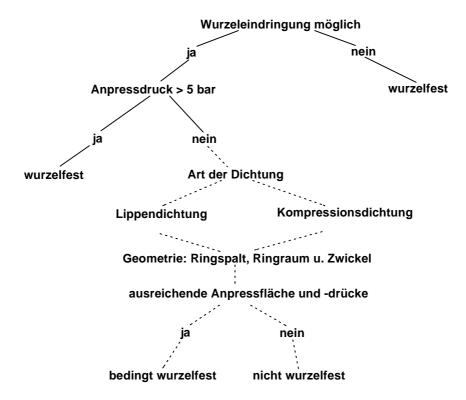


Abb. 183:

Die in Kapitel 3.4 beschriebenen Verfahren zur Prüfung der Wurzelfestigkeit von Bauteilen können in zwei Methodengruppen unterschieden werden: die Beurteilung mechanischer Eigenschaften mit Blick auf die Widerstandsfähigkeit gegenüber Wurzeldruck und die Berücksichtigung der Rohr-Wurzel-Interaktion durch Simulation von Einwuchsvorgängen unter Einbeziehung natürlicher Pflanzen (vgl. 3.4.2 und 3.4.7). Im Falle rein mechanischer Prüfungen werden z.T. auch stark vereinfachende Annahmen herangezogen, wie z.B. bei der Prüfung nach DIN 4060, die eine Gleichwertigkeit zwischen der Wasserdichtheit unter Scherlast und der Wurzelfestigkeit von Rohrverbindungen unterstellt. Interpretationsschwierigkeiten ergeben sich allerdings, wenn eine Kombination beider Methodengruppen angestrebt wird. In dem in Kapitel 3.4.5 dargestellten Fall wurden Bäume über Abwasserleitungen gepflanzt und nach dem Einwuchs der Anpressdruck der Elastomerdichtung an der Schadstelle gemessen. Zwar traten Einwuchsfälle deutlich häufiger in Verbindungen auf, die einen geringen Anpressdruck aufwiesen, allerdings wurde bei Absenkung des Anpressdruckes nicht zwangsläufig ein Wurzeleinwuchs beobachtet. Neben geringen Eindringwiderständen unmittelbar an der Dichtung liegen offensichtlich weitere Reize oder Hindernisse vor, die die Wahrscheinlichkeit für einen Wurzeleinwuchs beeinflussen. Die vorgestellten Baustellenuntersuchungen und Laborversuche unterstreichen hier insbesondere den Einfluss der Rohrumgebung, d.h. der Eigenschaften des umgebenden Bettungsmaterials.

6.2 Bewertung von Rohrverbindungen

Auf Grundlage der Ergebnisse des Forschungsvorhabens sind drei wesentliche Eigenschaften von Rohrverbindungen zur Bewertung ihrer Wurzelfestigkeit zu unterscheiden:

I. Gegendruck:

Das am häufigsten diskutierte Mittel zur Verhinderung von Wurzeleinwüchsen ist der Einsatz mechanisch wirkender Dichtmittel, die eine hohe statische Sicherheit gegen äußere Druckbelastung bieten. Ein Nachweis gegenüber solchen Drücken ist zum einen durch direkte Belastung der Rohrverbindung durch ein von außen wirkendes Medium möglich oder durch Nachweis einer Vorspannung an der kritischen Angriffsstelle, die durch die zu erwartende Druckbelastung nicht überwunden werden kann. Im vorliegenden Fall bieten sich Außenwasserdruckprüfungen mit Dichtheitsnachweis (vgl. Abb. 184) bzw. der Nachweis einer geeigneten Anpressdruckverteilung in der Rohrverbindung mit und ohne Scherlastbeanspruchung an (vgl. Kapitel 5.4).

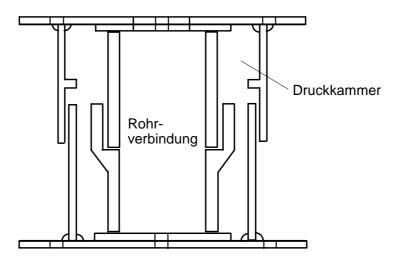


Abb. 184: Entwurf eines Außendichtheitsprüfgerätes.

II. Abweisende Geometrie:

Die Baustellenuntersuchungen und Pflanzversuche zeigten deutlich, dass luftgefüllte Freiräume das Wachstum der Wurzeln fördern können. Entsprechend kann die Wurzelfestigkeit entscheidend durch die Geometrie der Rohrverbindung und die damit angebotenen bzw. verwehrten Wachstumswege dauerhaft beeinflusst werden. Schon geringe Spaltbildungen in Steckverbindungen können einen Einfallpunkt für feine Haarwurzeln bieten. Große Ringräume unmittelbar vor dem Dichtelement erlauben ein verstärktes Dickenwachstum der Wurzeln bei gleichzeitiger Verspannung in der Rohrverbindung, so dass in der Folge die Dichtung verdrängt und ein Zugang für Sekundärwurzeln geschaffen werden kann. Spitz zulaufende Zwickel 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 Einwuchsrisikos zu sein.

III. Gasdichtheit:

Aus den bisherigen Untersuchungen kann geschlossen werden, dass die Verfügbarkeit von Sauerstoff für das Wurzelwachstum und Überleben der Pflanze von entscheidender Bedeutung sein kann. Letztlich kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass bei extrem ungünstigen Belüftungsverhältnissen im Boden, eine Sauerstoff-Zufuhr durch gasdurchlässige Rohrverbindungen eine bessere Sauerstoffversorgung und damit einen zusätzlichen Wuchsreiz im Umfeld der Rohrverbindung schafft. Darüber hinaus kann eine Gasdurchlässigkeit der Verbindung auch weitere Undichtigkeiten ankündigen (vgl.[92]).

Betrachtet man vor diesem Hintergrund beispielhaft die im Rahmen des Forschungsvorhabens untersuchten Rohrverbindungen nach Kapitel 5.4, 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 9). 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 (\mathbf{o}), geringer (\mathbf{o}), großer (\mathbf{o}) und ausgezeichneter Wirkung (\mathbf{o}) zur Verhinderung eines Wurzeleinwuchses durch die Rohrverbindung.

Experimentelle Untersuchungen 201

Tabelle 9: Beurteilung der Wurzelfestigkeit von Rohrverbindungen auf Basis der Wurzeleinwuchs behindernden Einflüsse

			Rohrwerkstoff , Rohrverbindung										
Eigen- schaft	Wirkungsweise		Steinzeug					Duktiles Gusseisen	Beton GFK		PE		
			Benor	Cerafix	Eurotop	Eurotrad	Connex	KG	Tyton	Dreikam- merdicht.	FWC- Kupplung	Awadukt	Friatec, geschweißt
I Gegen- druck	Anpressdruck	ohne Scherlast	-	••	••	•	-	•	•••	-	-	-	
		mit Scherlast	-	••	•	0	I	•	••	ı	-	I	
	Dichtfläche	ohne Scherlast	-	••	•	•		•	•••		-	•	
		mit Scherlast	-	••	•	0	•	•	••	•	-	•	
	Außendruckdichtheit												
II Abweisende Geometrie	Verbindungsgeometrie	Ringspalt			••		•	•••			••	••	
		Ringraum	•	•	•	•	•	••	•	•		•	•
		Zwickel an der Elastomer- dichtung	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
	Oberflächenstruktur	keine Haftung	•••	•••	•	•••	•••	•••	••	•	••	•••	•••
III Gasdichtheit	Gasdichtheit		-	-	-	-	-	-	_	-	-	-	-

nicht geprüft

Prüfung in Vorbereitung

subjektive Einschätzung

Wurzeleinwuchs behindernde Einflüsse:

keine Wirkung

geringe Wirkung

●● große Wirkung

ausgezeichnete Wirkung

kein Kriterium bzw. andere Wirkungsweise

Wurzelfestigkeit 202

6.3 Pflanzversuche zur Beschreibung von Rohr-Wurzel-Interaktionen

In den Kapiteln 4 und 5 wurde deutlich, dass eine Bewertung der Wurzelfestigkeit von Rohrverbindungen stets auch die Kenntnis der Einflussfaktoren für das Wurzelwachstum voraussetzt und auch Prüfverfahren und Bewertungsmodelle hierauf aufbauen müssen. Dennoch bleibt zu konstatieren, dass es sich beim Phänomen Wurzeleinwuchs immer um das Verhalten eines mit ingenieurtechnischen Methoden kaum zu beschreibenden, auch biologischen Vorganges handelt.

Entsprechend gewinnt gerade für die Optimierung von Verbindungstechniken und Sanierungsverfahren die Simulation der tatsächlichen Wachstumsvorgänge und Rohrbeanspruchungen eine besondere Bedeutung. So beginnt die Rohr-Wurzel-Interaktion bereits im Leitungsgraben an der Rohroberfläche und setzt sich über die äußere Rohrverbindung und das Dichtmittel bis in das Rohrinnere fort. Um diesen Vorgang unter kritischen Bedingungen möglichst realitätsnah nachzubilden, wurden Pflanzversuche entwickelt, deren Aufbau und Randbedingungen im Folgenden dargestellt werden. Mit Ergebnissen aus ersten Tastversuchen ist mit Abschluss kommender Wachstumsperioden zu rechnen.

Die Pflanzversuche wurden für zwei Rohrverbindungsarten mit jeweils mehreren Prüfkörpern vorbereitet und in speziell konstruierten Pflanzgefäßen angesetzt. Dabei wird das mögliche Einwuchsverhalten in Rohre mit einer Nennweite bis DN 150 bei gleichzeitigem Einwirken einer Scherlast unter kontrolliertem Schwerweg untersucht. Als gemeinsame Steuergröße für die parallel laufenden Versuche wird die in einem lastgeregelten Versuchsstand gemessene Verschiebung der Rohrverbindung herangezogen. Die Scherlasten orientieren sich an den jeweiligen Normbedingungen. Einer der eingesetzten Versuchsstände ist in Abb. 185 dargestellt (vor der Bepflanzung). Er besteht aus einem Pflanzgefäß, der Belastungseinheit und den Prüfkörpern. Die Lasten werden über einen Hebelarm von unten auf das Spitzende der Rohrverbindung aufgebracht und der Scherweg gemessen (vgl. Abb. 186). Zur Durchführung der weggeregelten Versuche wird die Belastungseinheit durch eine Scherwegarretierung ersetzt.

Wurzelfestigkeit 203

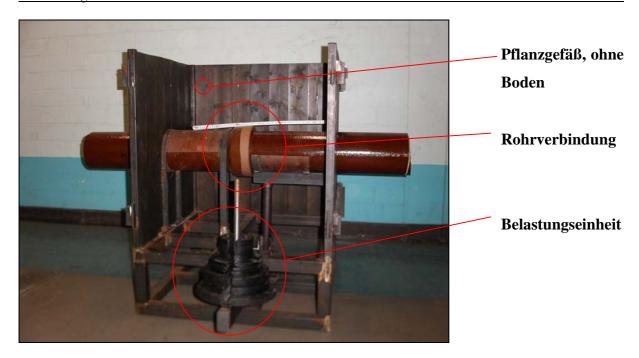


Abb. 185: Pflanzversuche, Ansicht des Versuchsaufbaus.

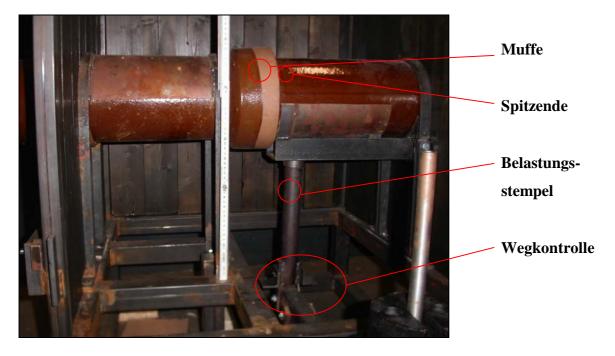


Abb. 186: Pflanzversuche, Detail Belastungeinheit, Lasteintrag.

7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

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

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

Einen wesentlichen Einfluss auf das Wurzelwachstum hat der Porenraum im Boden. Wurzeln dienen der Aufnahme von Nährstoffen und Wasser aus dem Boden. Sie erfüllen ebenfalls die Funktion, die Pflanze im Boden zu verankern. Ungehindertes Wurzelwachstum

erfolgt in großen Poren. Dabei wird davon ausgegangen, dass in Poren von größerem Durchmesser als 0,2 bis 0,4 mm Wurzeln eindringen können [108], [109]. Feine Poren werden von Wurzelhaaren durchzogen. Damit der wachsende Organismus seinen Bedarf an Nährstoffen und Wasser über seine gesamte Lebensdauer hinweg decken kann, wächst auch das Wurzelsystem weiter und erschließt sich stetig neuen Bodenraum. Dabei sind Wurzeln, wie alle Pflanzenteile auf eine funktionierende Veratmung (Oxidation) kohlenhydratreicher Verbindungen zur Energieerzeugung angewiesen. Der benötigte Sauerstoff befindet sich in einem natürlichen Bodengefüge in der Bodenluft und kann dort von den Wurzeln aufgenommen werden. Geringe Sauerstoffgehalte in der Bodenluft werden als Auslöser für Wachstumsdepression beschrieben. Auch ein Absterben von Wurzeln konnte beobachtet werden [7, 15].

Insbesondere in anthropogen beeinflussten Stadtböden lassen sich auf engem Raum unterschiedliche Böden mit unterschiedlichen Bodeneigenschaften vorfinden, die das Wurzelwachstum beeinflussen. Ein Grund ist die Nutzung des Bodenkörpers für Bauwerke der unterirdischen Infrastruktur. Das sind zum einen Versorgungsleitungen, die üblicherweise in Tiefen bis zu 1,60 m verlegt werden können (vgl. [20]). Zum anderen befinden sich dort Bauwerke der Ortsentwässerung wie Abwasserkanäle, Hausanschlussleitungen und Straßeneinläufe. Die Herstellung dieser Bauwerke in der offenen Bauweise stellt einen starken Eingriff in den Bodenkörper dar. Sie erfolgt durch Ausheben eines Grabens, Verlegen der Leitung im Schutze einer Böschung oder eines Verbaus und anschließendes lagenweises Verfüllen des Grabens und sorgfältiges Verdichten des eingefüllten Materials. Eine besondere Schwierigkeit stellt die Verdichtung des Bereichs zwischen Kämpfer und Sohle, dem sogenannten Rohrzwickel dar (vgl. Abb. 7). Die bestehenden Schwierigkeiten bei der Verdichtung des Zwickelbereichs haben in der Praxis dazu geführt, dass häufig das einzubauende Bodenmaterial bis auf Höhe des Kämpfers geschüttet und anschließend verdichtet wird (vgl. Abb. 8). Dies geschieht in der Hoffnung, dass die Bodenverdichtung bis in den Zwickelbereich hineinreicht. Es wird deutlich, dass eine solche Verdichtungsart oftmals nicht den Forderungen des Normen- und Regelwerkes nach einem definierten **Verdichtungsgrad im Zwickelbereich** gerecht wird [26].

Nährstoffe bzw. eine nährstoffreiche Umgebung sind nicht als treibende Kraft für das Einwachsen von Wurzeln in Abwasserleitungen anzusehen. Wurzeln folgten bei den untersuchten 16 Schadensfällen nicht oder nicht primär einem Tropismus, der vom Leitungsinhalt ausgeht und sie dazu veranlasst in eine Leitung einzuwachsen. In diesem Fall

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

Leck-Modell:

Die gängige Begründung für den Einwuchs von Wurzeln setzt die Attraktivität des Leitungsinhaltes voraus. Austretender Leitungsinhalt in der Nähe undichter Rohrverbindungen stellt demnach für die Wurzeln eine Quelle für Wasser und Nährstoffe dar. Der Einwuchs erfolgt gemäß dieser Vorstellung, da aus dem Kontakt zum Leitungsinhalt bessere Lebensbedingungen für die Pflanze hervorgingen.

Dichtefallenmodell:

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

Quellungsmodell:

Änderungen der Bodenfeuchtigkeit über die Zeit beeinflussen die Struktur von Böden und Wurzeln. Bestandteile des Substrates sind in der Lage unter Wasseraufnahme zu quellen und durch Wasserabgabe zu schwinden. Diese zeitliche Veränderungen des zur Verfügung stehenden Raumes im Boden kann ein Ausbreiten der Wurzeln beeinflussen. Quell- und Schwindvorgänge können wahrscheinlich auch in verholzten Wurzeln auftreten. Hierdurch

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

Sauerstoffmodell:

Die Verfügbarkeit von Sauerstoff im Boden hat großen Einfluss auf die Ausbreitung von Wurzeln. Alle pflanzlichen Organe benötigen Sauerstoff zur Aufrechterhaltung ihres Stoffwechsels. Die Versieglung städtischer Böden hat zur Folge, dass der Eintrag von Sauerstoff in den Boden stark eingeschränkt ist. Abwasserleitungen werden meist als Freispiegelleitungen betrieben und ausreichend über Wartungs- und Inspektionsöffnungen (Schächte) belüftet. Der größte Anteil der Leitung ist mit Luft gefüllt. Bei vergossenen Dichtungen können im Vergussmaterial durch Schwinden Risse entstehen. Der in der Luft enthaltene Sauerstoff kann so in der Umgebung von Rohren und Rohrverbindungen in den Boden gelangen. Aber auch Rohrverbindungen mit Elastomerdichtungen können mit der Zeit gasundicht werden (vgl. [92]). Die Rohrverbindung und der angrenzende Boden wird dadurch möglicherweise für Wurzeln attraktiv. Wurzeln wachsen gemäß diesem Modell der Sauerstoffquelle entgegen und finden so die Rohrverbindung. Bei nicht gasdichten Rohrwerkstoffen kann auch bei intakten Leitungen Sauerstoff austreten, der einen Einfluss auf die Ausbreitung von Wurzeln haben kann.

Kombinationsmodell:

Das Einwachsen in die Leitung erfolgt im allgemeinen nicht, weil der Leitungsinhalt gute Bedingungen bereitstellt, der Einwuchs ist hingegen die logische Konsequenz des Zusammenspiels verschiedener Gegebenheiten in der Nähe der Leitung. Es ist anzunehmen, dass ein Zusammenspiel verschiedener Faktoren den Einwuchs von Wurzeln in 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.

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

.

8 Fazit und Ausblick

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

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

- Die Baustellenuntersuchungen und Pflanzversuche zeigten deutlich, dass luftgefüllte Freiräume das Wachstum der Wurzeln fördern können. Entsprechend kann die Wurzelfestigkeit entscheidend durch die Geometrie der Rohrverbindung und die damit angebotenen bzw. verwehrten Wachstumswege dauerhaft beeinflusst werden. Schon geringe Spaltbildungen in Steckverbindungen können einen Einfallspunkt für feine Haarwurzeln bieten. Große Ringräume unmittelbar vor dem Dichtelement erlauben ein verstärktes Dickenwachstum der Wurzeln bei gleichzeitiger Verspannung in der Rohrverbindung, so dass in der Folge die Dichtung verdrängt und ein Zugang für Sekundärwurzeln geschaffen werden kann. Spitz zulaufende Zwickel der Lippendichtung stellen dann einen maßgeblichen Angriffspunkt dar. Weiterhin konnten bei den Aufgrabungen Unterschiede in der Ausbildung des Wurzelwerkes in Abhängigkeit der Oberflächenstruktur des Rohrwerkstoffes beobachtet werden. Haftungsabweisende Oberflächen scheinen hier ein Weg zur Reduzierung des Einwuchsrisikos zu sein.
- Aus den bisherigen Untersuchungen kann geschlossen werden, dass die Verfügbarkeit von Sauerstoff für das Wurzelwachstum und Überleben der Pflanze im vorliegenden Fall von entscheidender Bedeutung sein kann. Letztlich kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass bei extrem ungünstigen Belüftungsverhältnissen im Boden, eine Sauerstoffzufuhr durch gasdurchlässige Rohrverbindungen eine bessere Sauerstoffversorgung und damit einen zusätzlichen Wuchsreiz im Umfeld der Rohrverbindung schafft. Darüber hinaus kann eine Gasdurchlässigkeit der Verbindung auch weitere Undichtigkeiten ankündigen (vgl. [92]).
- Ein verbreitetes Mittel zur Verhinderung von Wurzeleinwüchsen ist der Einsatz mechanisch wirkender Dichtmittel, die eine hohe statische Sicherheit gegen äußere Druckbelastung bieten. Ein Nachweis dieser Sicherheit ist zum einen durch direkte Belastung der Rohrverbindung durch ein von außen wirkendes Medium möglich oder zum anderen durch Nachweis einer Vorspannung der Dichtung, die durch die zu erwartende Druckbelastung nicht überwunden werden kann. Im vorliegenden Fall wird eine Außenwasserdruckprüfungen (vgl. Abb. 184) bzw. der Nachweis einer geeigneten

Anpressdruckverteilung des Dichtmittels in der Rohrverbindung empfohlen (vgl. Kapitel 5.4).

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

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

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

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

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

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

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

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

 Die Dichtheit von Steckverbindungen, die üblicherweise für Abwasserleitungen eingesetzt werden, wird maßgeblich durch den Anpressdruck bestimmt, den die Dichtung erzeugt. Allerdings ist eine Erhöhung des Anpressdruckes bautechnisch durch Handhabbarkeitsanforderungen beim Zusammenführen der Rohre sowie die Rohr- bzw. Rohrwerkstoffeigenschaften (Zugfestigkeit, Stabilität) begrenzt.

 Der tatsächliche Druck des Dichtelements kann von Wurzeln überwunden werden, wenn er kleiner ist als der Wurzeldruck. Voraussetzung für den Angriff des Wurzeldruckes ist ein Widerlager, an dem sich die Wurzel verspannen kann. Auch die Verbindungsgeometrie entscheidet somit über das Einwuchsverhalten und muss daher mit Blick auf die Wurzelfestigkeit ausgelegt werden.

 Bei der Konstruktion von Steckmuffen sollte der durchwurzelbare, umlaufende Spalt gering sein. Allerdings sollte gleichzeitig eine Ringraumbildung zwischen Muffenspalt und Dichtelement verhindert werden, da ansonsten ein Dichtefalleneffekt zu befürchten ist.

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

• Weitergehende Untersuchungen an Rohrverbindungen:

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

• Eignung von Verfahren zur Entfernung von Wurzeln aus Rohrleitungen:

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

• Weitergehende Versuche zur Verifizierung der Modellvorstellungen:

Bei den bisherigen Untersuchungen stand die Betrachtung der Ringraum- bzw. Ringspaltgeometrie und Vertiefung des Dichtefallenmodells im Vordergrund. Offen bleibt eine detaillierte Beschreibung des Oberflächeneinflusses auf den Wurzelwuchs entlang von Grenzflächen, insbesondere entlang von Rohren. Ähnliches gilt für das Sauerstoff-Modell und die Prüfung der Gasdichtheit von Rohrverbindungen. Darüber hinaus empfiehlt sich die Untersuchung anatomischer Unterschiede zwischen Primär- und Sekundärwurzeln verschiedener Baumarten, z.B. Laub- und Nadelbäume, sowie die Wirkung alternativer Bettungsmittel zur Behinderung des Wurzelwachstums in Leitungsgräben.

• Untersuchungen zur Prüfung der Wurzelfestigkeit von Sanierungsverfahren:

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

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

9 Literatur

[1] ATV-M 143, Teil 1: Grundlagen der Inspektion, Instandsetzung, Sanierung und Erneuerung von Abwasserkanälen und –leitungen, ATV-DVWK Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., 1989

- [2] STEIN, D; KAUFMANN, O.: Schadensanalyse an Abwasserkanälen aus Beton- und Steinzeugrohren der Bundesrepublik Deutschland - West, Korrespondenz Abwasser, 02 / 1993
- [3] MEYER, F.H.: Bäume in der Stadt, Ulmer Verlag, 1982
- [4] IKT Fax- und Online-Umfrage bei den Netzbetreibern im Bundesgebiet zum Schadensaufkommen durch Wurzeleinwuchs in Kanalisationsanlagen, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, unveröffentlicht, 08 / 2001
- [5] DIN 4060: Rohrverbindungen von Abwassserkanälen und –leitungen mit Elastomerdichtungen, 02 / 1998
- [6] BOSSELER, B.; BENNERSCHEIDT, 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, 2001
- [7] BALDER, H.: Die Wurzeln der Stadtbäume, Parey-Verlag, 1998
- [8] NICOTRA, A.B.; BABICKA, N.; WESTOBY, M.: Seedling root anatomy and morphology: an examination of ecological differentation with rainfall using phylogenetically independent contrasts, Springer-Verlag, 2001
- [9] BURGHARDT, W.: Bodenkundliche Untersuchungen im Rahmen des Projektes "Wurzeleinwuchs in Abwasserleitungen und –kanäle Ursachen, Prüfungen und Vermeidung", 05 / 2004
- [10] Braune, W.; Leman, A.; Taubert, H.: Pflanzenanatomisches Praktikum I., 5.Auflage. Fischer-Verlag, 1987
- [11] MACLEOD, R.D.; CRAM, W.J.: Forces Exerted by Tree Roots, Arboricultural Research & Information Note 134 / 96 / EXT, 1996
- [12] STÜTZEL, TH.; BOSSELER, B.: 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
- [13] VOLKMANN, D.; SIEVERS, A.: Graviperception in multicellular organs; in: W. Haupt & M. Feinleib, Physiology of movements, Encyclopedia of Plant Physiology, vol. 7, S. 573-600, Springer-Verlag, 1979
- [14] MATTHECK, C.: Design in der Natur der Baum als Lehrmeister, 3. Aufl., Rombach-Verlag, 1997
- [15] SCHEFFER, F.; SCHACHTSCHNABEL, P.: Lehrbuch der Bodenkunde, 14. Aufl., Enke-Verlag, 1998
- [16] BUTNOR, J. R.; DOOLITTLE, J. A.; KRESS, L.; COHEN, S.; JOHNSEN, K. H.: Use of ground-penetrating radar to study tree roots in the southeastern United States, Tree Physiology 21, 1269–1278, 11 / 2001
- [17] STEIN, D.: Instandhaltung von Kanalisationen, Verlag Ernst & Sohn, 3. Aufl., 1999
- [18] SULLIVAN, R.-H.; LOHN, M.; CLARK, T.: Sewer Systems Evaluation, Rehabilitation and new Construction a new manual of Practice, American Public Environmental Research Lab. No. EP2-77-017d, 1977

[19] ATV-Arbeitsblatt A118: Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen, ATV-DVWK, 1999

- [20] DIN 1998: Unterbringung von Leitungen und Anlagen in öffentlichen Flächen, Richtlinien für die Planung, 05 / 1978
- [21] DIN EN 1610: Verlegung und Prüfung von Abwasserleitungen und –kanälen, Deutsche Fassung EN 1610, 07 / 1997
- [22] ZTVE StB 94: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau, Fassung, 1997
- [23] KÖHLER, R.: Tiefbauarbeiten für Rohrleitungen, Verlagsgesellschaft Rolf Müller, 6. Aufl., 1997
- [24] ATV-DVWK: Das Baustellenhandbuch zum Bau von Abwasserleitungen und –kanälen, 1. Aufl., 2002
- [25] STECHA, H.: Bettung der Rohre, Verfüllung, Verdichtung; in: Köhler, R. (Hrsg.), Tiefbaupraxis für Abwasserkanäle, Vulkan-Verlag, 2000
- [26] STEIN, D.: Entwicklung neuartiger Konzeptionen für Rohre aus Beton, Schlussbericht, Bundesminister für Forschung und Technologie, 1992
- [27] BÖHM, W.: Methods of studying root systems, Ecol. Stud. 33, Springer-Verlag, 1979
- [28] 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
- [29] BOHNE, H.; HARTGE, K.H.: Auswirkungen der Gefügegeometrie auf den Wuchs von Getreidekeimlingen, Mitt. Dt. Bodenk. Ges. 34, S. 141-144, 1982
- [30] TAYLOR, H.M.; GARDNER, H.R.: Relative penetrating ability of different plant roots. Agron, J. 52, S.579-581, 1960
- [31] BARLEY, K.P.: The effects of mechanical stress on the growth of roots, J. Exptl. Bot. 13, S. 95-110, 1962
- [32] BARLEY, K.P.: Influence of soil strength on root growth, Soil Sci. 96, S. 175-180, 1963
- [33] 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
- [34] DUMBECK, G. u. HARRACH, T.: Porenumverteilung bei Bodenverdichtungen, Mitt. Dt. Bodenk. Ges. 43/I, S. 213-218, 1985
- [35] GRABLE, A.R.: Effects of compaction on contents and transmission of air in soils, in: Compaction of agricultureal soils, ASAE Monographie, S. 154-164, 1971
- [36] LEBERT, M: Beurteilung und Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Ackerböden, Bayreuther Bodenkundl. Ber. 12, S. 133, 1989
- [37] VEIHMEYER, F.J.; HENDRICKSON, A.H.: Soil density and root penetration, Soil Sciences 65, S. 487-493, 1948
- [38] 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
- [39] PHILIPPS, R.; KIRKHAM, D.: Soil compaction in the field and corn growth, Agron. J. 54, S. 29-34, 1962
- [40] 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

[41] PETELKAU, H.: Durch Fahrwerke landwirtschaftlicher Mechanisierungsmittel verursachte Schadwirkungen und Vorschläge zur ihrer Verminderung, Wiss. Beiträge Martin-Luther-Univ. Halle 11, S. 106-119, 1987

- [42] 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
- [43] 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
- [44] 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 und 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
- [45] BECHER, H.H.: Wasserspannungsabhängiger Eindringwiderstand eines Pelosols, Geoderma 21, S. 105 118, 1978
- [46] 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
- [47] 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
- [48] 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
- [49] FREDE, H.G.: Der Gasaustausch des Bodens, Göttinger Bodenkundliche Berichte 87, 130 S., 1986
- [50] ZAUSIG, J.; HELL, U.; HORN, R.: Die Bedeutung der Aggregierung für den Gashaushalt im Intraaggregatporensystem, Z. Pflanzenern. u. Bodenkd. 153, S. 5-10, 1990
- [51] MARSCHNER, H.: Nährstoffdynamik in der Rhizosphäre, Eine Übersicht. Berl. Deutsch. Bot. Ges., 98, 291-309, 1985
- [52] GLINSKI, G.; STEPNIEWSKI, W.: Soil aeration and its role for plants, CRC-Press, Florida, 1985
- [53] GEISLER, G.: Der Lufthaushalt des Bodens in seiner Bedeutung für das Pflanzenwachstum, Kali-Briefe 14 (1), S. 61-78, 1978
- [54] 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
- [55] RENGER, M.; STREBEL, O.; SPONAGEL, H.; WESSOLEK, G.: Wasser und Boden, Ausg. 36, S. 449-502, 1984
- [56] 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
- [57] FLÜHLER, H.: Sauerstoffdiffusion im Boden, Mitt. Schweiz. Anst. Forsten Versuchswesen, Band 39, Zürich, 1973

[58] 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

- [59] BERGER C.; LOHAUS J.; WITTNER A.; SCHÄFER R.: Zustand der Kanalisation in Deutschland, Ergebnisse der ATV-DVWK-Umfrage 2001, ATV-DVWK, 2001
- [60] DIN 19543: Allgemeine Anforderungen an Rohrverbindungen für Abwasserkanäle und –leitungen , 08 / 1982
- [61] DIN EN 476: Allgemeine Anforderungen an Bauteile für Abwasserkanäle und –leitungen für Schwerkraftentwässerungssysteme, 07 / 1997
- [62] THYSSEN GUSS AG, SCHALKER VEREIN: Kanalrohrsysteme aus duktilem Gusseisen, 1999
- [63] FIRMENINFORMATION HOBAS ROHRE GMBH, 2002
- [64] DIN 7724: Polymere Werkstoffe Gruppierung polymerer Werkstoffe aufgrund ihres mechanischen Verhaltens , 04 / 1993
- [65] DIN 4060: Rohrverbindungen von Abwasserkanälen und –leitungen mit Elastomerdichtungen; Anforderungen und Prüfungen an Rohrverbindungen, die Elastomerdichtungen enthalten, 02 / 1998
- [66] STEIN, D.; STEIN, R.: Instandhaltung von Kanalisationen, CD-ROM, 2002
- [67] FBS-Fachvereinigung Betonrohre und Stahlbetonrohre e.V., Technisches Handbuch, 1999
- [68] BOSSELER, B.; KÖTTERS, S.: Einwirkung von leicht flüchtigen halogenierten Kohlenwasserstoffen (LHKW) auf Elastomerdichtungen in Rohrverbindungen, IKT Institut für Unterirdische Infrastruktur, unveröffentlicht, 2001
- [69] SCHOLZ, W.; KNOBLAUCH, H.; HIESE, W.; ETTEL, W.; FLEISCHMANN, D.; HIMMLER, K.; KUHLE, B.; KUTZNER, J.; KUTZNER W.: Baustoffkenntnis. 14. Aufl., Werner-Verlag, 1999
- [70] ELSBACH, D.: Der Abwasserkanal, Handbuch für Planung, Ausführung und Betrieb, Parey Verlag, 1.Aufl., 1980
- [71] MANDT, G.: Geschichtliche Entwicklung von Muffenverbindungen, Eigenverlag der Steinzeug AG, 1996
- [72] FRÜHLING, A.: Handbuch der Ingenieurwissenschaften, Der Wasserbau Die Entwässerung der Städte. Verlag Willhelm Engelmann, 1910
- [73] BRAUBACH, A.: Wasserversorgung und Entwässerung der Städte, Lehrbuch des Tiefbaus, Bd 2, Verlag Wilhelm Engelmann, 1925
- [74] DIN EN 295: Steinzeugrohre und Formstücke sowie Rohrverbindungen für Abwasserleitungen und kanäle, 05 / 1999
- [75] DEUTSCHE STEINZEUG KERAMIK GMBH: Steinzeughandbuch, Eigenverlag, 2001
- [76] DIN EN 1916: Rohre und Formstücke aus Beton, Stahlfaserbeton und Stahlbeton, Deutsche Fassung EN 1916, 04 / 2003
- [77] BUNDESVERBAND DEUTSCHER BETON- UND FERTIGTEILINDUSTRIE E.V.: Handbuch für Rohre aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Bauverlag, 1. Aufl., 1978
- [78] SCHWAIGERER, S.: Rohrleitungen Theorie und Praxis, Springer-Verlag, Berlin, 1967
- [79] ROSENWINKEL, K.-H.: Einführung in die Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik I + II. Vorlesungsskript der Universität Hannover, 1998

[80] FACHVEREINIGUNG BETONROHRE UND STAHLBETONROHRE e.V.: FBS-Qualitätsrichtlinie - Betonrohre, Stahlbetonrohre, Vortriebsrohre und Schachtbauteile mit FBS-Qualität für erdverlegte Abwasserkanäle und –leitungen, Eigenverlag FBS, 1994

- [81] ATV-A 115: Einleiten von nicht häuslichem Abwasser in eine öffentliche Abwassseranlage, ATV-DVWK, 10 / 1994
- [82] FACHGEMEINSCHAFT GUSSEISERNE ROHRE: Handbuch Gussrohr-Technik, Formdruck Peter Meyer, 1996
- [83] PRODUKTINFORMATION DER FA. FUNKE KUNSTOFFE GMBH, Hamm-Uentrop, 2002
- [84] DIN 19537-2: Rohre und Formstücke aus Polyethylen hoher Dichte (HDPE) für Abwasserkanäle und leitungen, 01 / 1988
- [85] PRODUKTINFORMATION DER FA. REHAU, Rehau, 2003
- [86] DIN EN 681: Werkstoff-Anforderungen für Rohrleitungs-Dichtungen für Anwendungen in der Wasserversorgung und Entwässerung Teile 1 bis 4, 10 / 2000
- [87] DIN EN 598: Rohre, Formstücke, Zubehörteile aus duktilem Gußeisen und ihre Verbindungen für die Abwasser-Entsorgung Anforderungen und Prüfverfahren, Deutsche Fassung EN 598, 1994
- [88] DIN 4062: Dichtstoffe für Bauteile aus Beton, ungültig, 09 / 1978
- [89] SCHARWÄCHTER, D.: Long Term tightness of sealing joints in non-pressure plastic pipe systems, Plastic Pipes XI, 2001
- [90] AS 1260-1999: Unplasticized PVC (UPVC), Pipes and Fittings for Drain Waste and Vent Applications, Standards Australia, 1999
- [91] SADLER, P.A.; BURN, L.S.; WHITTLE, A.J.: Elastomeric pipe joint performance requirements for use in PVC sewer-lines, CSIRO Building, Construction and Engineering, Australia, 2001
- [92] THOMA, W.: Entwicklung von Untersuchungs- und Prüfverfahren zur Klärung des Zusammenhangs zwischen Alterung und Undichtigkeit bei Dichtungswerkstoffen und –systemen in industriellen und öffentlichen Abwasserrohrleitungen, Forschungsvorhaben des TÜV Südwest, BMBF 02-WK 9175/0, 1996
- [93] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT LANDSCHAFTSENTWICKLUNG LANDSCHAFTSBAU E.V. FLL: Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen Dachbegrünungsrichtlinie, 01 / 2002
- [94] FIRMENINFORMATION 3M: Scotch-Seal Chemical-Grout 5610 (Gel), Neuss, 2002
- [95] VDLUFA, METHODENBUCH: Methodenbuch des Verbandes Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten, 1991
- [96] SCHLICHTING, E.; BLUME, H.-P.; STAHR, K.: Bodenkundliches Praktikum. Pareys Studientexte 81, Blackwell Wiss.-Verlag, 1995
- [97] DIN 19683-9: Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau Physikalische Laboruntersuchungen Teil 9: Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit in wassergesättigten Stechzylinderbodenproben, 05 / 1998
- [98] DIN ISO 11277: Bodenbeschaffenheit Bestimmung der Partikelgrößenverteilung in Mineralböden Verfahren mittels Siebung und Sedimentation (ISO 11277:1998 + ISO 11277:1998 Corrigendum 1:2002), 08 / 2002
- [99] WOLKEWITZ, H.: Die Weiterentwicklung des Verfahrens der pF-Untersuchung zur Feststellung der Bindungsintensität des Wassers im Boden, Der Kulturtechniker, 47/48, S.37-51, 1959/60

[100] RICHARDS, L.A.; FIREMANN, H.: Pressure-plate apparatus for messuring moisture sorption and transmission by soils, Soil Sci., 56, S.395-404, 1943

- [101] DIN ISO 10390: Bodenbeschaffenheit Bestimmung des pH-Wertes, 05 / 1997
- [102] DIN 19683 2: Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau Physikalische Laboruntersuchungen, Bestimmung der Korngrößenzusammensetzung nach Vorbehandlung mit Natriumpyrophosphat, 04 / 1997
- [103] IKO MINERALS GMBH: Datenblatt Bentonit HX, Aktiv-Bentonit IBECO HT-X, 10 / 2001.
- [104] KUNTZE, H.; ROESCHMANN G.; SCHWERTFEGER G.: Bodenkunde, Thieme-Verlag, 5. Aufl., 1994
- [105] FIRMENINFORMATIONEN DER FA. TEKSCAN: Druckfolien zum Erfassung des Druckes in räumlicher Auflösung; www.tekscan.com, 2004
- [106] FIRMENINFORMATION DER STEINZEUG ABWASSERSYSTEME GMBH, www.steinzeug.de, 2004
- [107] FIRMENINFORMATION DER FIRMA FRIATEC, www.friatec.de, 2004
- [108] 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
- [109] BOHNE, H.; HARTGE, K.H.: Auswirkungen der Gefügegeometrie auf den Wuchs von Getreidekeimlingen, Mitt. Dt. Bodenk. Ges. 34: S. 141-144, 1982