

Wissenschaftliche Untersuchungen zur Wirksamkeit von passiven Leitungs- schutzmaßnahmen an unterirdischen Leitungen

Abschlussbericht:

Analyse und Bewertung des Langzeitverhalten am Versuchsfeld Almere durch TV-
Inspektion und Freilegung – Phase 4



Bericht zu Phase 4:

Wurzeleinwuchs an unterirdischen Leitungen - Untersuchungen zur Wirksamkeit von passiven Leitungsschutzmaßnahmen an unterirdischen Leitungen. Die Beschreibungen und Texte aus den Projektphasen 1, 2 und 3 wurden aus den Zwischenberichten [16,18] textgleich übernommen.

Auftraggeber:



Stichting RIONED
Horaplanctsoen 12B
6717 LT Ede

Gemeente Almere



Gemeente Almere
Stadhuisplein 1
Postbus 200
1300 AE Almere

Auftragnehmer:



IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH
Exterbruch 1
45886 Gelsenkirchen

Bearbeitung:

Wissenschaftliche Leitung: Prof. Dr.-Ing. habil. Bert Bosseler

Projektleitung und -bearbeitung: Kilian Möllers, M.Eng.

Projektpartner: Prof. Dr. Thomas Stützel

Danksagung

Das Forschungsprojekt „Wurzeleinwuchs an unterirdischen Leitungen – Untersuchungen zur Wirksamkeit von passiven Leitungsschutzmaßnahmen an unterirdischen Leitungen“ wurde über die Projektzeit von Vertretern des Auftraggebers sowie Fördermittelgebers begleitet:

Gemeente Almere
Stichting RIONED

Wir danken für die fachlichen Anregungen und Diskussionen.

Der Firma i+d sanierungstechnik GmbH danken wir für die Durchführung der Dichtheitsprüfung der Rohrleitungen. Der Firma Reimert, bouw en Infrastructuur Almere danken wir für die bauliche Ausführung des Versuchsfeldes und Begleitung bei der Aufgrabung.

<u>Inhaltsverzeichnis</u>	Seite
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	5
TABELLENVERZEICHNIS	7
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	8
1. VERANLASSUNG, PROBLEM- UND ZIELSTELLUNG	9
2. ARBEITSPROGRAMM.....	11
2.1 PROJEKTPHASE 1 (DURCHGEFÜHRT)	11
2.2 PROJEKTPHASE 2 (DURCHGEFÜHRT)	11
2.3 PROJEKTPHASE 3 (DURCHGEFÜHRT ZUR FLORIADE 2022).....	12
2.4 PROJEKTPHASE (DURCHGEFÜHRT)	12
3. VERSUCHSFELD IN ALMERE (NL).....	13
4. UNTERSUCHUNGSPROGRAMM	17
5. ÜBERBLICK ÜBER DIE UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE DER VORHERIGEN PROJEKTPHASEN	18
5.1 UNTERSUCHUNGEN AN DEN ROHRVERBINDUNGEN.....	18
5.2 UNTERSUCHUNGEN AN DEN WURZELBARRIEREN	19
6. UNTERSUCHUNGSDURCHFÜHRUNG UND -ERGEBNISSE 2024	21
6.1 BÄUME IM VERSUCHSFELD.....	21
6.2 ROHRVERBINDUNGEN.....	22
6.3 WURZELBARRIEREN	31
6.4 EINORDNUNG DER ERGEBNISSE	35
7. SCHLUSSFOLGERUNG FÜR DIE PRAXIS	42
8. ZUSAMMENFASSUNG.....	46
9. LITERATUR	48

Anlagenverzeichnis

Anlage 1 Auswertung Wurzelbarrieren

Anlage 2 Auswertung porenaumärmer Verfüllstoff

Anlage 3 Auswertung Rohrverbindungen

Anlage 4 Bäume im Versuchsfeld

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Versuchsaufbau in Almere (NL)	13
Abbildung 2: Bemaßung des Versuchsfeldes	14
Abbildung 3: Anordnung der Rohrverbindungen (C1-C12) und Werkstoffübergänge (MT1-MT2) in den zwei Rohrleitungen (DN150, DN300) an den Bäumen (T1-T5)	
15	
Abbildung 4: Anordnung der Folien bzw. Platten (FP1-FP8) und porenaumarmen Verfüllstoffe (S) an den Bäumen (T1-T5)	15
Abbildung 5: Blick auf das Anschauungsobjekt (links), Informationstafel (rechts)	16
Abbildung 6: Beispielhaftes Vorgehen zur Erstellung der Untersuchungsgräben an den Baumstandorten (Links: Einsatz des Saugbaggers mit Druckluftlanze nach Entfernung der Grasnarbe, Rechts: Abstützung eines seitlichen Untersuchungsgrabens)	21
Abbildung 7: Wurzeleinwuchs in Übergangsmanschette MT1 (Links: Draufsicht auf den Muffenbereich, Rechts: Eine Wurzel ist einen Zwischenbereich der Verbindung eingewachsen)	24
Abbildung 8: Wurzeleinwuchs in den Muffenspalt (Links: C8 Wurzel unterwächst das Bentonitband, Rechts: C9 Wurzel fest verankert in PP Standardmuffe,)	25
Abbildung 9: Wurzeleinwuchs in Muffenspalt von Rohrverbindung C12b (Standardsteckverbindung) (Links: Wurzeln im Muffenbereich, Rechts: Wurzeln in Muffenspalt verankert)	25
Abbildung 10: C10 Schrumpfschlauchverbindung ohne Wurzeleinwuchs an den Seitenrändern	27
Abbildung 11: Wurzeleinwuchs in die Rohrleitung durch Muffenverbindung (Draufsicht) (Links: C7 Wurzeln mit Seitenwurzeln sind nach Überwinden des Dichtungsbandes in der Rohrleitung, Rechts: C11 Wurzeln haben das Dichtungsband überwunden und wachsen auf der linken Seite in die Rohrleitung)	28
Abbildung 12: C1 Wurzel wächst zentral unter einer Dichtung entlang des Rohrumfangs (Links: Verdrehtes Dichtungsband, Rechts: Ca. 1 cm breite Wurzeln am Dichtungsband)	29
Abbildung 13: Wurzeleinwuchs in Rohrverbindung C8 (Bentonitband) (Links: Wurzel unterwächst das Bentonitband, Rechts: Ca. 30 cm lange Wurzel aus Rohrleitung entnommen)	29
Abbildung 14: Innenansicht der Rohrverbindung MT1 (Übergangsmanschette) (Links: Wurzel wächst innen entlang des Kunststoffelements, Rechts: Am Materialübergang wächst eine Wurzel (Dicke ca. 1 cm) in die Rohrleitung)	30

Abbildung 15: Beispiel für Wurzeln an der Dichtung (Links: C8 Wurzeln wachsen an Dichtungsband und anschließend an diesem entlang, Rechts: C2 Wurzeln wachsen in den Muffenspalt und wachsen bis an das Dichtungsbauwerk)	30
Abbildung 16: Seitliches Umwachsen von Wurzeln an den Rändern (Seitenansicht)	31
Abbildung 17: Beispiel: Durchwachsen von Wurzeln durch eine Steckverbindung (Draufsicht)	32
Abbildung 18: Beispiel: Unterwachsen von Wurzeln unterhalb der Wurzelbarriere (Seitenansicht)	32
Abbildung 19: Aufgrabungsergebnisse am porenraumarmen Verfüllstoff (S) (Links: Wurzeln wachsen in den Block (Draufsicht), Rechts: Wurzel überwächst den Block oberhalb und quert diesen im Anschluss (Seitenansicht))	34
Abbildung 20: Entnommener Probekörper Porenraumärmer Verfüllstoff aus dem eingebauten Block	35

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Werkstoffe der Rohrleitungen mit Rohrverbindungen bzw. Werkstoffübergängen	14
Tabelle 2: Werkstoffe, Verbindungsarten und Bezeichnungen der Folien bzw. Platten	16
Tabelle 3: Zeitlicher Ablauf während der Projektlaufzeit.....	17
Tabelle 4: Ergebnisse der TV-Inspektion 2024.....	23
Tabelle 5: Ergebnisse der Aufgrabungen an den Rohrverbindungen	26
Tabelle 6: Gesamtübersicht aller Untersuchungen an Rohrverbindungen	38

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
PE	Polyethylen
PE-HD	High-Density Polyethylen
PE-LD	Low-Density Polyethylen
PP	Polypropylen
PVC	Polyvinylchlorid
PVC-U	Polyvinylchlorid unplasticized
ZFSV	Zeitweise fließfähiger selbstverdichtender Verfüllstoff

1. Veranlassung, Problem- und Zielstellung

Bäume übernehmen in dicht besiedelten innerstädtischen Bereichen wichtige Funktionen. So verbessern sie beispielsweise durch ihre Sauerstoffproduktion, CO2-Bindung, Staubfilterung und Schattenbildung das Stadtklima (vgl. [1], [2]). Außerdem wird durch Bäume die Windgeschwindigkeit und der Lärm reduziert (vgl. [3]) sowie anfallendes Niederschlagswasser zurückgehalten (Retention).

In innerstädtischen Bereichen sind dem Baumwachstum mitunter enge Grenzen gesetzt. Baumwurzeln werden hier durch eine Vielzahl von Faktoren, unter anderem durch die Bauwerke der unterirdischen Infrastruktur, in ihrer Ausdehnung stark beschränkt. Auf der einen Seite können Schäden an Abwasserleitungen entstehen. Aktuelle Erhebungen zeigen, dass 11 % aller Schadensfälle an Abwasserkanälen in Deutschland auf Abflusshindernisse, u.a. durch eingewachsene Wurzeln, zurückzuführen sind [4]. Andererseits können Schäden an Wurzeln, verursacht durch Bodenverdichtungen oder Bauarbeiten, zum Absterben des Baumes führen.

Aufgrund der vorgegebenen Randbedingungen des Rohr-Boden-Systems wachsen Wurzeln auch in Abwasserkanäle und -leitungen ein (vgl. [5]). Eingewachsene Wurzeln haben einen negativen Einfluss auf die hydraulische Leistungs- und Funktionsfähigkeit des betroffenen Kanalabschnittes. Mögliche umweltrelevante Auswirkungen sind unter anderem die Infiltration von Grundwasser oder die Exfiltration von Abwasser in den umgebenden Grundwasser- und Bodenkörper (vgl. [6]). Die unmittelbare Nähe von Baumwurzeln zu Leitungssystemen birgt somit ein hohes Konfliktpotential (vgl. [7], [8]).

Das Regelwerk „Bäume, unterirdische Leitungen und Kanäle“ (DWA-M 162, DVGW GW 125 und FGSV Nr. 939, textgleich) (vgl. [9]) gibt Hinweise für ein Miteinander zwischen Bäumen, unterirdischen Leitungen und Kanälen. Dies wird beispielsweise schon in den Vorbemerkungen hervorgehoben:

„Bäume und unterirdische Ver- und Entsorgungsanlagen tragen auf unterschiedliche Weise maßgeblich zur Steigerung bzw. zum Erhalt der Lebensqualität bei. Die Ziele müssen jeweils im Einzelfall in Einklang gebracht werden. Um dennoch mögliche Wege zur gemeinsamen Nutzung des Raums durch Bäume sowie unterirdische Leitungen und Kanäle zu verdeutlichen, werden im vorliegenden Merkblatt die entsprechenden Zusammenhänge kompakt dargestellt und Empfehlungen für Planung, Bau, Betrieb, Unterhalt (Instandhaltung) und Sanierung gegeben. Zielgruppen sind Netzbetreiber, Grünflächen- und Forstverwaltungen, Straßenbaulastträger, Kommunalverwaltungen, Tiefbauunternehmen, Unternehmen des Garten-, Landschafts- und Sportplatzbaus sowie allgemein Bauingenieure, Landschaftsarchitekten, Planer und Sachverständige.“

Grundsätzlich werden zwei Maßnahmen beschrieben. Auf der einen Seite das Wurzelwachstum mit entsprechender Gestaltung des Wurzelraumes zu fördern; die sogenannten aktiven Schutzmaßnahmen. Auf der anderen Seite werden Schutzmaßnahmen im Leitungsgraben als sogenannte „passive Schutzmaßnahmen“ genannt. Dies sind z.B. der Einsatz porenarmer Verfüllstoffe im Leitungsgraben, der Einbau von Mantelrohren (Schutzrohren) um die Leitung oder der Einbau von Platten oder Folien im Leitungsgraben. Langfristige, unabhängige Untersuchungen zur Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit

bestehender Produkte und Systeme fehlen derzeit, so dass bei der damaligen Erarbeitung des o. g. Merkblattes „Bäume, unterirdische Leitungen und Kanäle“ die notwendige Forderung der Netzbetreiber nach nachweislich funktionierenden Wurzelschutzmaßnahmen nicht berücksichtigt werden konnte.

Insbesondere die Langzeitwirkungen der passiven Schutzmaßnahmen sind bisher nur unzureichend bekannt. Es werden beispielsweise mehrere miteinander verbundene Kunststoff-Komponenten in Leitungsnähe eingebaut, um ein „Umlenken“ der Wurzeln zu bewirken. Ziel dieser Schutzmaßnahmen ist es, die Wurzeln vom Bettungsbereich der Leitungen fernzuhalten und in andere Bodenbereiche einwachsen zu lassen.

In der Gemeinde Almere werden unterirdische Hausanschlussleitungen wegen des hohen Grundwasserspiegels nur ungefähr einen Meter unter Geländeoberkante eingebaut. Daher sind die Platzverhältnisse unter den Straßen hier besonders beengt. Aus diesen Gründen wurden in der Vergangenheit vereinzelt Bäume im Bestand zur Prävention von Wurzeleinwuchs bei Neubau von unterirdischen Leitungen entfernt. In Zeiten des Klimawandels eine sehr unpopuläre Maßnahme, die man in Zukunft unbedingt vermeiden möchte. Neue Konzepte sind daher gefragt, um Konflikte zwischen urbaner Vegetation und unterirdischen Leitungen zu vermeiden. Daher ist die Gemeinde Almere sehr an neuen Konzepten interessiert, die eine grüne Stadt und optimalen Schutz der Leitungen vor Wurzeleinwuchs vereinen.

Hier setzte das Forschungsprojekt an: Im Rahmen des Vorhabens wurden Systeme zum passiven Schutz von Leitungen vor Wurzeln untersucht. Dazu wurden in zwei Projektphasen der Einbau von passiven Schutzelementen und die Neupflanzungen von Bäumen an neuen Entsorgungsleitungen wissenschaftlich begleitet.

Durch eine Freilegung dieser Schutzelemente in einer dritten Projektphase nach vier Jahren wurde die Wirksamkeit (Barrierefunktion) gegenüber wachsenden Baumwurzeln analysiert. Anhand der Untersuchungsergebnisse können erste Empfehlungen und Hinweise abgeleitet werden, die den Netzbetreiber bei der Auswahl geeigneter Wurzelschutzmaßnahmen konkret unterstützen. Darüber hinaus lassen sich aus diesen Langzeitbetrachtungen auch wertvolle Hinweise für die Entwicklung bzw. Optimierung neuer Produkte bzw. Systeme für den Wurzelschutz von Leitungen gewinnen (vgl. [10]).

Um der Öffentlichkeit die Untersuchungen zugänglich zu machen, wurde an einem Muster-Leitungsabschnitt eine vertikale Glasabdeckung installiert. Somit können Leitungen, Wurzeln und die Schutzmaßnahmen direkt betrachtet werden.

2. Arbeitsprogramm

Das Arbeitsprogramm im Rahmen dieses Forschungsvorhabens unterteilte sich in vier Projektphasen. Die einzelnen Projektphasen waren in unterschiedliche Arbeitspakete (AP) gegliedert. Die vorangegangenen Projektphasen 1 und 2 sowie 3 wurden in Zwischenberichten bereits dokumentiert.

Die Projektphase 4 wurde in den Jahren 2024 und 2025 durchgeführt. Die Publikation der Ergebnisse erfolgt künftig auf Fachtagungen, in der Fachliteratur sowie über elektronische Medien, wie dem IKT – eNewsletter.

2.1 Projektphase 1 (durchgeführt)

Arbeitspaket 1 - Projektkoordination mit Abstimmungsgesprächen

Es wurde eine interdisziplinäre Teilnehmergruppe mit Fachleuten aus Kanalbau und – betrieb sowie Mitarbeitern aus Stadtentwässerung und Grünflächenamt gebildet. Während der Projektphasen wurden begleitende Abstimmungsgespräche durchgeführt. In den Abstimmungsgesprächen wurden Kriterien zur Beurteilung der Wirksamkeit der jeweiligen Maßnahmen erarbeitet und darauf aufbauend das Versuchsfeld geplant. Die Ergebnisse der Aufgrabungen sollen in der dritten Projektphase in den Abstimmungsgesprächen unter bautechnischen, biologischen und baumpflegerischen Aspekten diskutiert und beurteilt werden.

Arbeitspaket 2 - Qualifizierte Marktübersicht „Leitungsschutzmaßnahmen“

In einem ersten Schritt erfolgte eine Recherche zu Systemen und Produkten von passiven Leitungsschutzmaßnahmen nach DWA-M 162 im niederländischen und deutschsprachigen Raum. Die ermittelten Anbieter von porenaumarmen Verfüllstoffen, Platten, Folien, Rohrverbindungen etc. wurden kontaktiert und die Produkte in einer Marktübersicht zusammenfassend dargestellt.

2.2 Projektphase 2 (durchgeführt)

Arbeitspaket 3 - Einbau von passiven Schutzelementen und Anschauungsobjekt

Für den Einbau von passiven Schutzmaßnahmen und der Erstellung eines Anschauungsobjektes für die Öffentlichkeit wurde ein neues, weltweit einzigartiges Versuchsfeld in Almere geplant und gebaut. Als Grundlage für die Entwicklung und den Bau des Versuchsfeldes in Almere diente u.a. die Marktübersicht aus AP2. Die Auswahl der im Versuchsfeld eingesetzten Systeme erfolgte insbesondere aufgrund der Relevanz der Systeme für die Gemeinde Almere und der Bestellmöglichkeit der Baufirma bei niederländischen Lieferanten. Um die Untersuchungen einer breiten Öffentlichkeit zur Verfügung zu stellen, wurden zu Beginn und Ende des Versuchsfeldes vertikale Glasabdeckungen installiert, um den unterirdischen Aufbau einer Leitungstrasse darstellen zu können (vgl. Kapitel 3).

Arbeitspaket 4 - Wissenschaftlicher Zwischenbericht

Die Ergebnisse der ersten zwei Arbeitspakete wurden in einem wissenschaftlichen Zwischenbericht zusammengefasst.

2.3 Projektphase 3 (durchgeführt zur FLORIADE 2022)

Arbeitspaket 5 - Ausgrabungen vor Ort

Im Jahr 2022 zur Floriade in Almere wurden Teile der eingesetzten passiven Leitungsschutzmaßnahmen und Rohrverbindungen freigelegt. Die Wurzelausbreitung und mögliche Interaktionen zwischen Wurzeln und den Komponenten der Schutzmaßnahmen wurden dabei erfasst und dokumentiert. Im Anschluss wurden die geöffneten Baugruben wieder mit dem Ausgangsmaterial verfüllt, sodass die Funktion des Versuchsfelds weiter gewährleistet war.

Arbeitspaket 6 - Wissenschaftlicher Zwischenbericht:

Die Ergebnisse der Arbeitspakte wurden in einem wissenschaftlichen Zwischenbericht zusammengefasst.

Arbeitspaket 7 – TV-Inspektion 2023

2.4 Projektphase 4

Arbeitspaket 8 – Weitere TV-Inspektion und Aufgrabung 2024

Fortlaufende Untersuchung der gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich des Wurzelverhaltens an den Rohrverbindungen durch eine TV-Inspektion.

Durchführung einer erneuten Aufgrabung (nach 2 weiteren Wachstumsperioden) an den Wurzelbarrieren, dem porenaumarmen Verfüllstoff und Rohrverbindungen. Dabei können die weitere Wurzelausbreitung sowie die bisherigen Wurzelinteraktionen beobachtet werden.

Arbeitspaket 9

Die Ergebnisse der Arbeitspakte wurden in diesem wissenschaftlichen Abschlussbericht zusammengefasst.

3. Versuchsfeld in Almere (NL)

Aufbauend auf der Marktübersicht von passiven Leitungsschutzmaßnahmen, den dazugehörigen Prüfverfahren und dem Austausch im Projektkreis (Projektphase 1) wurde ein Versuchsaufbau zur Untersuchung u.a. von unterschiedlichen passiven Schutzmaßnahmen gegen Wurzeleinwuchs entwickelt (Projektphase 2). Die Auswahl der im Versuchsfeld eingesetzten Systeme erfolgte insbesondere aufgrund der Relevanz der Systeme für die Gemeinde Almere und der Bestellmöglichkeit der Baufirma bei niederländischen Lieferanten. Untersucht wurden Rohrverbindungen, Folien und Platten sowie ein porenaumärmer Verfüllstoffe.

Der Versuchsaufbau war frei zugänglich in der Enrico Fermistraat (auf Höhe der Bushaltestelle Enrico Fermistraat) in Almere, Niederlande ca. drei Meter unter Normalhöhennull auf dem ehemaligen Grund des IJsselmeeres (vgl. [18]). Eine Beeinflussung durch den mittleren Grundwasserspiegel konnte ausgeschlossen werden.

Versuchsaufbau

Ziel des Versuchsaufbaus war ein Screening von Lösungswegen mit unterschiedlichen Systemen und Produktbeispielen zum passiven Schutz von Abwasserleitungen und -kanälen gegen Wurzeleinwuchs: Es wurden an einer Baumreihe mit fünf neu gepflanzten Bäumen (Pappeln der Gattung *Populus c. Robusta*) insgesamt 15 gesteckte Rohrverbindungen, acht Folien bzw. Platten sowie ein porenaumärmer Verfüllstoff auf ihre Wirksamkeit untersucht. Auf den zwei Längsseiten zur Baumreihe bildete jeweils eine Abwasserleitung den äußeren Rahmen des Versuchsaufbaus. Quer zur Baumreihe war je Baum auf jeder Seite eine Folie bzw. Platte oder porenaumärmer Verfüllstoff eingebaut (vgl. Abbildung 1). Durch das Umschließen des Baumes mit Systemen bzw. Rohrverbindungen sollten Interaktionen der Wurzeln mit den Systemen provoziert werden.

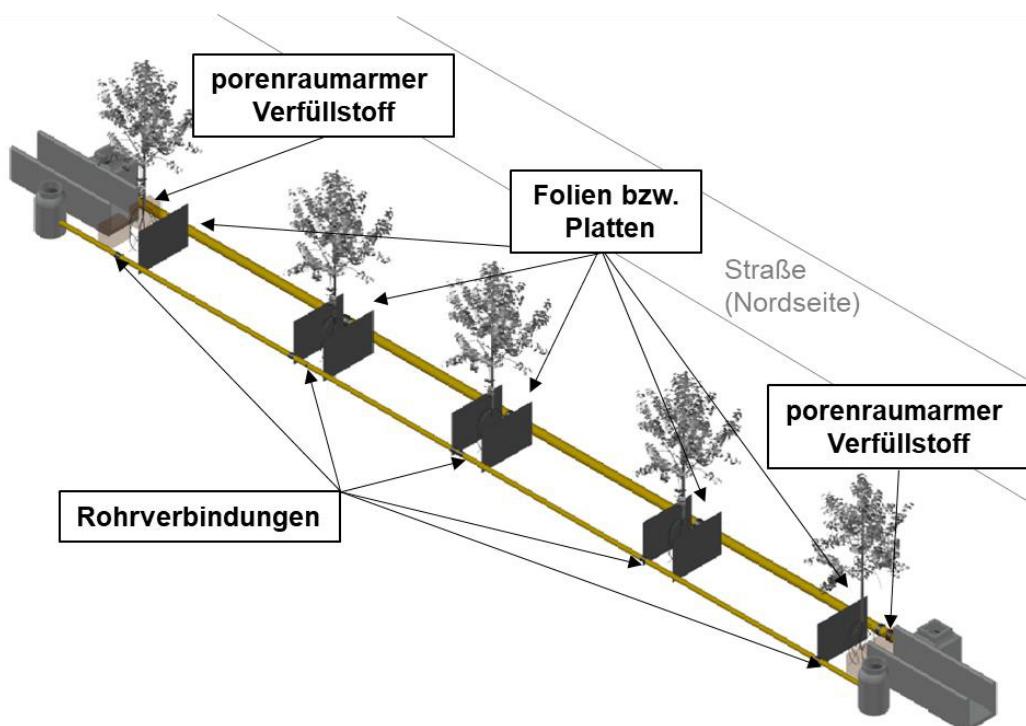


Abbildung 1: Versuchsaufbau in Almere (NL)

Die Rohrleitungssohlen befinden sich in einer Tiefe von 1,2 Metern, was einer häufigen Überdeckungshöhe von Abwasserleitungen und -kanälen in Almere entspricht. Aufgrund des hohen Grundwasserstandes wurde das Versuchsfeld um diese 1,2 Meter aufgeschüttet. Die Länge des Versuchsfeldes bzw. der Rohrleitungen beträgt 33 Meter und der Abstand zwischen den Rohrleitungsachsen beträgt 2,4 Meter. Die Abstände zwischen den Bäumen (Bezeichnung der Bäume: T1-T5) variieren von 6,4 bis 7,7 Metern und sind an die eingesetzten Standard-Rohrlängen der jeweiligen Werkstoffe angepasst, um ein unnötiges Kürzen der Rohrleitungen zu vermeiden. Die Rohrleitung in Richtung Straße (Nordseite) hat eine Nennweite von DN 300, die Rohrleitung an der Südseite DN 150. Die Bemaßung des Versuchsfeldes ist in Abbildung 2 dargestellt.

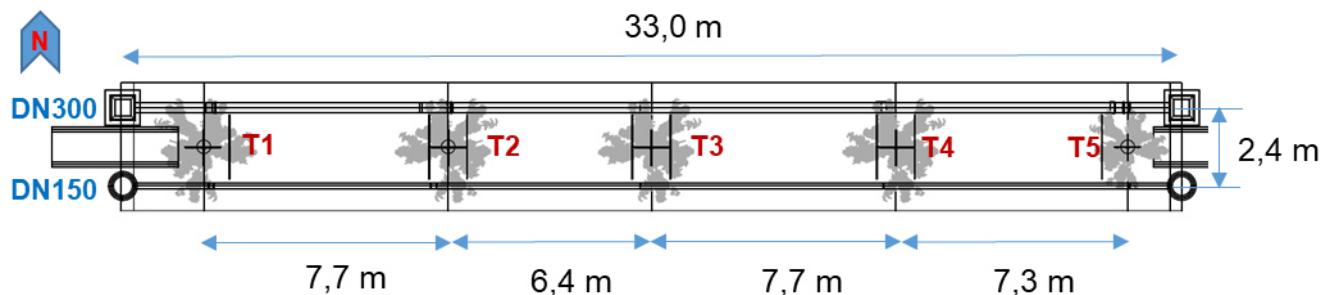


Abbildung 2: Bemaßung des Versuchsfeldes

In beiden Rohrleitungen sind jeweils sieben Rohrverbindungen bzw. Werkstoffübergänge installiert. Somit kann je Baum und Rohrleitung mindestens eine Verbindung untersucht werden. Die Werkstoffe der Verbindungsarten und die Bezeichnungen der einzelnen Verbindungen sind folgend in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Werkstoffe der Rohrleitungen mit Rohrverbindungen bzw. Werkstoffübergängen

Werkstoff	Anzahl	Kennung ID
DN 300		
Beton	2	C1, C2 (Standard-Steckmuffen)
PVC	1	C3 (Standard-Steckmuffe)
PP	1	C4 (Standard-Steckmuffe)
GFK	1	C5 (Standard-Steckmuffe)
Werkstoffübergang Beton/PVC	1	MT1 (Übergangsmanschette)
Werkstoffübergang Beton/GFK	1	MT2 (Übergangsmanschette)
DN 150		
PVC	3	C6, C7, C9 (Standard-Steckmuffen)
PVC	1	C8 (Bentonitband)
PVC	1	C10 (Schrumpfschlauch)
PP	2	C11-C12a/b (Standard-Steckmuffen)

Legende: C = Connection/Verbindung; MT = Material Transition/Werkstoffübergang

Die Auswahl der Werkstoffe bzw. Werkstoffübergänge orientiert sich an den eingesetzten Werkstoffen in Almere. Die Verbindungen C1-7, C9 und C11-12 sind Standard-Steckmuffenverbindungen der jeweiligen Werkstoffe. Die Verbindung C8 ist ein an der Rohraußenseite befestigtes, experimentelles Bentonitband. Die Verbindung C10 ist ein

Schrumpfschlauch aus PVC. Die Werkstoffübergänge MT1 und MT2 sind Übergangsmaneschetten für die jeweiligen Rohrwerkstoffe. Die Anordnung der Rohrverbindungen und Werkstoffübergänge sind in Abbildung 3 dargestellt. Je nach Versuchsanordnung finden sich ein bis maximal zwei Rohrverbindungen bzw. Werkstoffwechsel je Rohrleitung und Baum.

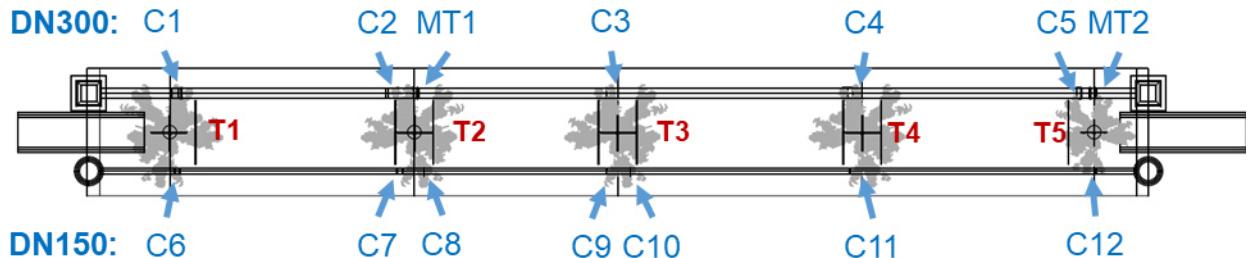


Abbildung 3: Anordnung der Rohrverbindungen (C1-C12) und Werkstoffübergänge (MT1-MT2) in den zwei Rohrleitungen (DN150, DN300) an den Bäumen (T1-T5)

Jeder Baum wird auf der West- und Ostseite von Folien bzw. Platten (FP1-FP8) oder porenaumarmen Verfüllstoffen (S) eingerahmt. An den Bäumen T2 bis T4 sind beidseitig Folien bzw. Platten installiert sowie an den Bäumen T1 und T5 an einer Seite porenaumarme Verfüllstoffe und auf der gegenüberliegenden Seite Folien bzw. Platten (vgl. Abbildung 4).

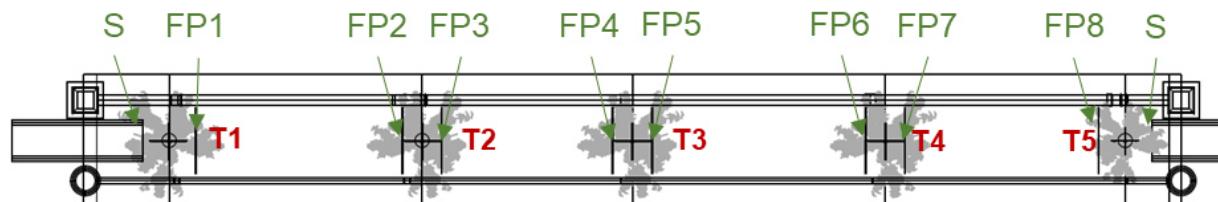


Abbildung 4: Anordnung der Folien bzw. Platten (FP1-FP8) und porenaumarmen Verfüllstoffe (S) an den Bäumen (T1-T5)

Als porenaumarmer Verfüllstoff wird ein Schüttgut zur mineralischen Kapselung von Rohrleitungen eingesetzt.

Die Werkstoffe, Verbindungsarten und Bezeichnungen der Folien bzw. Platten sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Werkstoffe, Verbindungsarten und Bezeichnungen der Folien bzw. Platten

Art	Werkstoff	Verbindungsart	Bezeichnung
Folie	PE-HD	ohne Verbindung	FP1
Folie	PE-HD	stecken/einschieben	FP2
Platte	PP	stecken/einschieben	FP3
Platte	PE-HD	ohne Verbindung	FP4
Folie	PE-HD	ohne Verbindung	FP5
Folie	PE-HD	verschraubt/geklebt	FP6
Folie	PE-HD	verschraubt	FP7
Folie	PE-HD	ohne Verbindung	FP8

Legende: FP = Foils and Plates/Folien und Platten

Am Anfang und am Ende des Versuchsfeldes befindet sich jeweils ein Anschauungsobjekt zur Öffentlichkeitsarbeit. Dazu ist an einem Beton-U-Profil an einer Seite eine transparente Polycarbonatplatte vertikal befestigt und in das aufgeschüttete Erdreich eingebaut. Neben der Hauptverfüllung sind zur Ansicht eine Rohrleitung mit Steckmuffenverbindung und das porenaarme Verfüllmaterial (S) sichtbar (vgl. Abbildung 5, links). Die Rohrleitung ist zur anschaulichen Darstellung des Versuchsfeldes eingebaut und ist nicht Teil der Untersuchungen.

Ziel des Anschauungsobjektes ist es, das Wurzelwachstum an unterirdischen Leitungen darzustellen. Es soll Wurzelwuchs zur Polycarbonatplatte hin provoziert werden und bestenfalls ein „Entlangwachsen“ der Wurzeln an der Polycarbonatplatte und zwischen Rohrleitung und Verfüllstoff stattfinden. Ergänzt wird die Öffentlichkeitsarbeit mit einer Informationstafel (vgl. Abbildung 5, rechts).



Abbildung 5: Blick auf das Anschauungsobjekt (links), Informationstafel (rechts)

4. Untersuchungsprogramm

Der Aufbau des Versuchsfeldes erfolgte im Winter 2018/2019 durch eine niederländische Tiefbaufirma. Zunächst wurden die Schachtbauwerke gesetzt und anschließend die Rohrleitungen installiert. Mit der Aufschüttung wurden die Folien bzw. Platten und der porenraumarme Verfüllstoff eingebaut. Zum Abschluss der Bauarbeiten wurden die wurzelnackten Pappel-Jungbäume eingesetzt. Die anschließende Baumpflege erfolgte durch die Gemeinde Almere.

In der vierten Projektphase wurden TV-Inspektionen und eine erneute Aufgrabung durchgeführt, um das mehrjährige Wurzelwachstum (sechs vollständige Wachstumsperioden) und die Interaktion der Wurzeln mit den passiven Schutzmaßnahmen und Rohrleitungen zu untersuchen. Die Aufgrabungen fanden im Sommer 2024 statt.

Innerhalb des Projektzeitraumes wurden Prüfungen und Untersuchungen durchgeführt, um fortlaufende Erkenntnisse hinsichtlich der Aufgabenstellung zu dokumentieren.

Tabelle 3 stellt die durchgeführten Prüfungen und Untersuchungen über den Projektzeitraum dar.

Tabelle 3: Zeitlicher Ablauf während der Projektlaufzeit

Untersuchung	2019	2021	2022	2023	2024
TV-Inspektion	✓	✓	✓	✓	✓
Dichtheitsprüfung	✓		✓		
Aufgrabung vor Ort			✓		✓
Bodenprüfungen			✓		

5. Überblick über die Untersuchungsergebnisse der vorherigen Projektphasen

Zunächst erfolgt ein allgemeiner Überblick über die wesentlichen Ergebnisse der Projektphasen 1-3.

Die Untersuchungen fanden zwischen 2019 und 2023 statt und umfassten die Erfassung des Einbauzustands, mehrere TV-Inspektionen, Dichtheitsprüfungen, Bodenprobenentnahme sowie Zwischenaufgrabungen zur Erfassung von Wurzelinteraktionen.

5.1 Untersuchungen an den Rohrverbindungen

5.1.1 TV-Inspektionen

TV-Inspektionen beider Leitungen mittels einer Schiebekamera wurden in den Jahren 2019 (Ersterfassung), 2021, 2022 und 2023 durchgeführt.

Bei der Erstinspektion (2019) wurden keine besonderen Auffälligkeiten an den Rohrverbindungen festgestellt. Lediglich an der Verbindung C8 (Bentonitband) wurde ein Dichtmaterial im Rohrumfang sichtbar, jedoch wurde kein Wurzeleinwuchs dokumentiert.

Bei der TV-Inspektion 2021, die nach einer Hochdruckspülung der Leitungen durchgeführt worden ist, wurden an zehn Rohrverbindungen sichtbare Wurzelfragmente dokumentiert. Bei neun Verbindungen waren Wurzeln im Muffenbereich sichtbar. Bei der Verbindung C8 wurde ein Wurzeleinwuchs festgestellt. Im Anschluss an diese Untersuchung wurde im Folgenden auf eine Hochdruckspülung verzichtet.

Die TV-Inspektion 2022 dokumentierte erneut einen Wurzeleinwuchs an der Verbindung C8. An allen anderen Rohrverbindungen waren keine Wurzeln sichtbar.

Im Jahr 2023 wurden bei der TV-Inspektion an vier Verbindungen Wurzeln sichtbar dokumentiert. Der Wurzeleinwuchs an Verbindung C8 wurde wieder festgestellt.

5.1.2 Dichtheitsprüfungen

Im Rahmen des Projekts wurden in den Jahren 2019 und 2022 Dichtheitsprüfungen an den Rohrverbindungen [15] durchgeführt.

Es konnte festgestellt werden, dass bei der Rohrleitung DN 300 die Ergebnisse aus 2019 auch bei der Prüfung 2022 mit den gleichen Ergebnissen bestätigt wurden. Hier wurden jeweils vier Prüfungen an Verbindungen nicht bestanden.

Bei der DN 150 Leitung zeigten sich große Unterschiede, so wurde 2019 nur eine Prüfung nicht bestanden, wohingegen 2023 sechs Prüfungen nicht bestanden worden sind. Es besteht die Annahme, dass die im Vergleich zu 2019 nicht bestandenen Prüfungen auf den Betriebszustand (Sandablagerungen) der Leitungen zurückzuführen sind und nicht auf undichte Rohrverbindungen. Die vorhandenen Sandablagerungen werden den Ablauf der Dichtheitsprüfung behindert haben und folglich ein falsch negatives Ergebnis verursacht haben.

Aus diesem Grund wurden keine weiteren Dichtheitsprüfungen in den folgenden Jahren durchgeführt.

5.1.3 Zwischenaufgrabung an den Rohrverbindungen

Die Zwischenaufgrabungen im Jahr 2022 zeigten ein intensives Wurzelwachstum an allen Baumstandorten. Bei den durchgeföhrten Aufgrabungen an 15 Rohrverbindungen wurden drei Hauptarten von Wurzelinteraktionen festgestellt.

Bei 13 von 15 Rohrverbindungen wurde **Wurzelanwuchs an der Muffe oder im unmittelbaren Muffenbereich** festgestellt.

Zwei Rohrverbindungen (C8 und C9) zeigten ein potenzielles Eindringen in die Rohrverbindung durch sichtbaren **Wurzeleinwuchs in die Muffe**. Das bei Rohrverbindung C8 eingebaute Bentonit-Band wurde an einer Seite des Bandes durchwachsen und die ca. 1 cm starke Wurzel trat auf der anderen Seite wieder aus.

Wurde die Wurzel bei Rohrverbindung C9 unter geringe Spannung gebracht und damit auf leichtes Herausziehen geprüft, war dieses nicht möglich

Zwei Rohrverbindungen zeigten **keine Wurzelinteraktion** (C3 und C12a).

5.2 Untersuchungen an den Wurzelbarrieren

5.2.1 Zwischenaufgrabung an den Wurzelbarrieren

Im Versuchsfeld wurden an fünf Standorten insgesamt acht Wurzelbarrieren eingebaut und nach 42 Monaten auf Wurzelinteraktionen untersucht. Dabei zeigte sich, dass Wurzeln unter den gegebenen Bedingungen in der Lage sind, die Barrieren zu überwinden.

Bei sechs von acht Wurzelbarrieren wurden die Folien oder Platten in unterschiedlichen Tiefen bereits nach vier Wachstumsperioden **unterwachsen**. Außerdem wurde beobachtet, dass Wurzeln nach dem Unterwachsen der Barriere wieder nach oben wachsen können.

An allen Barrieren mit Steck- oder Schraubverbindungen drangen Feinwurzeln in die Verbindungsstellen ein (**Ein- und Durchwachsen**). Dazu konnte beobachtet werden, dass eine Wurzelbarriere an den Rändern seitlich **umwachsen** worden ist.

5.2.2 Zwischenaufgrabung am porenaumarmen Verfüllstoff

Im Versuchsfeld wurde ein porenaumärmer Verfüllstoff als Wurzelbarriere eingesetzt, der ursprünglich zur mineralischen Kapselung von Rohrleitungen dient. Bei den Zwischenaufgrabungen 2022 zeigte sich, dass keine Wurzeln in den Verfüllstoff eingewachsen waren. Stattdessen wuchsen sie entlang der Trennfläche zwischen Verfüllstoff und angrenzendem Boden.

5.2.3 Bodenkundliche Untersuchungen

Im Zuge der Aufgrabungen wurden Bodenproben am Baumstandort T2 entnommen. Aufgrund der Aufschüttung des Versuchsfeldes von 1,20 m konnte von einheitlichen Bodenverhältnissen ausgegangen werden und im Verlauf der Aufgrabungen ergaben

sich keine gegenteiligen Anhaltspunkte. Ziel war es, die Bodenverhältnisse auf der baumseitigen (Innenseite) und der gegenüberliegenden (Außenseite) Seite der Wurzelbarriere zu vergleichen.

Am Standort T2 wurden beispielhaft für das gesamte Versuchsfeld insgesamt fünf Proben aus folgenden Tiefen entnommen:

- Innenseite (Baumseite): 0,2 m, 0,4 m und 0,9 m unter Geländeoberkante
- Außenseite (Nicht-Baumseite): 0,4 m und 1,0 m unter Geländeoberkante

Die Proben wurden durch ein externes Bodenlabor hinsichtlich Wassergehaltes, Trockendichte, Korndichte, Wasserdurchlässigkeit und Bodenart analysiert [vgl. 12,13,14].

Alle Proben wurden als Mittelsand mit Feinsand- und schwach Grobsandanteilen (csaf-saMSa) klassifiziert. Die Wasserdurchlässigkeit lag auf der Innenseite zwischen $2,82 - 4,36 \times 10^{-5}$ m/s und auf der Außenseite zwischen $2,03 - 2,05 \times 10^{-5}$ m/s. Alle Proben gaben nach DIN 18130 als „durchlässig“. Der Wassergehalt lag bei 5,4 M.-% im gleichen Spektrum wie die anderen genommenen Proben am Standort T2. Auch die Werte der Korndichte mit 1,642 g/cm³ und Trockendichte 1,558 g/cm³ ordneten sich an den anderen Proben an.

Folglich lagen auf der Innen- und Außenseite der Wurzelbarrieren hinsichtlich der untersuchten Parameter weitgehend vergleichbare Bodenverhältnisse vor.

6. Untersuchungsdurchführung und -ergebnisse 2024

Das Versuchsfeld wurden im Winter 2018/2019 mit dem Bau gestartet und die abschließenden Untersuchungen fanden im Sommer 2024 statt. Im Anschluss wurde das Versuchsfeld abgeräumt.

6.1 Bäume im Versuchsfeld

Alle fünf Bäume haben sich über die Projektzeit gut entwickelt und wiesen eine gesunde Vitalität auf und zeigten optisch keine Erkrankungen sowie Auffälligkeiten. Die durchschnittlichen Baumeigenschaften [vgl. Anhang Auswertung Bäume] ließen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Standzeit im Versuchsfeld betrug sechs Jahre,
- die Baumhöhe aller Bäume betrug ca. 8 -10 m,
- der Stammdurchmesser betrug in ein Meter Höhe ca. 18 cm und
- der Kronendurchmesser betrug ca. 4 m.
- Bei allen Öffnungen des Baumstandortes konnte ein ausgeprägtes Wurzelwachstum festgestellt werden.

Die Aufgrabungen an den Baumstandorten, Rohrverbindungen und Wurzelbarrieren erfolgte mit Einsatz eines Saugbaggers sowie einer Druckluftlanze, um bestmöglich sicherzustellen, dass keine Wurzeln abgerissen oder beschädigt werden. Dabei wurden an den Seiten des Baumes seitliche Gräben (ca. 4 m Länge x 1 m Breite x 1,30 m Tiefe) offengelegt. Dadurch konnten die Rohrverbindungen freigelegt werden und die Wurzelbarrieren bis unter ihre maximal Einbautiefe untersucht werden.



Abbildung 6: Beispielhaftes Vorgehen zur Erstellung der Untersuchungsgräben an den Baumstandorten (Links: Einsatz des Saugbaggers mit Druckluftlanze nach Entfernung der Grasnarbe, Rechts: Abstützung eines seitlichen Untersuchungsgrabens)

In der Verlängerung des Versuchsfeldes standen fünf, zur selben Zeit und in gleicher Weise, gepflanzten Bäume zur Untersuchung der Auswirkungen verschiedener Baumsubstrate. Zwei dieser Bäume wurden nicht aufgegraben und dienten hier als Kontrolle. Sie zeigten dieselbe Wuchsleistung und denselben Zustand wie die Bäume im Versuchsfeld. Obwohl die vorausgegangenen Aufgrabungen 2022 in nur einem Meter Abstand vom Stamm durchgeführt wurden, ergaben sich daraus offensichtlich keine negativen Auswirkungen für das weitere Wachstum der Bäume. Voraussetzung dafür waren sicherlich die sorgfältige Aufgrabung und die anschließende sofortige Verfüllung mit durchdringender Wässerung (ca. 300 l pro Baum). Nach Ende der Aufgrabung wurde die Wurzel eines Baumes vollständig ausgehoben. Er zeigte sich, dass die an diesem Standort ausgebildete Pfahlwurzel auf der Grabensohle endete. Wurzeln können den verdichteten Horizont der Grabensohle offenbar auch dann nicht durchdringen, wenn dieser keine Grenze unterschiedlicher Substrate darstellt. Vor allem bei in geringen Tiefen verlegten Leitungen kann dies die Standfestigkeit großer Bäume unter Umständen stark beeinträchtigen.

6.2 Rohrverbindungen

6.2.1 TV-Inspektion

Bei der TV-Inspektion 2024 mit einer Schiebekamera wurde die identische Untersuchungssystematik wie in den Jahren zuvor angewendet, um fortlaufende Entwicklungen sichtbar zu machen. In Abstimmung mit dem Projektkreis wurde wieder auf eine Reinigung vor der TV-Inspektion verzichtet.

Der Untersuchungssystematik folgend wurden die Rohrverbindungen auf drei unterschiedliche Fälle untersucht:

- Wurzelfragmente im Bereich der Rohrverbindung und -leitung **sichtbar**
- Wurzeln am Umfang der Rohrverbindung **eingewachsen**
- Wurzeln in Rohrverbindung und -leitung **nicht sichtbar**

Folgend sind die Ergebnisse der TV-Inspektion an den Rohrverbindungen und Werkstoffwechseln in der Tabelle 4 dargestellt.

Die durchgeführte TV-Inspektion stellte fest, dass in der Leitung DN 150 bei der Rohrverbindung C8 ein Wurzeleinwuchs stattgefunden hat. Dazu waren bei Verbindung C7 Wurzeln sichtbar. Bei den restlichen Verbindungen konnten keine Wurzeln festgestellt werden.

In der Leitung DN 300 konnten bei der Rohrverbindung C2 sowie bei der Übergangsmanschette MT1 Wurzeln sichtbar festgestellt werden. Alle anderen Verbindungen zeigten keine Auffälligkeiten.

Tabelle 4: Ergebnisse der TV-Inspektion 2024

Kennung ID	2024		
	sichtbar	eingewachsen	nicht sichtbar
DN 300			
C1	--	--	✓
C2	✓	--	--
C3	--	--	✓
C4	--	--	✓
C5	--	--	✓
MT1	✓	--	--
MT2	--	--	✓
DN 150			
C6	--	--	✓
C7	✓	--	--
C8	--	✗	--
C9	--	--	✓
C10	--	--	✓
C11	--	--	✓
C12a	--	--	✓
C 12b	--	--	✓

Legende: ✓ = Wurzeln, ✗ = eingewachsen

6.2.2 Aufgrabung

Bei den Aufgrabungen an den Rohrverbindungen konnten unterschiedliche Wurzelinteraktionen festgestellt werden (vgl. Anhang Auswertung Rohrverbindungen).

Folgende Systematik aus dem Jahr 2022 wurde zur Untersuchung angewendet. Ziel war hier, fortlaufende Entwicklungen sichtbar zu machen.

- **Wurzelanwuchs** von Wurzeln an den Muffenspalt oder Wurzeln im unmittelbaren Muffenbereich der Rohrverbindung (13 von 15 Rohrverbindungen)
- **Wurzeleinwuchs** von Wurzeln in die Rohrverbindung (4 von 15 Rohrverbindungen)
- **Keine Wurzelinteraktion** (2 von 15 Rohrverbindungen)

Bei den Verbindungen C12a und C3 wurde nach der Projektlaufzeit von sechs Jahren keine Wurzelinteraktion festgestellt. Bei den restlichen Verbindungen wurde optisch ein Anwuchs von Wurzeln an den Muffenbereich sowie -spalt beobachtet. An den Verbindungen C8, C9, C12b sowie MT1 wurde darüber hinaus ein optischer Wurzeleinwuchs von außen in die Verbindung festgestellt. Inwieweit und ob ein Einwuchs in die Muffen und eine Überwindung der Dichtung erfolgt ist, war optisch von außen nicht ersichtlich.

Die im Muffenbereich gewachsenen Wurzeln der Rohrverbindung MT1 (Übergangsmanschette) haben deutlich mit der Verbindung interagiert. Gleiches war auch an der Rohrverbindung MT2 festzustellen. Grundsätzlich bestanden die Übergangsmanschetten aus mehreren Einzelementen. Es war festzustellen, dass sowohl an den Metallelementen als auch an den Kontaktflächen der Verbindungen Wurzeln gewachsen sind. Eine Wurzel bei der Rohrverbindung MT1 war in einen Zwischenbereich zwischen Teilen der Manschette hineingewachsen und war fest verankert (vgl. Abbildung 7). Die Verbindung MT2 war ohne Wurzeleinwuchs.



Abbildung 7: Wurzeleinwuchs in Übergangsmanschette MT1 (Links: Draufsicht auf den Muffenbereich, Rechts: Eine Wurzel ist einen Zwischenbereich der Verbindung eingewachsen)

Das bei Rohrverbindung C8 eingebaute Bentonit-Band wurde an einer Seite des Bandes durchwachsen und die ca. 1 cm starke Wurzel trat auf der anderen Seite wieder aus (vgl. Abbildung 8 links). Bei der Standardmuffenverbindung C9 konnte ein gefestigter Einwuchs in den Muffenspalt dokumentiert werden (vgl. Abbildung 8 rechts). Bei Anwendung von geringer Fingerkraft zum Herausziehen war keine Bewegung der Wurzel im Muffenspalt spürbar.



Abbildung 8: Wurzeleinwuchs in den Muffenspalt (Links: C8 Wurzel unterwächst das Bentonitband, Rechts: C9 Wurzel fest verankert in PP Standardmuffe,)

Bei Rohrverbindung C12b (Standard-Steckmuffe) sind Wurzeln an den Muffenbereich herangewachsen und teilweise am Rohr in den angrenzenden Bodenkörper abgelenkt worden. An einer Seitenkante der Verbindung wurden zudem Wurzeln im Muffenspalt festgestellt, welche auch nicht wieder herausgewachsen sind. Es war von außen nicht eindeutig erkennbar, wie weit Wurzeln eingewachsen sind (vgl. Abbildung 9).



Abbildung 9: Wurzeleinwuchs in Muffenspalt von Rohrverbindung C12b (Standardsteckverbindung) (Links: Wurzeln im Muffenbereich, Rechts: Wurzeln in Muffenspalt verankert)

Die folgende Tabelle 5 zeigt die Übersicht der Aufgrabungsergebnisse an Rohrverbindungen.

Tabelle 5: Ergebnisse der Aufgrabungen an den Rohrverbindungen

Ken-nung ID	Werkstoff	Muffenart	Wurzelanwuchs an Muffe	Wurzeleinwuchs in Muffe
DN 300				
C1	Beton	Stand. Steckmuffe	✓	--
C2	Beton	Stand. Steckmuffe	✓	--
C3	PVC	Stand. Steckmuffe	--	--
C4	PP	Stand. Steckmuffe	✓	--
C5	GFK	Stand. Steckmuffe	✓	--
MT1	Beton/PVC	Übergangsman-schette	✓	✓
MT2	Beton/GFK	Übergangsman-schette	✓	--
DN 150				
C6	PVC	Stand. Steckmuffe	✓	--
C7	PVC	Stand. Steckmuffe	✓	--
C8	PVC	Bentonitband	✓	✓
C9	PVC	Stand. Steckmuffe	✓	✓
C10	PVC	Schrumpschlauch	✓	--
C11	PP	Stand. Steckmuffe	✓	--
C12a	PP	Stand. Steckmuffe	--	--
C12b	PP	Stand. Steckmuffe	✓	✓

Legende: ✓ = vorgefunden, -- = nicht vorgefunden

Während der Aufgrabungen an den Rohrverbindungen konnten weitere Wurzel-Rohr-Interaktionen beobachtet werden, die die oben aufgeführte Untersuchungssystematik ergänzten.

An einzelnen Rohrverbindungen (u.a. C1, C2 und C5) konnte beobachtet werden, dass Wurzeln an den Muffenspalt herangewachsen sind und auch in diesen eingewachsen sind. Im Folgenden war festzustellen, dass diese Wurzeln anschließend an anderer Stelle den Muffenspalt wieder verlassen haben und in eine andere Richtung gewachsen sind.

Bei den Rohrverbindungen C6 und C11 war festzustellen, dass Wurzeln im Muffenbereich gewachsen sind. Diese sind dabei auf der einen Seite oberhalb des Rohrscheites gewachsen und auf der anderen Seite auch unterhalb der Rohrleitung gewachsen.

Wurzeln bei den Rohrverbindungen C3, C7 und C12a sind auf die Rohrleitung getroffen und sind an dieser abgelenkt worden. Dabei fand zunächst ein Wuchs an der Oberfläche

bzw. Rohrumfang der Rohrleitung statt und anschließend ein Weiterwachsen in den angrenzenden Bodenkörper. Sowohl an der Wurzel als auch an der Rohrleitung war keine Schädigung sichtbar.

Bei den Rohrverbindungen C1, C6 und den Übergangsmanschetten MT1 und MT2 zeigte sich ein Wachstum entlang der Rohrleitung. Dieses erfolgte sowohl in horizontaler Richtung und parallel zur Leitung als auch in vertikaler Richtung unter Anpassung an den Rohrumfang der Leitung

Die Rohrverbindung C10 war eine Schrumpfschlauchverbindung. Hierbei konnte festgestellt werden, dass an die verklebten Seiten der Verbindung Wurzeln vereinzelt herangewachsen sind. Jedoch war optisch nicht erkennbar, dass Wurzeln in der Lage waren die Verbindung zu überwinden.



Abbildung 10: C10 Schrumpfschlauchverbindung ohne Wurzeleinwuchs an den Seitenrändern

Bei der Rohrverbindung C4 konnte festgestellt werden, dass ein Wurzelwachstum in der Rippenstruktur der Rohrleitung stattgefunden hat. Das Wurzelwachstum erfolgte dabei in den Rohrvertiefungen der Struktur des Rohres und passte sich dem Rohrumfang an.

6.2.3 Ergänzende Laboruntersuchung

Nach Beendigung der Aufgrabungen 2024 wurden die 15 zu untersuchenden Rohrverbindungen für eine weitergehende Untersuchung im Labor ausgebaut. Dafür wurden die Rohrverbindungen aus den beiden Rohrleitungen mittels eines Trennschleifers herausgesägt.

Im Labor wurden die Rohrverbindungen mit Wasser und Druckluft von Boden sowie Verschmutzungen gesäubert und fotografisch dokumentiert. Anschließend wurden die runden Rohrverbindungen durch zwei Schnitte (Rohrscheitel und Rohrsohle) in zwei Hälften durchtrennt. Dieses Vorgehen ermöglichte den Blick auf die Dichtung der verschiedenen Verbindungsarten.

Bei den durchgeführten Laboruntersuchungen konnten folgende Ergebnisse festgestellt werden:

- **Wurzeleinwuchs in die Rohrleitung** durch die Muffenverbindung (vier von 15 Rohrverbindungen)
- **Wurzeleinwuchs an das Dichtband** in der Muffenverbindung (elf von elf Rohrverbindungen)

Die Laboruntersuchungen zeigten, dass Wurzeln über den Zeitraum von sechs Jahren bis in den Muffenspalt und teilweise auch darüber hinaus in die Rohrleitung gewachsen sind.

Bei den Rohrverbindungen C7 und C11 (Standard-Steckmuffen) war festzustellen, dass Wurzeln bis an das Dichtungsband gewachsen sind. Anschließend sind Wurzeln über das Dichtungsband in die Verbindung gewachsen. Es war zu beobachtet, dass die Wurzeln, nach Erreichen des Bandes, zunächst entlang der Dichtung gewachsen sind. Dabei wurden feine Seitenwurzeln ausgebildet, welche frontal auf das Dichtungsband gewachsen sind und dieses überwunden haben.



*Abbildung 11: Wurzeleinwuchs in die Rohrleitung durch Muffenverbindung (Draufsicht)
(Links: C7 Wurzeln mit Seitenwurzeln sind nach Überwinden des Dichtungsbandes in der Rohrleitung, Rechts: C11 Wurzeln haben das Dichtungsband überwunden und wachsen auf der linken Seite in die Rohrleitung)*

Nach dem Schnitt der Rohrverbindung C1 war festzustellen, dass das Dichtungsband nicht fachgerecht eingebaut war, sondern verdreht war. Weiter war zu beobachten, dass eine Wurzel zentral unter der Dichtung entlang des Rohrumfanges gewachsen ist. Die Wurzel war etwa 1 cm breit und lediglich wenige Millimeter hoch.



Abbildung 12: C1 Wurzel wächst zentral unter einer Dichtung entlang des Rohrumfangs (Links: Verdrehtes Dichtungsband, Rechts: Ca. 1 cm breite Wurzeln am Dichtungsband)

Die Rohrverbindung C8 bestand aus einem experimentellen Bentonitband. Bei den Aufgrabungen war bereits erkennbar, dass eine Wurzel dieses unterwachsen hat. Weiter war festzustellen, dass diese Wurzel ebenfalls Seitenwurzeln in die Rohrleitung ausgebildet hat. Die folgende Abbildung zeigt eine 30cm lange Wurzel, die aus der Rohrleitung entnommen werden konnte.



Abbildung 13: Wurzeleinwuchs in Rohrverbindung C8 (Bentonitband) (Links: Wurzel unterwächst das Bentonitband, Rechts: Ca. 30 cm lange Wurzel aus Rohrleitung entnommen)

Bereits bei den Aufgrabungen wurde ein Wurzeleinwuchs der Rohrverbindung MT1 (Übergangsmanschette) festgestellt (vgl. Abbildung 7). Im Labor konnte dokumentiert werden, dass eine Wurzel entlang des Kunststoffelements der Rohrverbindung gewachsen ist und anschließend am Übergang zwischen dem Kunststoff-Rohr und Beton-Rohr in die Rohrleitung eingewachsen ist. In der Folge konnte eine ca. 7 m lange Wurzel entnommen werden.



Abbildung 14: Innenansicht der Rohrverbindung MT1 (Übergangsmanschette) (Links: Wurzel wächst innen entlang des Kunststoffelements, Rechts: Am Materialübergang wächst eine Wurzel (Dicke ca. 1 cm) in die Rohrleitung)

Insgesamt hatten elf von 15 eingebauten Rohrverbindungen ein Dichtungsband oder Dichtungskante in den Rohrverbindungen. Es war festzustellen, dass an allen Wurzeln an der Dichtung zu finden waren. Dabei sind in Teilen Wurzeln nach Erreichen der Dichtung am Band/Kante entlang gewachsen. In anderen Fällen sind Wurzeln nur an den äußeren Rand der Dichtung herangewachsen. Seitenwurzeln haben sich auch nicht in allen Fällen ausgebildet.



Abbildung 15: Beispiel für Wurzeln an der Dichtung (Links: C8 Wurzeln wachsen an Dichtungsband und anschließend an diesem entlang, Rechts: C2 Wurzeln wachsen in den Muffenspalt und wachsen bis an das Dichtungsbau)

Bei den Rohrverbindungen C10 (Schrumpfschlauch) und MT2 (Übergangsmanschette) sind keine Wurzelinteraktionen im Muffenspalt dokumentiert worden.

6.3 Wurzelbarrieren

6.3.1 Wurzelbarrieren (Folien und Platten)

Um bei der Auswertung der Aufgrabungsergebnisse 2024 eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten im Hinblick auf die Aufgrabung im Sommer 2022, wurde die identische Untersuchungssystematik angewendet. Ziel war hier eine fortlaufende Entwicklung sichtbar zu machen.

Im Unterschied zu den Aufgrabungen 2022 wurden die Wurzelbarrieren über die gesamte Breite ausgegraben und anschließend entnommen. Somit konnte der Wurzelverlauf auch auf der dem Baum zugewandten Seite untersucht werden.

Bei den Aufgrabungen konnten folgende Ergebnisse festgestellt werden:

- **Seitliches Umwachsen** an den seitlichen Rändern der Wurzelbarrieren (an 7 von 8 Wurzelbarrieren)



Abbildung 16: Seitliches Umwachsen von Wurzeln an den Rändern (Seitenansicht)

- **Ein- und Durchwachsen** von Verbindungen der Wurzelbarrieren (an 4 von 4 Wurzelbarrieren)



Abbildung 17: Beispiel: Durchwachsen von Wurzeln durch eine Steckverbindung (Draufsicht)

- **Unterwachsen der Wurzelbarrieren** unterhalb der jeweiligen Einbautiefe (an 8 von 8 Wurzelbarrieren)



Abbildung 18: Beispiel: Unterwachsen von Wurzeln unterhalb der Wurzelbarriere (Seitenansicht)

Die Untersuchungsergebnisse zeigten, dass alle im Versuchsfeld eingebauten Wurzelbarrieren über die Projektlaufzeit mit Wurzeln in Interaktion getreten sind. Die Tiefe der Wurzelbarrieren variierte zwischen 70 cm – 1,20 m unter Geländeoberkante abhängig von den Systemen.

Bei sieben von acht Wurzelbarrieren war erkennbar, dass an den Rändern ein Umwachsen der Kanten stattgefunden hat. Die Wurzeldurchmesser variierten dabei von Feinwurzeln bis zu Grobwurzeln. Bei der Platte FP3 waren lediglich erste Anfänge eines Umwachsens festzustellen.

Vier Wurzelbarrieren (FP 2, FP 3, FP 6, FP 7) bestanden aus Einzelementen und wiesen eine Plattenverbindung auf. In diesen Verbindungsarten waren Wurzeln sichtbar, die fest verankert waren und sich nicht herausziehen ließen. Dabei war kein Unterschied zwischen einer Steckverbindung oder Schraubverbindung zu erkennen.

Es konnte festgestellt werden, dass alle Wurzelbarrieren unterhalb der Unterkante der Folie/Platte unterwachsen worden sind und ein anschließender Wuchs in horizontaler oder schräger Richtung in den angrenzenden Boden stattgefunden hat. Die Wurzeln an der Barriere FP6 zeigten einen horizontalen Weiterwuchs, bei allen anderen Barrieren war ein Wuchs der Wurzeln in Richtung Geländeoberkante festzustellen.

Vier Systeme wiesen zur Baumseite eine Oberflächenstruktur (Noppen/Kanten/Rippen) auf. Während der Aufgrabung waren keine Wurzeln in den Strukturen erkennbar.

Die folgende Tabelle zeigt eine Übersicht der eingesetzten Wurzelbarrieren mit Angabe der Barrierenart, Tiefe der Unterkante, der Art der Verbindung, der Oberflächenstruktur und der vorgefundenen Wurzelinteraktion.

Table 1: Überblick der Aufgrabungsergebnisse für die Wurzelbarrieren

Ken-nung ID	Art	Unterkante unter GOK	Verbin-dung	Oberfläche Baumseite	Um-wach-sen	Ein-/Durch-wachsen	Unter-wachsen
FP 1	Folie	1,2 m	keine	strukturiert 1	✓		✓
FP 2	Folie	1,2 m	Stecken	glatt	✓	✓	✓
FP 3	Platte	1,2 m	Stecken	strukturiert 1	--	✓	✓
FP 4	Platte	0,9 m	Keine	strukturiert 1	✓		✓
FP 5	Folie	0,7 m	Keine	glatt	✓		✓
FP 6	Folie	1,1 m	Schrau-ben	glatt	✓	✓	✓
FP 7	Folie	1,0 m	Schrau-ben	glatt	✓	✓	✓
FP 8	Folie	1,1 m	keine	strukturiert 1	✓		✓

Legende: FP = Foils and Plates/Folien und Platten, 1 Noppen/Kanten/Rippen,

✓ = Wurzeln vorgefunden, -- = Wurzeln nicht vorgefunden,  = keine Verbindung

6.3.2 Porenraumarmer Verfüllstoff

An den Baumstandorten T1 (Westseite) und T5 (Ostseite) wurde neben den Wurzelbarrieren auch porenaumarmer Verfüllstoff (S) eingebaut. Der Einbau war in Blockform ausgeführt mit den Maßen von ca. 2,4 m Länge, 0,5 m Breite und 1,2 m Tiefe. Als Baustoff wurde ein Schüttgut zur mineralischen Kapselung von Rohrleitungen eingesetzt.

Die Untersuchungsergebnisse zeigten, dass nach der Einbauzeit von sechs Jahren der eingesetzte porenaumarme Verfüllstoff nicht länger resistent gegenüber Wurzeleinwuchs war (vgl. Anhang Auswertung porenaumärmer Verfüllstoff). Es war festzustellen, dass an mehreren Stellen ein zentraler Wurzelwuchs vom Baum an den Block stattgefunden hat. Im Anschluss war es Wurzeln mit einem Durchmesser von größer 2 cm möglich, Löcher im Verfüllstoff zu erzeugen.

Weiter konnte festgestellt werden, dass Wurzeln entlang der Trennfläche zwischen dem Bodenkörper aus porenaumarmem Verfüllstoff und dem Wurzelraum des Baumes gewachsen sind. Porenaumarme Verfüllstoffe der eingesetzten Art werden u.a. zur Abdichtung von Teichen eingesetzt. Sie verlieren ihre schützenden Wirkung, wenn sie vollständig austrocknen. Das Passiert, wenn sie in geringer Tiefe (wie im Versuchsfeld) eingesetzt werden und bei lang anhaltender Trockenheit wie sie im Sommer 2023 vorlag.



Abbildung 19: Aufgrabungsergebnisse am porenaumarmen Verfüllstoff (S) (Links: Wurzeln wachsen in den Block (Draufsicht), Rechts: Wurzel überwächst den Block oberhalb und quert diesen im Anschluss (Seitenansicht))

Die folgende Abbildung zeigt eine weitere Untersuchung aus dem Labor. Hierfür wurde eine Probe aus dem Block entnommen und im Detail analysiert. Es ist zu beobachten, dass die entnommene Probe an mehreren Stellen einen Wurzeleinwuchs zeigt. Die Abbildung zeigt, wie eine Wurzel in die Probekörper einwächst und wenige Zentimeter davon entfernt wieder herauswächst. Der Pfeil zeigt die Wuchsrichtung.



Abbildung 20: Entnommener Probekörper Porenraumärmer Verfüllstoff aus dem eingebauten Block

6.4 Einordnung der Ergebnisse

Rohrverbindungen

Im Versuchsfeld wurden insgesamt 15 Rohrverbindungen untersucht (vgl. Kapitel 3). Die Auswahl der verwendeten Werkstoffe und Werkstoffübergänge orientierte sich an den in der Gemeinde Almere eingesetzten Materialien (vgl. Tabelle 1). Von den eingebauten Verbindungen entsprachen elf Standard-Steckmuffenverbindungen den jeweiligen Rohrwerkstoffen.

Bei der Verbindung C8 handelte es sich um ein experimentelles System, bei dem ein Bentonitband außen am Rohr befestigt wurde. Verbindung C10 bestand aus einem Schrumpfschlauch, der auf eine PVC-Steckmuffe aufgebracht wurde. Die Verbindungen MT1 und MT2 stellten Übergangsmanschetten dar, die für den Werkstoffwechsel zwischen den jeweiligen Rohrmaterialien konzipiert wurden. Die im Versuch eingesetzten Rohrwerkstoffe umfassten Beton, PVC, PP, GFK sowie Kombinationen dieser Materialien.

Bei den Aufgrabungen 2022 wurde an fünf Rohrleitungen (C1, C6, MT1, C3 und C12b) ein schadensfreies Ablenken von Wurzeln beobachtet. Das bedeutet, dass Wurzeln beim vertikalen Wuchs auf die Rohrleitungen trafen und an diesem Punkt in eine andere Richtung abgelenkt worden sind. Zwei Vegetationsperioden später konnten weiterhin keine Schädigungen an den Wurzeln oder an den Rohrleitungen festgestellt werden, auch wenn teilweise ein Dickenwachstum stattgefunden hat.

Weiter wurden in vier Fällen (MT1, C8, C9 und C12b) ein Wurzeleinwuchs in den Muffenspalt von außen dokumentiert. Anhand der Laboruntersuchungen wurde ein anschließender Wurzeleinwuchs in die Rohrleitung lediglich bei den Verbindungen C8 und

MT1 beobachtet. Folglich ist ein optischer Wurzeleinwuchs von außen nicht zwingend mit einem tatsächlichem Wurzeleinwuchs in die Rohrleitung gleichzusetzen.

Durch den Einsatz des Bentonitbandes (Breite drei Zentimeter) an Rohrverbindung C8 konnte kein Wurzeleinwuchs verhindert werden. Es scheint, dass die hier eingesetzte Technik zumindest in dieser Form keinen Schutz vor Wurzeleinwuchs sicherstellt.

Auffällig war, dass an beiden Übergangsmanschetten (MT1 und MT2) ein erhöhtes Aufkommen von Wurzeln festzustellen war. Denkbar ist, dass ein vermehrtes Verzweigen der Wurzeln darin begründet ist, dass die Übergangsmanschette in ihrer Struktur mehr Kanten und Interaktionsflächen bietet als die glatte Oberfläche eines Rohres sowie Standardsteckverbindung. Bemerkenswert ist die Stelle an der die Wurzel in die Rohrverbindung eindringt. Rein optisch lag an dieser Stelle keine Beschädigung der Übergangsmanschette an den einzelnen Kunststoffelementen vor. In der Konsequenz muss die Wurzelspitze mit einem hohen Druck diesen Zwischenraum zwischen den Kunststoffelementen verschlossen haben.

An der Rohrverbindung C4 (PP-Standard-Steckmuffe), deren Außenseite eine vertikale Rillenstruktur aufweist, wurde ein vertikales Wurzelwachstum entlang dieser Struktur beobachtet. Es ist anzunehmen, dass die Rillenstruktur eine richtungslenkende Wirkung auf das Wurzelwachstum ausüben kann. Das bedeutet aber in der Folge nicht, dass keine Wurzeln in Muffenverbindung gelangen können. Die Laboruntersuchungen stellten Wurzeln an der Dichtung der Muffe fest. Aufgrund der begrenzten Stichprobengröße kann nicht abschließend beurteilt werden, ob das beobachtete Wurzelwachstumsverhalten auf andere Rohrtypen mit vergleichbarer Rillenstruktur übertragbar ist. Zur Validierung der Ergebnisse und zur Untersuchung des Einflusses weiterer Parameter wie Nennweite und Materialbeschaffenheit ist weiterführende Forschung erforderlich.

Bei allen elf Rohrverbindungen mit einer Dichtung wurden Wurzeln an dieser festgestellt. Im Versuchszeitraum von lediglich sechs Jahren, waren Wurzeln in der Lage zwei (C7 und C11) zu überwinden. Bei einem Einsatz in öffentlichen Leitungsnetzen muss in der Regel mit wesentlich längeren Nutzungsdauern gerechnet werden, sodass Wurzeln auch deutlich länger in Kontakt mit den Dichtungen stehen würden. Wie die Situation bei denselben Muffenverbindungen nach weiteren Vegetationsphasen zu bewerten wäre, kann an dieser Stelle nicht aufgeklärt werden. Denkbar ist ein fortschreitender Wuchs mit Ausbildung von Seitenwurzeln an den Dichtungen.

TV-Inspektion

In den verschiedenen Projektphasen wurden turnusmäßige TV-Inspektionen mit einer Schiebekamera durchgeführt. Über die Jahre zeigten die TV-Inspektionen erhebliche Unterschiede.

Bei der TV-Inspektion 2024 wurden die Ergebnisse aus dem Vorjahr bestätigt. Während der Untersuchung wurden insgesamt drei Rohrverbindung mit Wurzeln sichtbar erkannt. Die Rohrverbindung C8 wurde mit einer eingewachsenen Wurzel dokumentiert. Diese wurde auch über alle Projektphasen sicher erkannt und durch die nachträglichen Laboruntersuchungen bestätigt. Die Rohrverbindung C7 zeigte ebenfalls sichtbare Wurzeln, war jedoch ohne Einwuchs in die Rohrleitung. Die sichtbaren Wurzeln standen in

keinem Zusammenhang zu dem dokumentierten Einwuchs bei den Laboruntersuchungen. Vielmehr ist es realistisch, dass die sichtbaren Wurzeln von der benachbarten Rohrverbindung C8 stammten.

Bei der Rohrverbindung MT1 wurde ein sichtbarer „Wurzelteppich“ dokumentiert, wobei die Einwuchsstelle nicht zu ermitteln war. Diese wurde erst im Labor sichtbar. Dieser Wurzeleinwuchs hatte eine Länge von ca. sieben Meter in der Rohrleitung und begründete folglich auch die sichtbaren Wurzeln in der benachbarten Rohrverbindung C2. In dieser Rohrverbindung lag kein Einwuchs vor. Die Rohrverbindung C11 wurde in keiner TV-Inspektion mit sichtbaren Wurzeln dokumentiert. Anhand der Laboruntersuchungen wurde jedoch ein Wurzeleinwuchs durch die Muffenverbindung in die Rohrleitung festgestellt. Hier ist jedoch anzumerken, dass der Einwuchs in die Muffenverbindung zum Zeitpunkt der Aufgrabung noch sehr gering war. Folglich konnte dieser Einwuchs von einer TV-Inspektion nicht erfasst werden.

Tabelle 6 zeigt einen Überblick über alle Untersuchungen an Rohrverbindungen über alle Projektphasen.

Tabelle 6: Gesamtübersicht aller Untersuchungen an Rohrverbindungen

ID	Werkstoff	Muffenart	Aufgrabung - Wurzelanwuchs <u>an</u> Muffe und Wurzeleinwuchs <u>in</u> Muffenspalt				Laboruntersuchung Wurzeleinwuchs		TV-Inspektion						Prüfung für Dichtheit	
			<u>An</u> Muffe	<u>In</u> Spalt der Muffe	<u>An</u> Muffe	<u>In</u> Spalt der Muffe	<u>An</u> Dich- tung	<u>In</u> Rohr- leitung								
			2022	2024	2024		'19	'21	'22	'23	'24	'19	'22	'24	'19	'22
DN 300																
C1	Beton	Stand. Steckmuffe	✓	✗	✓	✗	✓	-	-	-	-	-	-	✓	✓	
C2	Beton	Stand. Steckmuffe	✓	✗	✓	✗	✓	-	-	-	-	✓	✓	✓	✓	
C3	PVC	Stand. Steckmuffe	✗	✗	✗	✗	✓	-	-	-	-	-	-	✗	✗	
C4	PP	Stand. Steckmuffe	✓	✗	✓	✗	✓	-	-	✓	-	-	-	✗	✗	
C5	GFK	Stand. Steckmuffe	✓	✗	✓	✗	✓	-	-	✓	-	-	-	✓	✓	
MT1	Beton/PVC	Übergangsmanschette	✓	✗	✓	✓		✓	-	-	-	✓	✓	✓	✗	✗
MT2	Beton/GFK	Übergangsmanschette	✓	✗	✓	✗		-	-	-	-	-	-	✗	✗	
DN 150																
C6	PVC	Stand. Steckmuffe	✓	✗	✓	✗	✓	-	-	✓	-	-	-	✓	✓	
C7	PVC	Stand. Steckmuffe	✓	✗	✓	✗	✓	✓	-	✓	-	✓	✓	✓	✓	✗
C8	PVC	Bentonitband	✓	✓	✓	✓		✓	-	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
C9	PVC	Stand. Steckmuffe	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	✓	-	-	-	✓	✗	
C10	PVC	Schrumpschlauch	✓	✗	✓	✗		-	-	✓	-	-	-	✓	✗	
C11	PP	Stand. Steckmuffe	✓	✗	✓	✗	✓	✓	-	✓	-	✓	-	-	✓	✗
C12a	PP	Stand. Steckmuffe	✗	✗	✗	✗	✓	-	-	✓	-	-	-	✓	✓	
C12b	PP	Stand. Steckmuffe	✓	✗	✓	✓	✓	✓	-	-	✓	-	-	-	✓	✗

Legende: **Aufgrabung:** ✓ = vorgefunden, ✗ = nicht vorgefunden

Laboruntersuchung: ✓ = vorgefunden, - = nicht vorgefunden, = nicht vorhanden in Muffe

TV-Inspektion: - = nicht sichtbar, ✓ = sichtbar, ✗ = eingewachsen

Dichtheitsprüfung: ✓ = Prüfung bestanden - dicht, ✗ = Prüfung nicht bestanden - nicht dicht

Wurzelbarrieren

An den fünf Baumstandorten im Versuchsfeld wurden Wurzelbarrieren installiert und nach einer Beobachtungsdauer von sechs Jahren auf mögliche Wechselwirkungen mit dem Wurzelwachstum untersucht (vgl. Kapitel 3). Die Versuchsergebnisse belegen, dass es bei allen im Versuchsfeld verbauten Wurzelbarrieren zu Interaktionen mit den Wurzeln kam. Die Einbautiefe der Barrieren variierte systemabhängig zwischen 70 cm und 1,20 m unterhalb der Geländeoberkante. Vier der eingesetzten Systeme verfügten auf der baumzugewandten Seite über strukturierte Oberflächen, beispielsweise in Form von Noppen, Kanten oder Rippen.

Im Rahmen der Aufgrabungen an den Standorten der Wurzelbarrieren wurde festgestellt, dass Wurzeln unter den im Versuchsfeld gegebenen Bedingungen in der Lage waren, die eingesetzten Barrieren zu überwinden. Die Barrieren selbst wurden zwar nicht oder nur an den Verbindungsstellen und dann unwesentlich durchwachsen, sie werden aber unterwachsen und umwachsen. Vor allem das Unterwachsen ist dabei sehr problematisch. Die Wurzeln können wieder nach oben wachsen, nachdem sie die Barriere passiert haben. Im günstigsten Fall hat die Barriere keinen nennenswerten Effekt. Im ungünstigsten Fall werden Wurzeln durch die Barriere sogar in den Bereich der Grabensohle und damit zur Rohrleitung geleitet. In der Folge ist der Schutz für dahinterliegende Infrastruktur kaum vorhanden.

So konnte unter anderem dokumentiert werden, dass Wurzeln die installierten Folien- und Plattensysteme in unterschiedlichen Tiefen unterwachsen hatten. Bei der Zuschenaufgrabung 2022 wurden lediglich bei zwei von acht Wurzelbarrieren keine Wurzeln in der Tiefe der Unterkante der Wurzelbarriere festgestellt. Nach zwei weiteren Vegetationsperioden wurden 2024 bei allen acht Wurzelbarrieren im Versuchsfeld Wurzeln an der Unterkante festgestellt, welche diese unterquerten. Weiter war auffällig, dass es zwei Jahre zuvor nur vereinzelte Wurzeln waren, wohingegen es nun an mehreren Stellen entlang der Barriere zu Unterwuchs kam. Ebenfalls war ein Dickenwachstum der Wurzeln bis zu vier cm starken Wurzeln festzustellen.

Weiter konnte die Beobachtung, dass Wurzeln nach einer Unterquerung wieder nach oben wachsen können und nicht auf horizontaler Ebene wachsen, auch 2024 bestätigt werden. Bei vier von acht Wurzelbarrieren wurde dieses festgestellt. 2022 waren bereits fünf Wurzelbarrieren mit hochwachsenden Wurzeln festgestellt worden. Inwieweit der Prozess des Wiederverfüllens Einfluss auf die Höhenlage und den Verlauf von Wurzeln genommen hat, kann nicht aufgeklärt werden. Anzumerken ist an dieser Stelle, dass aufgrund des vor Ort hohen Grundwasserstandes das Versuchsfeld um 1,20 Meter aufgeschüttet wurde. Baumarten, die mit Pilzen eine Symbiose eingehen, können nicht dauerhaft staunasses Substrat einwachsen. Arten, die eine Symbiose mit Bakterien eingehen wie z.B. Erlen, können in permanent überflutete Bereiche einwachsen, wenn die Sauerstoff-Sättigung ausreicht (z.B. fließende Grundwasserkörper). Häufig ist die Sensitivität von Wurzeln gegenüber länger anhaltenden oder gar permanenter Grundwasserbedeckung nicht bekannt. Ob und in welchem Ausmaß der Grundwasserstand Einfluss auf die Wurzeltiefe im Versuchsfeld genommen hat, kann nicht abschließend bestimmt werden. Möglich ist, dass das Grundwasser das Tiefenwachstum der Wurzeln in

den Untergrund begrenzt hat. An dieser Stelle besteht weiterer Forschungsbedarf, um dieses Verhalten zu untersuchen

In alle vier Wurzelbarrieren, die aus mehreren Einzelementen bestanden und in der Folge Verbindungen aufwiesen, wurde eingewachsen bzw. durchwachsen. Dabei konnte kein Unterschied zwischen einer Steckverbindung oder Schraubverbindung (geklebt) beobachtet werden. Bereits 2022 konnte festgestellt werden, dass fehlerhafte Verbindungen oder Beschädigungen beim Einbau ein Einwachsen und Durchwachsen von Wurzeln begünstigen. Die Sorge, dass von diesen Feinwurzeln eine erhöhte Gefahr für weitere Beschädigungen ausgehen würde, kann nicht bestätigt werden. Es war nicht zu beobachten, dass ein Dickenwachstum bei den Wurzeln oder negative Veränderungen durch ein Aufdrücken bei den durchwachsenen Barrierestellen stattgefunden hat.

2022 wurde an einer der acht Wurzelbarrieren ein seitliches Umwachsen an den seitlichen Rändern der Wurzelbarrieren festgestellt. Während der Aufgrabung 2024 waren es sieben von acht Wurzelbarrieren. Darüber hinaus waren bei FP3 bereits erste Ansätze zu beobachten. Denkbar ist hier, dass für diese Wurzelinteraktion ein gewisser zeitlicher Abstand zwischen Pflanzung des Baumes und Umwachsen notwendig ist, bedingt durch benötigte Zeit für das Ausbilden eines gesunden Wurzelsystems. Dazu war zu beobachten, dass bei allen Wurzelbarrieren zunächst ein Wurzelwuchs an der Barriere entlang zu den seitlichen Enden stattgefunden hat. Indirekt wurden Wurzeln folglich an das Ende der Barriere gelenkt. Anschließend hat ein Umwachsen der seitlichen Ränder stattgefunden (mitunter mit Kurven von beinahe 90 Grad).

Die im Versuchsfeld eingesetzten Wurzelbarrieren wiesen zur Baumseite unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheiten auf. Vier Barrieren verfügten über strukturierte Oberflächen (mit Noppen, Kanten oder Rippen), während vier Barrieren eine glatte Oberfläche aufwiesen. Senkrechte Kanten auf der dem Baum zugewandten Seite können dazu führen, dass Wurzeln an ihnen entlang nach unten wachsen. Der Effekt kann sowohl bei vorstehenden Kanten als auch bei ausgeprägten Rillen auftreten.

An den strukturierten Barrieren wurden weder Wurzeln noch Hinweise auf deren Anwesenheit (z. B. Verschmutzungen) festgestellt. Ein signifikanter Zusammenhang zwischen Oberflächenstruktur und Wurzelinteraktion konnte somit nicht festgestellt werden.

Zusammenfassend ist der Effekt der Wurzelbarrieren unzureichend. Die Wurzeln umwachsen die Wurzelbarrieren in beliebiger Richtung und der Effekt kann sogar negativ sein, wenn Wurzeln entlang der Wurzelbarriere einen kürzeren Weg in die problematischen Sohlenbereich der Rohrleitung haben.

Porenraumarmer Verfüllstoff

Im Rahmen des Versuchsfelds wurde ein porenarmer Verfüllstoff als potenzielle Wurzelbarriere eingesetzt (vgl. Kapitel 3). Bei den durchgeführten Aufgrabungen zeigte sich, dass Wurzeln bis an die Grenze des eingebrachten Materials vorgedrungen waren. Als porenarmer Verfüllstoff kam ein mineralisches Schüttgut zur Kapselung von Rohrleitungen zum Einsatz.

Die Untersuchungen an dem porenaumarmen Verfüllstoff zeigten, dass der im Versuchsfeld eingebaute Verfüllstoff über den Zeitraum von sechs Jahren nicht ausreichend resistent gegenüber Wurzeleinwuchs war. Es wurde an beiden Erdkörpern ein erheblicher Wurzeleinwuchs festgestellt. Dabei wurde an beiden Stellen das Material von Wurzeln aufgebrochen und Löcher erzeugt oder auch querend durchwachsen. Wie sehr dabei auch Wurzeln im Erdkörper verankert waren, zeigte sich beim Ausbau der Wurzelballen. Im Zuge dessen wurde der Erdkörper an einer Seite fast vollständig auseinandergerissen und große Teile blieben am Wurzelballen hängen. Folglich scheint ein Einsatz von Kapselung mit diesem Mineralgemischen nicht geeignet, um Rohrleitungen über Jahre vor Wurzeleinwuchs zu schützen.

Bei den Aufgrabungen im Sommer 2022 war noch zu beobachten, dass Wurzeln in der Trennfläche zwischen Erdkörper und Baumsubstrat gewachsen sind und kein Einwuchs in das Mineralgemisch stattgefunden hat. Bei der damaligen Zwischenaufgrabung wurde die äußere Schicht (schätzungsweise 1 cm) des Körpers mechanisch aufgeraut. Rein optisch war bei der Aufgrabung 2024 keine Schädigung oder Auflockerung des Materials zu erkennen, die die Funktion beeinträchtigt haben könnte. Inwieweit diese aufgerauten Oberfläche und ggfs. Risse durch die Zwischenaufgrabung Potenziale für einen Wurzeleinwuchs begünstigen, kann an diese Stelle nicht ausreichend beantwortet werden. An dieser Stelle besteht weiterer Forschungsbedarf, um zu untersuchen, welche Einbauqualitäten erfüllt sein müssen, um auch bei denkbaren Reparaturmaßnahmen an den Rohrleitungen, den porenaumarmen Verfüllstoff zu öffnen und anschließend wieder fachgerecht zu verfüllen.

7. Schlussfolgerung für die Praxis

Auf Basis der Ergebnisse des Forschungsvorhabens lassen sich praxisrelevante Empfehlungen für den Einsatz von Schutzmaßnahmen im urbanen Raum ableiten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Beobachtungszeitraum des Projekts – mit insgesamt sechs Vegetationsperioden – vergleichsweise kurz war. Die Langzeitwirksamkeit der untersuchten Maßnahmen sollte daher in weiterführenden Studien validiert werden.

- **Mit dem Versuchsaufbau konnten Wurzel-Rohr-Schutzmaßnahmen-Interaktionen innerhalb von 6 Jahren erzeugt werden („Worst-Case-Szenario“).**

Durch den Versuchsaufbau und die Versuchsanordnung war es möglich Wechselwirkungen (Interaktionen) zwischen Baumwurzeln, Rohrleitungen und Schutzmaßnahmen innerhalb von sechs Jahren zu beobachten. Die Ergebnisse zeigen, was im Worst-Case-Szenario passieren kann, wenn Wurzeln mit Schutzmaßnahmen und Rohrleitungen in Kontakt kommen.

- **Wurzeln treten mit Rohrleitungen und -verbindungen in Interaktion. Ein Wurzeleinwuchs von außen in den Muffenspalt ist nicht zwingend mit einem tatsächlichen Wurzeleinwuchs in eine Rohrleitung gleichzusetzen.**

Im Versuchsfeld sind Wurzeln mit Rohrleitungen und Rohrverbindungen in Interaktion getreten. An 13 von 15 Rohrverbindungen konnte dokumentiert werden, dass Wurzeln an den Muffenspalt oder im unmittelbaren Muffenbereich gewachsen sind. Über den Versuchszeitraum von sechs Jahren wurden vier Wurzeleinwüchse optisch von außen in Rohrverbindungen festgestellt. Durch weitere Untersuchungen wurden jedoch lediglich zwei davon als Wurzeleinwuchs bestätigt. In der Folge war ein Wurzeleinwuchs in die Muffe von außen in zwei Fällen kein Wurzeleinwuchs in die Rohrverbindung. Inwie weit an den übrigen Rohrverbindungen ein Wurzeleinwuchs künftig zu erwarten ist, bleibt offen.

Die Ergebnisse nach der bisherigen Versuchslaufzeit zeigen weiter, dass eine feste Verankerung von Wurzeln im Muffenspalt kein Durchdringen der Dichtung und einen Wurzeleinwuchs in eine Rohrleitung bedeuten muss. Bedingt durch den Versuchsaufbau trafen die Wurzeln mehr oder weniger parallel auf die Rohrverbindungen. Das begünstigte ein flaches An- und Einwachsen in den Muffenspalt und damit auch ein anschließendes wieder Verlassen, ohne dass es zu einer Überwindung der Dichtung mit Einwuchs in das Rohrinnere kam. Trifft die Wurzel mehr oder weniger senkrecht auf den Muffenspalt, so dürfte das Risiko eines vollständigen, ringförmigen Umwachsens mit anschließendem Einwuchs in das Rohr höher sein. Es lässt sich aber deutlich verringern, wenn der Abstand vom Stamm zur nächsten Rohrverbindung in Fließrichtung möglichst groß ist. Gegen die Fließrichtung „springt“ die Wurzel dagegen in der Regel über das Glockenende, ohne dass die Gefahr eines Eichwuchses in den Ringspalt besteht.

- Bei stoffschlüssig ausgeführten Rohrverbindungen mit einem Schrumpfschlauch ist kein Wurzeleinwuchs zu erwarten.

Die Einhaltung von erforderlichen Qualitätsstandards beim Einbau sind bei der Errichtung im nahen Umfeld von Bäumen zwingend zu beachten. Tritt bei der Erstellung der Rohrverbindung überschüssiger Schmelzkleber aus der Muffe aus, ist dort eine stoffschlüssige Verbindung vorhanden. Potenzielle Angriffspunkte für Wurzeln durch z.B. Hohlräume können vermieden werden. Es sollte sichergestellt werden, dass die beschriebene Stoffschlüssigkeit erreicht wird, um potenzielle Angriffspunkte für Wurzeln zu vermeiden. Dieses Ergebnis ist identisch mit Untersuchungen an Mantelschutzrohren und ist daher auch für längere Fristen als gesichert anzusehen [17].

- Ohne fachgerechte Rohrverbindung konnten Wurzeln mehrere Meter in den Leitungen wachsen.

Das im Versuchsfeld eingesetzte Bentonitband wurde bereits nach einem kurzen Zeitraum durchwachsen und ein Wurzeleinwuchs in die Rohrleitung wurde dokumentiert. Diese Ausführung der Rohrverbindung stellte keinen sicheren Schutz vor Wurzeleinwuchs dar. Trocken eingebautes Bentonit konnte in früheren Versuchen einen Einwuchs zuverlässig verhindern in dem es verhinderte, dass die Wurzeln überhaupt in die unmittelbare Nähe des Ringspaltes gelangten. Feucht eingebautes Bentonit versagte dagegen, weil kleine Schrumpfrisse den Wurzeln Zugang ermöglichten. Das hier eingebaute Bentonitband war zum einen viel dünner, als die in Versuchen eingesetzten Bentonitschicht. Weiter wurde bedingt durch den Einbau und damit verbundener notwendiger Verformbarkeit am Rohrspalt feucht eingebaut. Insgesamt ist die Qualität des Einbaus aller Bestandteile der Rohrverbindungen von zentraler Bedeutung. Verdrehte Dichtungsbänder und folglich fehlende Druckstabilität stellen eine Schwachstelle im System dar und können als Eintrittsstelle von Wurzeln potenziell genutzt werden. Auch minimale Lücken bei zusammengesetzten Rohrverbindungen fordern einen festen Zusammenschluss.

- Rohrverbindungen und -leitungen mit einer vertikalen Rippenstruktur zeigen, dass an Baumstandorten eine Ablenkung von Wurzeln an der Rohrverbindung stattfinden kann.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass Wurzeln in einer vertikalen Rippenstruktur in den angrenzenden Erdkörper geleitet werden können. Es wurde beobachtet, dass in einer Rille wachsende Wurzeln, diese nicht wieder verlassen haben. Befindet sich eine solche Rille jedoch in unmittelbare Nähe zum Muffenspalt, so kann ein Einwuchs zwar verlangsamt aber nicht vollständig ausgeschlossen werden.

- Eine Interaktion von Wurzeln und Rohrleitungen bei der es zu einer Ablenkung kommt, ist über den Zeitraum von sechs Jahren schadensfrei.

Es wurde festgestellt, dass in drei Fällen eine Ablenkung der Wurzeln und folglich eine Beeinflussung der Wurzelrichtung stattgefunden hat. Dabei wuchsen die Wurzeln zunächst vertikal und stießen auf die Rohrleitungen, änderten an dieser Stelle jedoch ihre

Wuchsrichtung ohne Schäden zu verursachen. Dabei war es auch nicht relevant, inwieweit es zu einem Dickenwachstum der Wurzeln gekommen war. Weiter konnte eine kreisrunde Anpassung der Wurzeln an eine Rohrleitung dokumentiert werden. Solche Wurzelbildungen werden in der Fachliteratur häufig als Druckstempel bezeichnet. Dabei ist zu beachten, dass durch das sekundäre Dickenwachstum der Wurzel alleine keine Kraft auf die Rohrleitung übertragen wird. Windlasten werden durch solche Wurzelstrukturen nur dann auf das Rohr übertragen, wenn über den Stamm Bewegung auf den gesamten Wurzelraum übertragen werden. Ist der Wurzelraum groß und tief genug bricht aller Wahrscheinlichkeit eher der Stamm, als dass größere Kräfte auf das Rohr übertragen werden.

- **Wurzelinteraktionen an durch Wurzelbarrieren geschützter Infrastruktur kann nicht ausgeschlossen werden.**

Die Versuchsergebnisse belegen, dass Wurzeln nach sechs Jahren in der Lage sind, Wurzelbarrieren auf verschiedenen Wegen zu überwinden. Dabei wurden sowohl ein Umwachsen als auch ein Unterwachsen der Barrieren beobachtet. In mehreren Fällen erfolgte nach der Unterquerung ein erneuter Wuchs in vertikaler Richtung nach oben. Ein dauerhafter Schutz der dahinterliegenden Infrastruktur kann somit nicht gewährleistet werden. Zudem erwiesen sich die eingesetzten Verbindungen zwischen Folien und Platten als nicht ausreichend resistent gegenüber dem Ein- und Durchwachsen von Feinwurzeln.

- **Verwendeter porenaumer Verfüllstoff ist gegenüber Wurzeln nicht ausreichend resistent.**

Die Untersuchungen des porenaumarmen Verfüllstoffs ergaben, dass das im Versuchsfeld eingesetzte Material über den Zeitraum von sechs Jahren keine ausreichende Resistenz gegenüber Wurzeleinwuchs aufwies. Das Mineralstoffgemisch wurde lokal von Wurzeln aufgebrochen, durchlöchert sowie quer durchwachsen. Auf Grundlage dieser Beobachtungen erscheint der Einsatz des untersuchten Mineralgemisches zur KapSELung von Rohrleitungen als langfristiger Schutz gegen Wurzeleinwuchs nicht geeignet. Das Risiko der Durchwurzelung muss insbesondere dann als hoch angesehen werden, wenn die Durchfeuchtung starken Schwankungen unterworfen ist. Dies war beim vorliegenden Fall wegen des oberflächennahen Einbaus und wegen des extrem trockenen Sommers 2023 gegeben.

- **Ein Einfluss einer geriffelten Oberflächenstruktur von Wurzelbarrieren auf die Ablenkung des Wurzelwachstums konnte im Versuch nicht nachgewiesen werden.**

Bei allen im Versuchsfeld verbauten Wurzelbarrieren mit strukturierter Oberfläche wurden keine Wurzeln an der Barrierenoberfläche festgestellt. Es lagen keine Hinweise darauf vor, dass die Wurzeln durch die Oberflächenstruktur in ihrer Wuchsrichtung beeinflusst oder abgelenkt wurden.

- **Wurzelbarrieren nehmen Einfluss auf die Ausbildung und Geometrie des Wurzelballens an Baumstandorten.**

Die Wurzelbarrieren wurden mit einem Abstand von 80 – 100 cm vom Stamm eingebaut. Die Untersuchungen zeigten, dass die Wurzelballen in der Folge von einer natürlich runden Form deutlich abgewichen haben und eine rechteckige Form ausgebildet haben. Zu den West- und Ostseiten entwickelten sich horizontale Wurzeln mit kurzen Längen bis zu einem vertikalen Wuchs an den Wurzelbarrieren. Zu den offenen Nord- und Südseiten konnten längere Wurzeln ausgebildet werden. Durch diese Verkleinerung wird der durchwurzelbare Raum auch in Bereichen verkleinert, in denen die Wurzeln keinen Schaden erzeugen können und beeinträchtigen damit auf Dauer die Vitalität von Bäumen.

8. Zusammenfassung

Die gleichzeitige Nutzung des urbanen Untergrunds durch Bäume, unterirdische Leitungen und Kanäle stellt insbesondere in dicht bebauten städtischen Räumen eine Herausforderung dar. In Innenstädten kommt es vermehrt zu Nutzungskonflikten aufgrund begrenzter Flächenverfügbarkeit. Dennoch sind sowohl Bestandsbäume als auch Neupflanzungen essenzielle Elemente zur Verbesserung des Stadtklimas und tragen maßgeblich zur Steigerung der Lebensqualität in urbanen Gebieten bei.

Praxisbeobachtungen zeigen, dass Baumwurzeln in intakte Rohrverbindungen eindringen können. Dies führt zu strukturellen Schäden, einem Verlust der Dichtheit der Leitungen sowie potenziell zu einer Reduktion der hydraulischen Leistungsfähigkeit. Vor diesem Hintergrund verfolgte das gemeinsame Forschungsvorhaben der niederländischen Gemeinde Almere, Stichting RIONED und des IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH – das Ziel, Strategien zur konfliktfreien Koexistenz von Bäumen und unterirdischer Infrastruktur im begrenzten Stadtraum zu entwickeln.

Zentraler Untersuchungsgegenstand war die Interaktion zwischen Baumwurzeln, Wurzelbarrieren und Rohrverbindungen über einen Beobachtungszeitraum von sechs Jahren. Ziel war die Entwicklung praxisnaher Empfehlungen für den Einsatz passiver Schutzmaßnahmen im Leitungsgraben zum Schutz abwassertechnischer Anlagen.

Im Rahmen des Projekts wurde auf Grundlage einer Marktanalyse existierender Systeme und Produkte im niederländischen sowie deutschsprachigen Raum ein 1:1-Modellversuchsfeld errichtet. Dort wurden verschiedene passive Schutzmaßnahmen installiert, die gemäß geltendem technischen Regelwerk [vgl. 9] als „passive Wurzelschutzmaßnahmen im Leitungsgraben“ klassifiziert werden.

Insgesamt wurden 15 Rohrverbindungen, acht Folien- bzw. Plattensysteme sowie ein porenaumärmer Verfüllstoff in unmittelbarer Nähe des Wurzelraums von fünf Pappeln untersucht. Die Auswertung der vierten Projektphase basierte auf Aufgrabungen im Versuchsfeld, TV-Inspektionen sowie Laboranalysen.

Im Fokus der Untersuchungen standen folgende Aspekte:

- das Wurzelwachstumsverhalten im Bereich von Rohrverbindungen und -leitungen,
- das Wurzelwachstumsverhalten in Kontakt mit Wurzelbarrieren,
- sowie das Wurzelverhalten in einen porenaumarmen Verfüllstoff.

Als zentrales Ergebnis des vorliegenden Forschungsvorhabens lässt sich festhalten, dass Wurzeln mit unterirdischen Rohrleitungen und -verbindungen in Interaktion treten.

Bei den durchgeführten Untersuchungen wurde dokumentiert, dass Wurzeln im Bereich von Muffen, im Muffenspalt wachsen sowie in Rohrverbindungen einwachsen können. Darüber hinaus konnte nachgewiesen werden, dass Wurzeln unter den gegebenen Versuchsbedingungen in der Lage sind, installierte Wurzelbarrieren zu überwinden. Nach

sechs Jahren wurden alle Barrieren unterwachsen. Weiter wurde ein seitliches Umwachsen der Ränder an Wurzelbarrieren dokumentiert. In den Verbindungsstellen von Folien- und Plattenbarrieren (z. B. Steck- und Schraubverbindungen) wurde ein Ein- und Durchwachsen von Feinwurzeln festgestellt. Dagegen zeigte sich bei den eingesetzten Barrieren mit strukturierter Oberfläche kein nachweisbarer Einfluss auf die Wuchsrichtung der Wurzeln. Der im Versuchsfeld eingesetzte porenaumarme Verfüllstoff zeigte nach sechs Jahren einen erheblichen Einwuchs und eine Durchwurzelung des Materials. Wurzeln drangen bis in den Block vor, durchbrachen das Material und verankerten sich darin.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens konnte ein innovatives Versuchsdesign entwickelt und erfolgreich umgesetzt werden. Dabei wurden praxisrelevante Erkenntnisse gewonnen, auch wenn Wurzeluntersuchungen naturgemäß durch den zeitlich begrenzten Wuchsverlauf eingeschränkt sind. Mit dem angelegten Versuchsfeld wurde eine belastbare Grundlage für eine Langzeitbeobachtung geschaffen, die künftig durch weiterführende Untersuchungen an Wurzelbarrieren, porenaumarmen Verfüllstoffen und Rohrverbindungen vertieft werden kann.

Langfristige Versuchsergebnisse werden dazu beitragen, die bisherigen Erkenntnisse weiter zu validieren und zu ergänzen, um fundierte Handlungsempfehlungen für die Praxis bereitzustellen. Übergeordnetes Ziel bleibt die bestmögliche Vereinbarkeit von Stadtbäumen mit unterirdischer Infrastruktur wie Leitungen und Kanälen im urbanen Raum.

Im Sommer 2024 wurde das Versuchsfeld abgebaut, da das Grundstück einer anderweitigen Nutzung zugeführt worden ist.

9. Literatur

- [1] Stiftung DIE GRÜNE STADT: Bäume in der Stadt – Wertvoll gestalten im öffentlichen Grün. 2014. Internetinformationen, abgerufen am 20.07.2017 unter <http://www.die-gruene-stadt.de/baeume-in-der-stadt.pdfx>
- [2] Bruse, M.: Stadtgrün und Stadtklima - Wie sich Grünflächen auf das Mikroklima in Städten auswirken. LÖBF-Mitteilungen 27(1): 66–70, 2003.
- [3] NAJU: Bäume in der Stadt: Internetinformationen, abgerufen am 20.07.2017 unter <http://www.naju-wiki.de/index.php/Parkanlage>.
- [4] C. Berger, C. Falk, F. Hetzel, J. Pinnekamp, S. Roder, J. Ruppelt: Zustand der Kanalisation in Deutschland – Ergebnisse der DWA-Umfrage 2015. Sonderdruck aus KA Korrespondenz Abwasser, Abfall, 63. Jahrgang, Heft 6/2016.
- [5] Stützel, T.; Bosseler, B.: Ursachen des Wurzeleinwuchses in Kanälen. Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft Bochum 45: 153–162, 2003.
- [6] De Silva, D.; Burn, L. S.; Eiswirth, M.: Joints in water supply and sewer pipelines: An Australian perspective. In: Proceedings of the Pipes 2001 conference, 15-17 Oktober. Wagga Wagga, NSW (AUS): Charles Sturt University: 1–10, 2001.
- [7] Bennerscheidt, C.; Streckenbach, M.; et al.: „Wurzeleinwuchs in Abwasserleitungen- und -kanäle – Ergänzende Feldversuche“. IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur, in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Spezielle Botanik der Ruhr-Universität Bochum und dem Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen im Auftrag des Umweltministeriums NRW (MUNLV), Juni 2007.
- [8] Streckenbach, M.: Interaktionen zwischen Wurzeln und unterirdischer technischer Infrastruktur – Grundlagen und Strategien zur Problemvermeidung. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Biologie und Biotechnologie, 2009.
- [9] DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.: DWA-M 162 „Bäume, unterirdische Leitungen und Kanäle“. (Ausgabe: Februar 2013, textgleich mit DVGW GW 125 und FGSV Nr. 939). Februar 2013.
- [10] Stützel, T.; Bennerscheidt, C.; et al.: Umweltsicherer Kanalbau durch wurzelfeste Bettung der Rohre – Teil I: Verpfanzung von Großbäumen mit unterirdischer Versuchsanlage (Wurzelgräben) am Standort Osnabrück. Gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU), AZ 28019-23. Projektleitung IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH, 2011.
- [11] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 18125-2:2011-03 „Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Dichte des Bodens - Teil 2: Feldversuche“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, März 2011.
- [12] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 18130-1:1998-05 „Baugrund - Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts - Teil

- 1: Laborversuche“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Mai 1998. Zurückgezogen. Ersetzt durch DIN EN ISO 17892-11 „Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 11: Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit“ (ISO 17892-11:2019-05); Deutsche Fassung EN ISO 17892-11:2019-05. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Mai 2019.
- [13] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 17892-4 „Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 4: Bestimmung der Korngrößenverteilung (ISO 17892-4:2016)“; Deutsche Fassung EN ISO 17892-4:2016. Beuth Verlag GmbH, Berlin, April 2017.
- [14] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 14688-1:2020-11 „Geotechnische Erkundung und Untersuchung — Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden — Teil 1: Benennung und Beschreibung (ISO 14688-1:2017)“; Deutsche Fassung EN ISO 14688-1:2018. Beuth Verlag GmbH, Berlin, November 2020.
- [15] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 1610:2015-12 „Einbau und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen“; Deutsche Fassung EN 1610:2015. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Dezember 2015.
- [16] Salomon, M.: „Untersuchungen zur Wirksamkeit von passiven Leitungsschutzmaßnahmen an unterirdischen Leitungen.“, Deutsche Fassung. IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur; im Auftrag der Gemeinde Almere (NL) und Stichting RIONED. Gelsenkirchen, Oktober 2019. (unveröffentlicht)
- [17] Salomon, M.; Grimm, S.; Stützel, T.; Hay, S.; Besier, R.; Bosseler, B.; Kamari-anakis, S.; Bersuck, F.; Möllers, K.; Hörster, T.; Weinz, K.; Elfroth, E.: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben „Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen/Baumwurzeln und unterirdischen Fernwärmeleitungen“. Gefördert durch die DBU Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Antragsstellung durch AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK, in Zusammenarbeit mit dem IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur und der Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Evolution und Biodiversität der Pflanzen, Frankfurt am Main, redaktionell überarbeitete Version, November 2020. (unveröffentlicht)
- [18] Möllers, K.; Salomon, M.; Stützel, T.: „Untersuchungen zur Wirksamkeit von passiven Leitungsschutzmaßnahmen an unterirdischen Leitungen -Phase 3.“, Deutsche Fassung. IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur; im Auftrag der Gemeinde Almere (NL). Gelsenkirchen, Dezember 2022. (unveröffentlicht)

Anlage 01

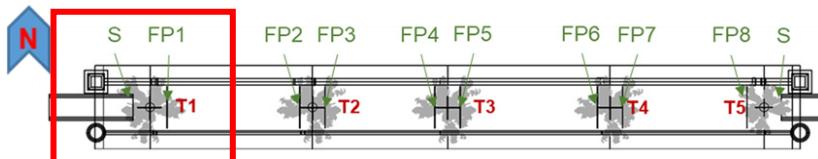
Auswertung Wurzelbarrieren

Art	Werkstoff	Verbindungsart	Bezeichnung
Folie	PE-HD	ohne Verbindung	FP1
Folie	PE-HD	stecken/einschieben	FP2
Platte	PP	stecken/einschieben	FP3
Platte	PE-HD	ohne Verbindung	FP4
Folie	PE-HD	ohne Verbindung	FP5
Folie	PE-HD	verschraubt/geklebt	FP6
Folie	PE-HD	verschraubt	FP7
Folie	PE-HD	ohne Verbindung	FP8

Legende: FP = Foils and Plates/Folien und Platten

Auswertung Wurzelbarrieren

Baumstandort:	T1
Kennung ID:	FP 1
Pflanze:	Populus c. Robusta
Versuchszeitraum:	Winter 2018/2019 - Aufgrabung August 2024
Barrieren-Art:	Folie
Werkstoff:	PE-HD
Tiefe:	1,20 m
Verbindung:	keine
Oberflächenstruktur:	strukturiert
Seitliches Umwachsen:	Ja
Unterwachsen von Wurzelschutzbarrieren:	Ja
Ein- und Durchwachsen von Verbindungen:	keine Verbindung



Seitenansicht - Bauminnenseite

Wurzeln wachsen an Barriere (bis zu 6 cm stark), Wuchs an Ränder und um die Ränder

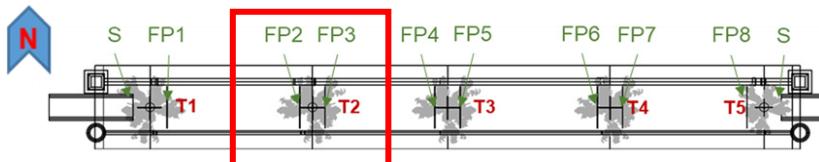
Seitenansicht - Baumaußenseite

Wurzeln unterwachsen die Wurzelbarriere



Auswertung Wurzelbarrieren

Baumstandort:	T2
Kennung ID:	FP 2
Pflanze:	Populus c. Robusta
Versuchszeitraum:	Winter 2018/2019 - Aufgrabung August 2024
Barrieren-Art:	Folie
Werkstoff:	PE-HD
Tiefe:	1,20 m
Verbindung:	Steckverbindung
Oberflächenstruktur:	glatt
Seitliches Umwachsen:	Ja
Unterwachsen von Wurzelschutzbarrieren:	Ja
Ein- und Durchwachsen von Verbindungen:	Ja



Draufsicht - Baumaußenseite

Unterwachsen der Barriere (2-3cm stark), viele Seitenwurzeln



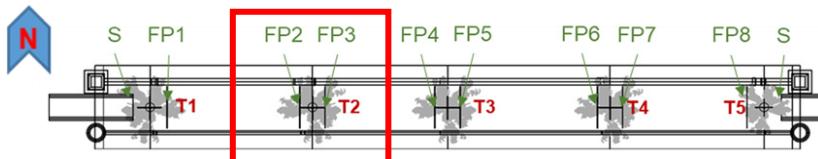
Seitenansicht - Baumaußenseite

Wurzeln nach Ausbau in Steckverbindung



Auswertung Wurzelbarrieren

Baumstandort:	T2
Kennung ID:	FP 3
Pflanze:	Populus c. Robusta
Versuchszeitraum:	Winter 2018/2019 - Aufgrabung August 2024
Barrieren-Art:	Platte
Werkstoff:	PP
Tiefe:	1,20 m
Verbindung:	Steckverbindung
Oberflächenstruktur:	strukturiert
Seitliches Umwachsen:	Nein (Anfänge erkennbar)
Unterwachsen von Wurzelschutzbarrieren:	Ja
Ein- und Durchwachsen von Verbindungen:	Ja



Draufsicht - Barriereunterkante

Wurzeln wachsen an Trennfläche, Beginn von Umwuchs,
Unterwachsen der Barrieren an mehreren Stellen



Seitenansicht - Bauminnenseite

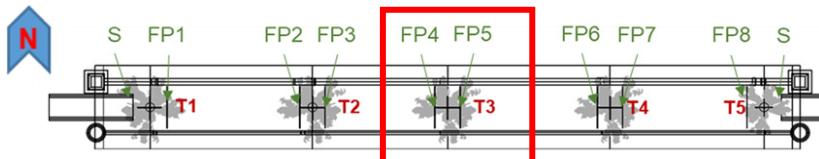
Steckverbindung zeigt Wurzeleinwuchs



Auswertung Wurzelbarrieren

Baumstandort: T3
Kennung ID: FP 4
Pflanze: Populus c. Robusta
Versuchszeitraum: Winter 2018/2019 - Aufgrabung August 2024
Barrieren-Art: Platte
Werkstoff: PE-HD
Tiefe: 90 cm
Verbindung: ohne Verbindung
Oberflächenstruktur: strukturiert

Seitliches Umwachsen: Ja
Unterwachsen von Wurzelschutzbarrieren: Ja
Ein- und Durchwachsen von Verbindungen: keine Verbindung



Seitenansicht - Baumaußenseite
Wurzeln umwachsen Wurzelbarriere

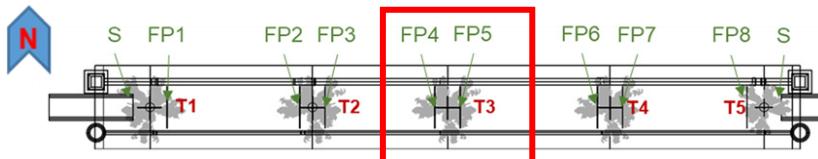


Draufsicht - Baumaußenseite
Barriere wird an mehreren Stellen von Wurzeln unterwachsen



Auswertung Wurzelbarrieren

Baumstandort:	T3
Kennung ID:	FP 5
Pflanze:	Populus c. Robusta
Versuchszeitraum:	Winter 2018/2019 - Aufgrabung August 2024
Barrieren-Art:	Folie
Werkstoff:	PE-HD
Tiefe:	70 cm
Verbindung:	ohne Verbindung
Oberflächenstruktur:	glatt
Seitliches Umwachsen:	Ja
Unterwachsen von Wurzelschutzbarrieren:	Ja
Ein- und Durchwachsen von Verbindungen:	keine Verbindung



Seitenansicht - Baumaußenseite

Wurzeln wachsen um seitlichen Rand der Folie



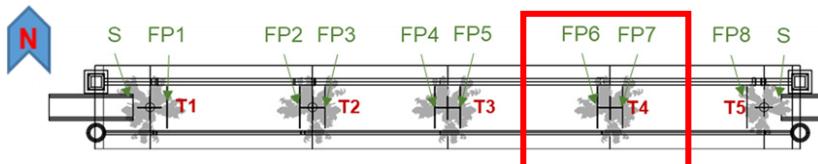
Draufsicht - Baumaußenseite

Wurzeln wachsen an mehreren Stellen unter der Barriere auf die Baumaußenseite (Folie entfernt)



Auswertung Wurzelbarrieren

Baumstandort:	T4
Kennung ID:	FP 6
Pflanze:	Populus c. Robusta
Versuchszeitraum:	Winter 2018/2019 - Aufgrabung August 2024
Barrieren-Art:	Folie
Werkstoff:	PE-HD
Tiefe:	1,10 m
Verbindung:	Schraubverbindung
Oberflächenstruktur:	glatt
Seitliches Umwachsen:	Ja
Unterwachsen von Wurzelschutzbarrieren:	Ja
Ein- und Durchwachsen von Verbindungen:	Ja



Draufsicht - Baumaußenseite

Steckverbindung zeigt Spalt, Durchwachsen von Wurzeln



Seitenansicht - Baumaußenseite

Wurzeln umwachsen Folie [Mitte]

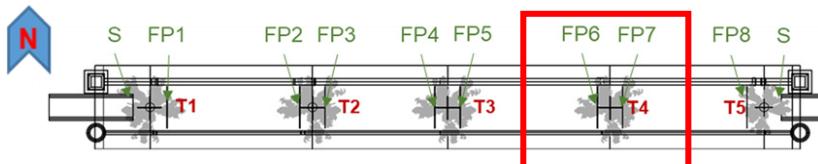
Seitenansicht - Baumaußenseite

Wurzeln unterwachsen die Folie [Rechts]



Auswertung Wurzelbarrieren

Baumstandort:	T4
Kennung ID:	FP 7
Pflanze:	Populus c. Robusta
Versuchszeitraum:	Winter 2018/2019 - Aufgrabung August 2024
Barrieren-Art:	Folie
Werkstoff:	PE-HD
Tiefe:	1,00 m
Verbindung:	Schraubverbindung
Oberflächenstruktur:	glatt
Seitliches Umwachsen:	Ja
Unterwachsen von Wurzelschutzbarrieren:	Ja
Ein- und Durchwachsen von Verbindungen:	Ja



Seitenansicht - Baumaußenseite

Wurzeln wachsen unterhalb der Barriere, kein vorheriger Wuchs an Folie, Hochwachsen nach Unterquerung [Links]

Seitenansicht - Baumaußenseite

Wurzeln wachsen um die Ränder [Mitte], Kurve von 90°



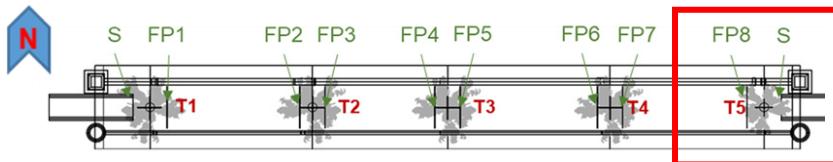
Seitenansicht - Baumaußenseite

Wurzeln sichtbar in Verbindung, keine Baumwurzeln (Gras von Oberfläche)



Auswertung Wurzelbarrieren

Baumstandort:	T5
Kennung ID:	FP 8
Pflanze:	Populus c. Robusta
Versuchszeitraum:	Winter 2018/2019 - Aufgrabung August 2024
Barrieren-Art:	Folie
Werkstoff:	PE-HD
Tiefe:	1,10 m
Verbindung:	ohne Verbindung
Oberflächenstruktur:	strukturiert
Seitliches Umwachsen:	Ja
Unterwachsen von Wurzelschutzbarrieren:	Ja
Ein- und Durchwachsen von Verbindungen:	keine Verbindung



Seitenansicht - Baumaußenseite

Folie wird an den Rändern umwachsen



Draufsicht - Baumaußenseite

Wurzeln wachsen unterhalb der Barriere, mehrere Stellen (3-4 cm stark Wurzeln), wachsen wieder hoch



Anlage 02

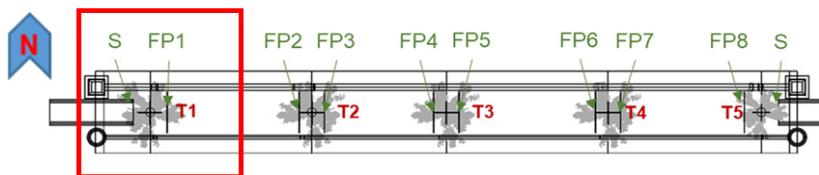
Auswertung porenaumarmer Verfüllstoff

Auswertung porenaumärmer Verfüllstoff

Baumstandort: T1
Kennung ID: S
Pflanze: Populus c. Robusta
Versuchszeitraum: Winter 2018/2019 - Aufgrabung August 2024

Barrieren-Art: Porenraumärmer Verfüllstoff
Breite: 40 cm

Wurzelinteraktion
Einwuchs in Bodenkörper: Ja



Draufsicht - Bauminnenseite

Wurzeln in den Block eingewachsen, zentraler Wuchs vom Baum an den Verfüllstoff



Seitenansicht - Bauminnenseite Wurzeln bis zu 2 cm dick, Wurzeln erzeugen Löcher im Verfüllstoff (mehrere cm tief)



Auswertung porenaumärmer Verfüllstoff

Baumstandort: T5
Kennung ID: S
Pflanze: Populus c. Robusta
Versuchszeitraum: Winter 2018/2019 - Aufgrabung August 2024

Barrieren-Art: Porenraumärmer Verfüllstoff
Breite: 50 cm

Wurzelinteraktion
Einwuchs in Bodenkörper: Ja



Draufsicht - Bauminnenseite

Wurzelwachstum an Trennfläche (seitlich),
Wurzel an Glasscheibe gewachsen und
anschließend quer durch den Verfüllstoff nach
unten (Linie), Wurzel kommt wieder heraus



Seitenansicht - Wurzelballen

Am entnommenen Wurzelballen hängt viel
Verfüllstoffmaterial, ein Loch wurde
gerissen, das Verfüllstoffmaterial ist an
mehreren Stellen durchwachsen



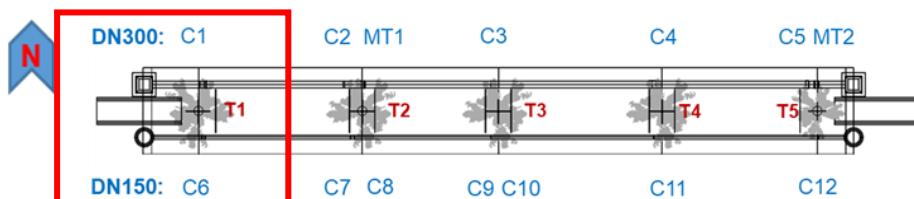
Auswertung Rohrverbindungen

Anlage 03

Auswertung Rohrverbindungen

Auswertung Rohrverbindungen

Baumstandort: T1
Kennung ID: DN 300 - C1
Pflanze: Populus c. Robusta
Versuchszeitraum: Winter 2018/2019 - Aufgrabung August 2024
Werkstoff: Beton
Muffenart: Standard-Steckmuffe
Wurzeln im Kontext zur Verbindung: Ja
Wurzeln von außen in Verbindung: Nein
Wurzeleinwuchs innen (TV-Inspektion): Nein
Wurzeleinwuchs nach Laboruntersuchung: Nein



Draufsicht - Aufgrabung

Wurzeln an/in Muffenspalt, teilweise wachsen
Wurzeln wieder raus, andere verschwinden



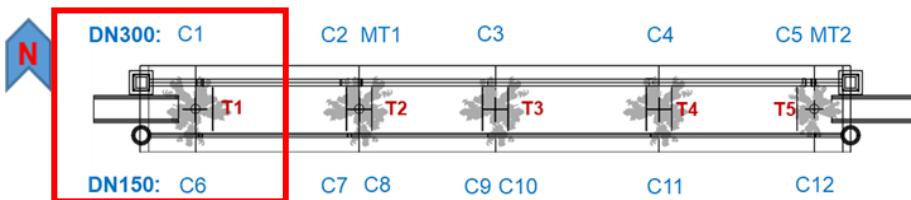
Innenansicht nach Schnitt - Labor

Wurzeln unterhalb des Dichtungsbandes
(1 cm), ganzer Rohrumfang



Auswertung Rohrverbindungen

Baumstandort: T1
Kennung ID: DN 150 - C6
Pflanze: Populus c. Robusta
Versuchszeitraum: Winter 2018/2019 - Aufgrabung August 2024
Werkstoff: PVC
Muffenart: Standard-Steckmuffe
Wurzeln im Kontext zur Verbindung: Ja
Wurzeln von außen in Verbindung: Nein
Wurzeleinwuchs innen (TV-Inspektion): Nein
Wurzeleinwuchs nach Laboruntersuchung: Nein



Draufsicht - Wurzelinteraktion [Oben links]



Draufsicht - Labor Muffe nach Schnitt [Unten links]

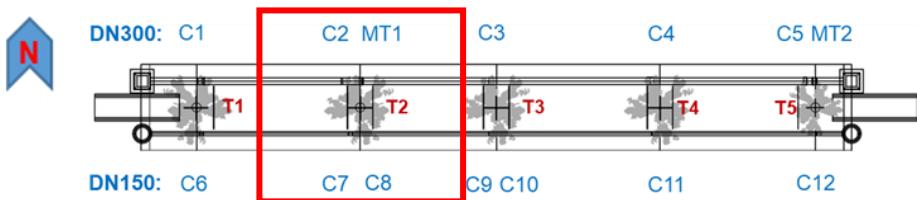


Draufsicht - Labor - Feinwurzeln an Dichtungsband [Rechts]



Auswertung Rohrverbindungen

Baumstandort: T2
Kennung ID: DN 300 - C2
Pflanze: Populus c. Robusta
Versuchszeitraum: Winter 2018/2019 - Aufgrabung August 2024
Werkstoff: Beton
Muffenart: Standard Steckmuffe
Wurzeln im Kontext zur Verbindung: Ja
Wurzeln von außen in Verbindung: Nein
Wurzeleinwuchs innen (TV-Inspektion): Nein
Wurzeleinwuchs nach Laboruntersuchung: Nein



Draufsicht - Aufgrabung

Wurzeln im Muffenspalt (Spannung)
Wurzeln wachsen auch wieder heraus



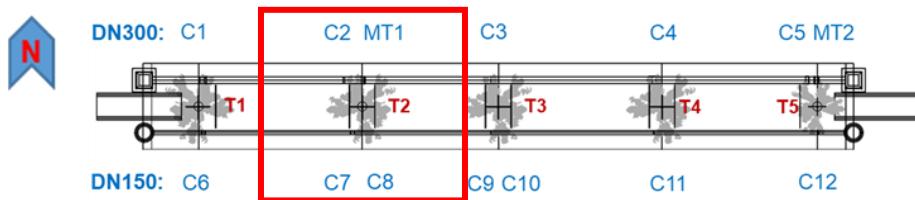
Draufsicht - Aufgrabung

Wurzeln wachsen an das Dichtungsband, kein Einwuchs



Auswertung Rohrverbindungen

Baumstandort: T2
Kennung ID: DN 300 - MT1
Pflanze: Populus c. Robusta
Versuchszeitraum: Winter 2018/2019 - Aufgrabung August 2024
Werkstoff: Beton/PVC
Muffenart: Übergangsmanschette
Wurzeln im Kontext zur Verbindung: Ja
Wurzeln von außen in Verbindung: Ja
Wurzeleinwuchs innen (TV-Inspektion): Ja
Wurzeleinwuchs nach Laboruntersuchung: Ja



Draufsicht - Aufgrabung/Labor

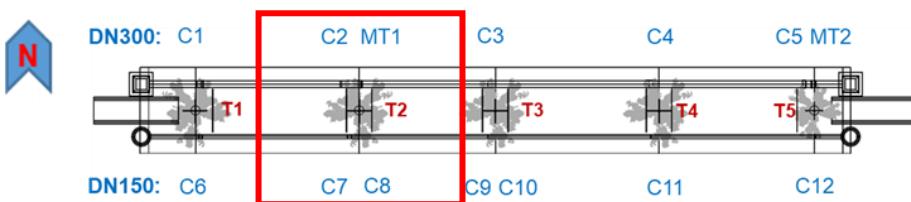
Wurzelwachstum wird am Rohr abgelenkt, Wurzeln wächst in Zwischenraum von Kunststoffelementen, Wurzeleinwuchs in die Rohrleitung



MT1

Auswertung Rohrverbindungen

Baumstandort: T2
Kennung ID: DN 150 - C7
Pflanze: Populus c. Robusta
Versuchszeitraum: Winter 2018/2019 - Aufgrabung August 2024
Werkstoff: PVC
Muffenart: Standard-Steckmuffe
Wurzeln im Kontext zur Verbindung: Ja
Wurzeln von außen in Verbindung: Nein
Wurzeleinwuchs innen (TV-Inspektion): Nein
Wurzeleinwuchs nach Laboruntersuchung: Ja



Draufsicht - Aufgrabung

Wurzeln werden an Rohr abgelenkt



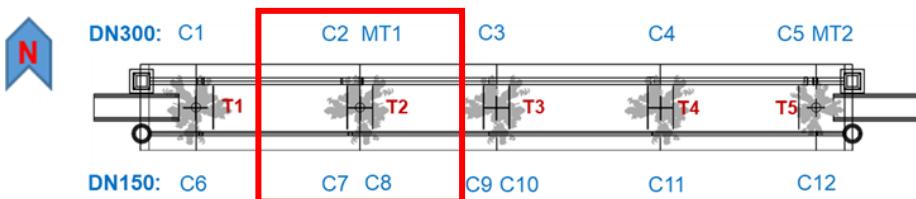
Draufsicht - Labor

Wurzeln wachsen an und überwinden Dichtungsband (Seitenwurzeln)



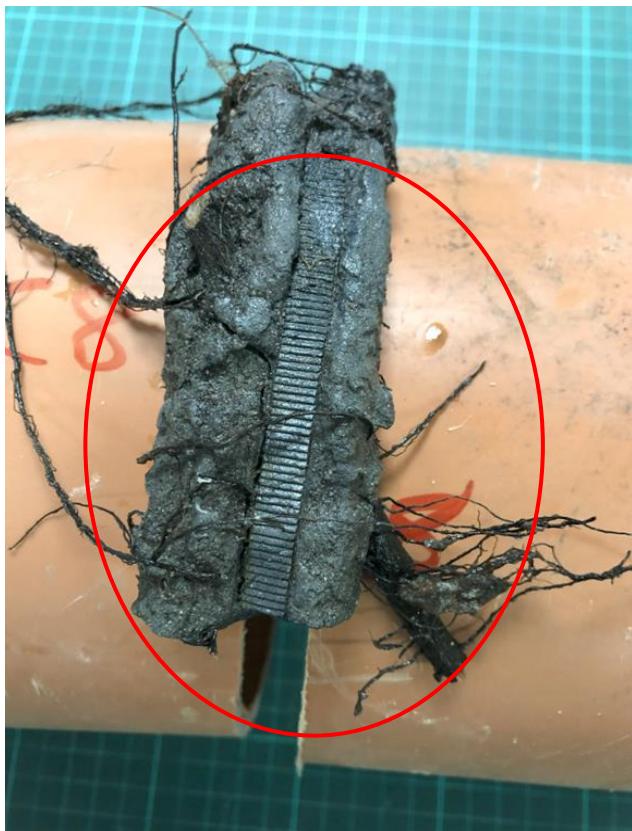
Auswertung Rohrverbindungen

Baumstandort: T2
Kennung ID: DN 150 - C8
Pflanze: Populus c. Robusta
Versuchszeitraum: Winter 2018/2019 - Aufgrabung August 2024
Werkstoff: PVC
Muffenart: Bentonitband
Wurzeln im Kontext zur Verbindung: Ja
Wurzeln von außen in Verbindung: Ja
Wurzeleinwuchs innen (TV-Inspektion): Ja
Wurzeleinwuchs nach Laboruntersuchung: Ja



Seitenansicht - Labor

Wurzel unterwächst Band und tritt wieder aus



Draufsicht - Labor

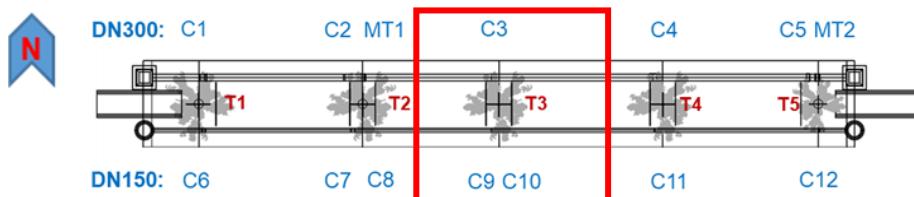
Entnommene Wurzel aus der Rohrleitung (ca. 30 cm lang)



C8

Auswertung Rohrverbindungen

Baumstandort: T3
Kennung ID: DN 300 - C3
Pflanze: Populus c. Robusta
Versuchszeitraum: Winter 2018/2019 - Aufgrabung August 2024
Werkstoff: PVC
Muffenart: Standard-Steckmuffe
Wurzeln im Kontext zur Verbindung: Nein
Wurzeln von außen in Verbindung: Nein
Wurzeleinwuchs innen (TV-Inspektion): Nein
Wurzeleinwuchs nach Laboruntersuchung: Nein



Seitenansicht - Aufgrabung

keine Wurzeln im Muffenbereich,
Wurzeln werden abgelenkt (bis 2,5 cm stark)



Seitenansicht - Labor

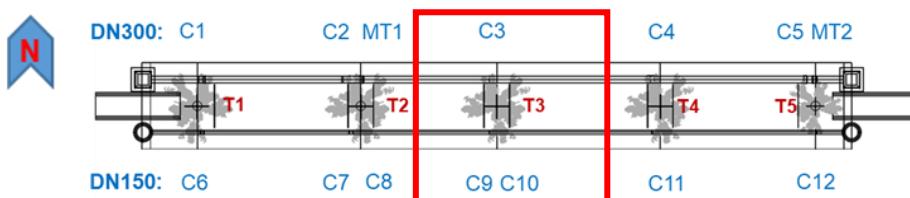
Wurzel wachsen an der Dichtung,
kein Einwuchs



C3

Auswertung Rohrverbindungen

Baumstandort: T3
Kennung ID: DN 150 - C9
Pflanze: Populus c. Robusta
Versuchszeitraum: Winter 2018/2019 - Aufgrabung August 2024
Werkstoff: PVC
Muffenart: Standard-Steckmuffe
Wurzeln im Kontext zur Verbindung: Ja
Wurzeln von außen in Verbindung: Ja
Wurzeleinwuchs innen (TV-Inspektion): Nein
Wurzeleinwuchs nach Laboruntersuchung: Nein



Draufsicht - Aufgrabung

Wurzeln im Muffenbereich,
Wurzel wächst in Muffenspalt



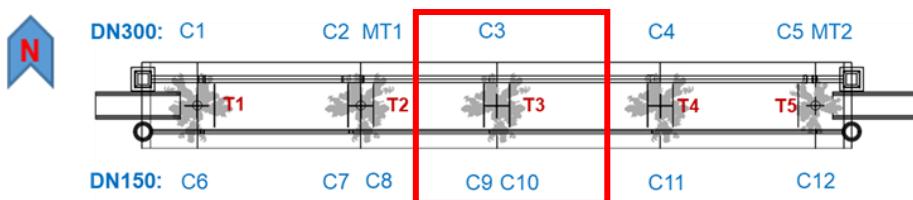
Draufsicht - Labor

Wurzeln wachsen an Dichtungsband, kein
Einwuchs



Auswertung Rohrverbindungen

Baumstandort: T3
Kennung ID: DN 150 - C10
Pflanze: Populus c. Robusta
Versuchszeitraum: Winter 2018/2019 - Aufgrabung August 2024
Werkstoff: PVC
Muffenart: Schrumpfschlauch
Wurzeln im Kontext zur Verbindung: Ja
Wurzeln von außen in Verbindung: Ja
Wurzeleinwuchs innen (TV-Inspektion): Nein
Wurzeleinwuchs nach Laboruntersuchung: Nein



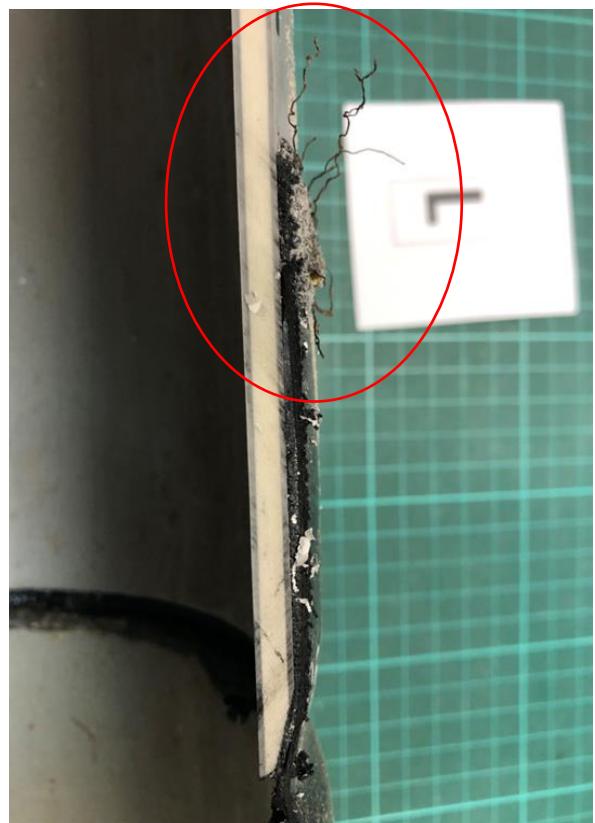
Draufsicht - Aufgrabung

Wurzeln im Muffenbereich,
Wurzel wachsen an Kleber (noch sehr fest)



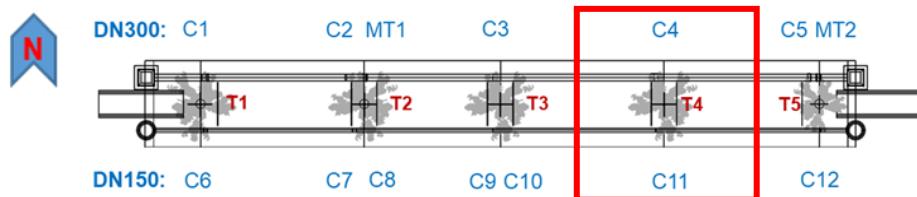
Seitenansicht - Labor

Wurzeln heften am Kleber, kein Eindringen in Klebestelle



Auswertung Rohrverbindungen

Baumstandort: T4
Kennung ID: DN 300 - C4
Pflanze: Populus c. Robusta
Versuchszeitraum: Winter 2018/2019 - Aufgrabung August 2024
Werkstoff: PP
Muffenart: Standard-Steckmuffe
Wurzeln im Kontext zur Verbindung: Ja
Wurzeln von außen in Verbindung: Nein
Wurzeleinwuchs innen (TV-Inspektion): Nein
Wurzeleinwuchs nach Laboruntersuchung: Nein



Draufsicht - Aufgrabung

Wurzeln werden an Rohr abgelenkt (auch in Struktur), Wurzeln im Muffenspalt und wachsen auch wieder raus



Draufsicht - Labor

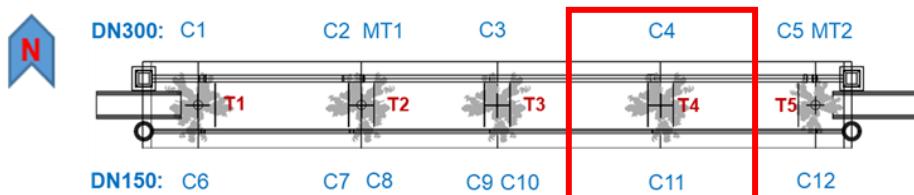
Wurzeln wachsen an Dichtung (rote Linie), kein Einwuchs



C4

Auswertung Rohrverbindungen

Baumstandort: T4
Kennung ID: DN 150 - C11
Pflanze: Populus c. Robusta
Versuchszeitraum: Winter 2018/2019 - Aufgrabung August 2024
Werkstoff: PP
Muffenart: Standard-Steckmuffe
Wurzeln im Kontext zur Verbindung: Ja
Wurzeln von außen in Verbindung: Nein
Wurzeleinwuchs innen (TV-Inspektion): Nein
Wurzeleinwuchs nach Laboruntersuchung: Ja



Seitenansicht - Aufgrabung

Wurzeln im Muffenbereich, Wurzel an Muffenspalt



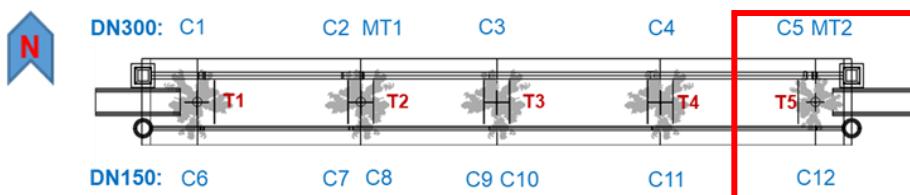
Seitenansicht - Labor

Wurzeln überwinden die Dichtung, Einwuchs in Muffenverbindung



Auswertung Rohrverbindungen

Baumstandort: T5
Kennung ID: DN 300 - C5
Pflanze: Populus c. Robusta
Versuchszeitraum: Winter 2018/2019 - Aufgrabung August 2024
Werkstoff: GFK
Muffenart: Standard-Steckmuffe
Wurzeln im Kontext zur Verbindung: Ja
Wurzeln von außen in Verbindung: Ja
Wurzeleinwuchs innen (TV-Inspektion): Nein
Wurzeleinwuchs nach Laboruntersuchung: Nein



Draufsicht - Aufgrabung

Wurzeln im Muffenbereich, kein Einwuchs in Muffe



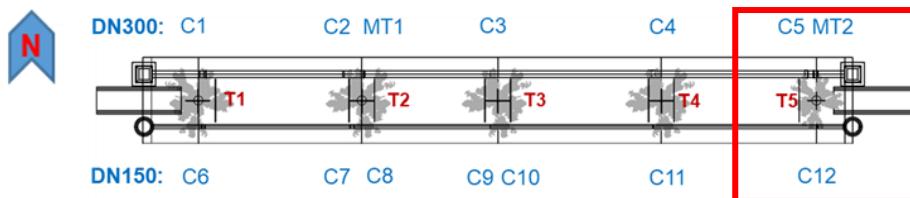
Draufsicht - Labor

Wurzeln an Dichtung (rote Linie), kein Einwuchs



Auswertung Rohrverbindungen

Baumstandort: T5
Kennung ID: DN 300 - MT2
Pflanze: Populus c. Robusta
Versuchszeitraum: Winter 2018/2019 - Aufgrabung August 2024
Werkstoff: Beton/GFK
Muffenart: Übergangsmanschette
Wurzeln im Kontext zur Verbindung: Ja
Wurzeln von außen in Verbindung: Ja
Wurzeleinwuchs innen (TV-Inspektion): Nein
Wurzeleinwuchs nach Laboruntersuchung: Nein



Draufsicht - Aufgrabung

Wurzeln (bis 2 cm stark) an Manschette,
Wachstum an Kanten der Manschette über Rohrumfang



Innensicht - Labor

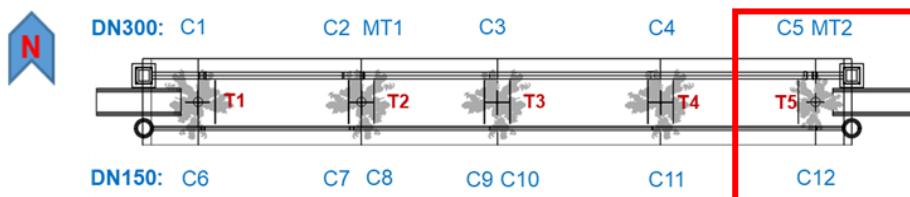
Wurzeln wachsen an Kunststoflippen, kein
Einwuchs



MT2

Auswertung Rohrverbindungen

Baumstandort: T5
Kennung ID: DN 150 - C12a
Pflanze: Populus c. Robusta
Versuchszeitraum: Winter 2018/2019 - Aufgrabung August 2024
Werkstoff: PP
Muffenart: Standard-Steckmuffe
Wurzeln im Kontext zur Verbindung: Nein
Wurzeln von außen in Verbindung: Nein
Wurzeleinwuchs innen (TV-Inspektion): Nein
Wurzeleinwuchs nach Laboruntersuchung: Nein



Draufsicht - Aufgrabung

keine Wurzeln an Muffenspalt sichtbar,
Wurzeln werden abgelenkt



Seitenansicht - Labor

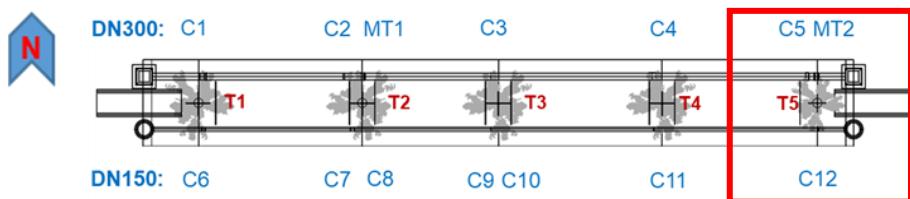
Wurzeln an Dichtung sichtbar, kein
Überwinden



C12a

Auswertung Rohrverbindungen

Baumstandort: T5
Kennung ID: DN 150 - C12b
Pflanze: Populus c. Robusta
Versuchszeitraum: Winter 2018/2019 - Aufgrabung August 2024
Werkstoff: PP
Muffenart: Standard-Steckmuffe
Wurzeln im Kontext zur Verbindung: Ja
Wurzeln von außen in Verbindung: Ja
Wurzeleinwuchs innen (TV-Inspektion): Nein
Wurzeleinwuchs nach Laboruntersuchung: Nein



Seitenansicht -

Wurzel unterwächst das Rohr (Pfeil)
Wurzeln an Muffenspalt, keine feste Verankerung



Seitenansicht - Labor

Wurzel an Dichtungsband
Wuchs an Rohrumfang, kein Einwuchs



C12b

Anlage 04

Auswertung Bäume

Auswertung Bäume

Baumstandort:

T1

Pflanze:

Populus c. Robusta

Versuchszeitraum:

Winter 2018/2019 - Aufgrabung August 2024

Baumalter:

6 Jahre

Baumhöhe:

8 m

Kronendurchmesser:

3,5 - 4 m

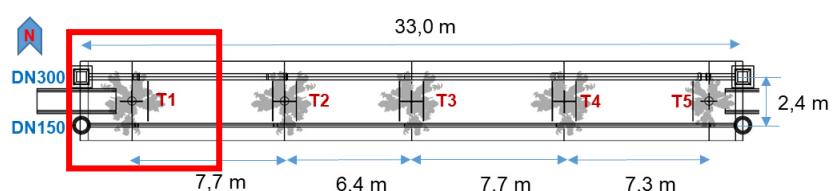
Stammdurchmesser [1m]:

18 cm

Vitalität:

Gut

Bemerkung:



T1

Auswertung Bäume

Baumstandort:

T2

Pflanze:

Populus c. Robusta

Versuchszeitraum:

Winter 2018/2019 - Aufgrabung August 2024

Baumalter:

6 Jahre

Baumhöhe:

8 m

Kronendurchmesser:

4,5 m

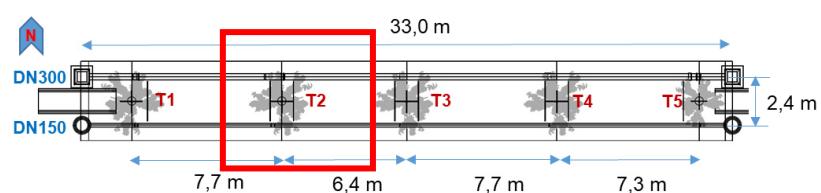
Stammdurchmesser [1m]:

18 cm

Vitalität:

Gut

Bemerkung:



T2

Auswertung Bäume

Baumstandort:

T3

Pflanze:

Populus c. Robusta

Versuchszeitraum:

Winter 2018/2019 - Aufgrabung August 2024

Baumalter:

6 Jahre

Baumhöhe:

8 m

Kronendurchmesser:

4 m

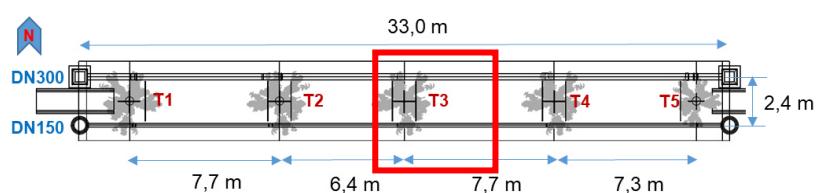
Stammdurchmesser [1m]:

19 cm

Vitalität:

Gut

Bemerkung:



T3

Auswertung Bäume

Baumstandort:

T4

Pflanze:

Populus c. Robusta

Versuchszeitraum:

Winter 2018/2019 - Aufgrabung August 2024

Baumalter:

6 Jahre

Baumhöhe:

8 m

Kronendurchmesser:

4 m

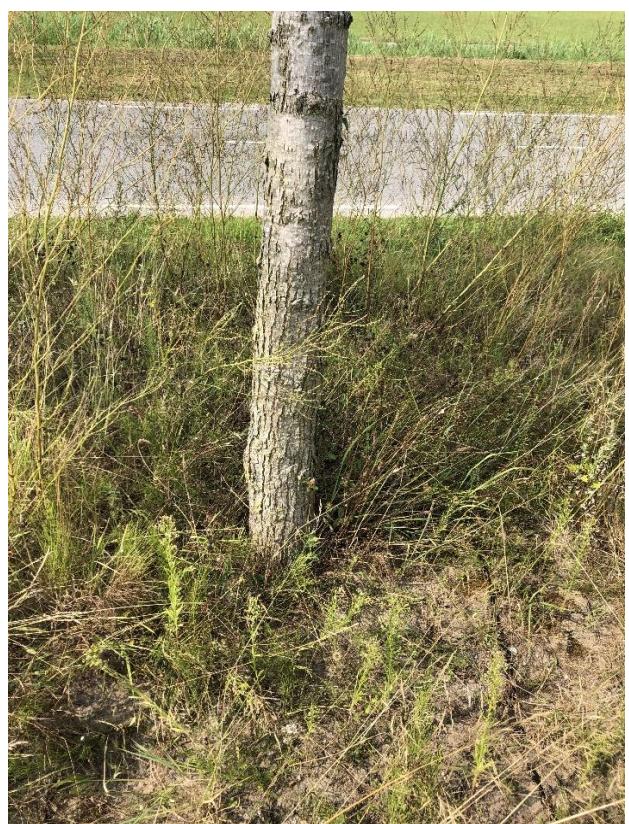
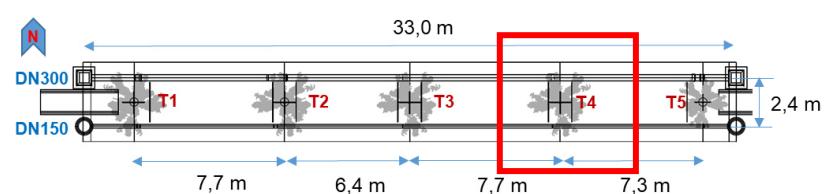
Stammdurchmesser [1m]:

17 cm

Vitalität:

Gut

Bemerkung:



T4

Auswertung Bäume

Baumstandort:

T5

Pflanze:

Populus c. Robusta

Versuchszeitraum:

Winter 2018/2019 - Aufgrabung August 2024

Baumalter:

6 Jahre

Baumhöhe:

10 m

Kronendurchmesser:

4 m

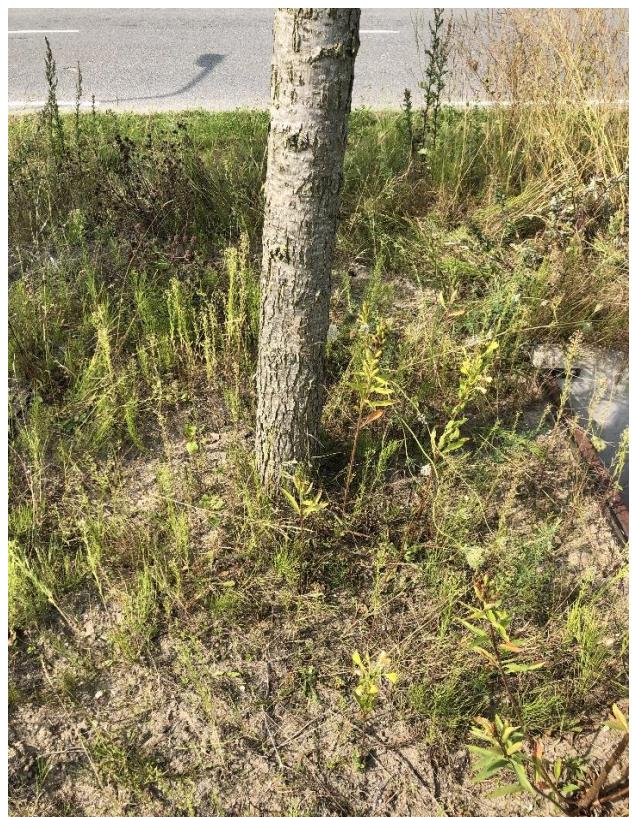
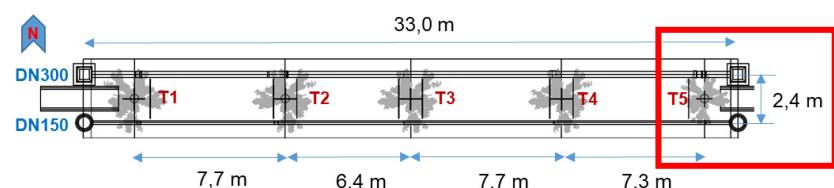
Stammdurchmesser [1m]:

17 cm

Vitalität:

Gut

Bemerkung:



T5