

Entwicklung eines biomechanischen Verfahrens zur Prüfung des Durchwurzelungswiderstands von Dichtungen für den Kanalrohrbau

AZ 24337

Endbericht

Projektleitung

Dipl.-Betriebswirt Frank Schlautmann
Prof. Dr. Elke Meinken



Theodor Cordes GmbH & Co.KG
Im Südfeld 3
48308 Senden-Bösensell

Projektbearbeitung:

Dipl.-Ing. (FH) Martin Jauch



Fachhochschule Weihenstephan
Forschungsanstalt für Gartenbau
Institut für Gartenbau
85350 Freising

April 2010

1	Einleitung	3
2	Material und Methoden	4
2.1	Erster Versuchsansatz mit Rohrverbindungen.....	4
2.1.1	Rohrverbindungen	4
2.1.2	Dichtungen	6
2.1.3	Weitere Daten zur Versuchsanlage und -durchführung	7
2.2	Zweiter Versuchsansatz mit Plattenstapel	12
2.2.1	Platten	13
2.2.2	Dichtungen	13
2.2.3	Weitere Daten zur Versuchsanlage und -durchführung	18
2.3	Auswertungen.....	20
3	Ergebnisse und Diskussion	21
3.1	Erste Zwischenauswertung der Kontrollgefäße (Juni 2007).....	21
3.1.1	Versuchsansatz mit Rohrverbindungen	21
3.1.1.1	Pflanzenentwicklung.....	21
3.1.1.2	Wurzeleindringungen und -durchdringungen	22
3.1.2	Versuchsansatz mit Plattenstapeln	24
3.1.2.1	Pflanzenentwicklung.....	24
3.1.2.2	Wurzeleindringungen und -durchdringungen	24
3.2	Zweite Zwischenauswertung der Kontrollgefäße (Dez. 2007).....	30
3.2.1	Versuchsansatz mit Rohrverbindungen	30
3.2.1.1	Pflanzenentwicklung.....	30
3.2.1.2	Wurzeleindringungen und -durchdringungen	31
3.2.2	Versuchsansatz mit Plattenstapeln	32
3.2.2.1	Pflanzenentwicklung.....	32
3.2.2.2	Wurzeleindringungen und -durchdringungen	32
3.3	Dritte Zwischenauswertung der Kontrollgefäße (Juni 2008)	37
3.3.1	Versuchsansatz mit Rohrverbindungen	37
3.3.1.1	Pflanzenentwicklung.....	37
3.3.1.2	Wurzeleindringungen und -durchdringungen	38
3.3.2	Versuchsansatz mit Plattenstapeln	39
3.3.2.1	Pflanzenentwicklung.....	39
3.3.2.2	Wurzeleindringungen und -durchdringungen	39

3.4	Endauswertung (Dezember 2008)	45
3.4.1	Kontrollgefäße mit Bitumenringen.....	45
3.4.1.1	Versuchsansatz mit Rohrverbindungen	45
3.4.1.1.1	Pflanzenentwicklung	45
3.4.1.1.2	Wurzeleindringungen und -durchdringungen.....	47
3.4.1.2	Versuchsansatz mit Plattenstapeln	49
3.4.1.2.1	Pflanzenentwicklung	49
3.4.1.2.2	Wurzeleindringungen und -durchdringungen.....	52
3.4.2	Gefäße mit SBR-Dichtungen	57
3.4.2.1	Versuchsansatz mit Rohrverbindungen	57
3.4.2.1.1	Pflanzenentwicklung	57
3.4.2.1.2	Wurzeleindringungen und -durchdringungen.....	58
3.4.2.2	Versuchsansatz mit Plattenstapeln	68
3.4.2.2.1	Pflanzenentwicklung	68
3.4.2.2.2	Wurzeleindringungen und -durchdringungen.....	69
4	Zusammenfassung und Ausblick	72
5	Literatur	75
6	Anhang	76
6.1	Messdaten zu den Rohrverbindungen.....	76
6.2	Angaben zu den Substrateigenschaften	90
6.3	Erläuterungen zum Boxplot.....	91
6.4	Angaben zum Pflanzenwachstum	92

1 Einleitung

Insbesondere im urbanen Verdichtungsraum zählen Wurzeleindringungen in erdüberschüttete Rohrleitungen von Entwässerungssystemen als eine der Hauptursachen für Schadensfälle im Kanalnetz. Neue Forschungsergebnisse zeigen, dass selbst intakte Verbindungen von Rohrleitungen nur wenig Widerstand gegen Durchwurzelungen bieten (STÜTZEL UND BOSSELER, 2004; HEIDGER UND KRÜCKEN, 2005). In Rohrleitungen eingewachsene Wurzeln bewirken Undichtigkeiten und in der Folge einen Austritt von Schmutzwasser (Exfiltration), das aufgrund seiner chemischen und biologischen Beschaffenheit oberflächennahes Grundwasser in erheblichem Umfang verunreinigen kann. Dies hat einschneidende Auswirkungen auf die Trinkwasserversorgung und die Wassergüte von grundwassergespeisten Oberflächengewässern. Liegen die Kanalrohre unterhalb des Grundwasserspiegels, führt ein Leck in der Rohrleitung zum Eindringen von Grundwasser (Infiltration). Die so erzeugte Drainage leitet erhöhte Wassermengen in das Kanalnetz, was zu einer hydraulischen Überlastung der Netze und zu einer relativ verminderten Reinigungsleistung der kommunalen Kläranlagen führen kann (BERGER UND LOHAUS, 2004). Die akute Problematik schadhafter Abwasserkanäle erfordert rasche und aufwändige Sanierungsarbeiten, um einen schadlosen Abfluss des Abwassers wieder herzustellen.

Den Herstellern von Dichtungssystemen für den Kanalrohrbau fehlen - laut einer umfangreichen Studie der Ruhr-Universität Bochum und des Instituts für Unterirdische Infrastruktur - auf Ergebnissen geeigneter Prüfungen basierende Hinweise zur Entwicklung wurzelfester Rohrverbindungen (STÜTZEL UND BOSSELER, 2004). Die derzeit angewandten Verfahren zur Prüfung der Wurzelfestigkeit von Rohrverbindungen stützen sich auf das Dichtheits-Prinzip unter Last bzw. Beanspruchung - basierend auf der Annahme, dass allein die Höhe des Anpressdrucks einer Dichtung deren Wurzelfestigkeit beeinflusst (DIN V 1201, 2004; DIN EN 1916, ANHANG E, 2002). Insgesamt gelten die bislang angewandten Prüfverfahren als wenig aussagekräftig.

Ziel des an der Staatlichen Forschungsanstalt für Gartenbau Weihenstephan (FGW) durchgeführten Forschungsprojektes war daher die Erarbeitung eines biomechanischen Prüfverfahrens, das den Herstellern von Rohrdichtungen bzw. Rohrverbindungen eine aussagekräftige Bewertung ihrer am Markt befindlichen bzw. neu zu entwickelnden Werkstoffe ermöglicht.

2 Material und Methoden

Es wurden zwei mehrfaktorielle Versuchsansätze mit jeweils zweijähriger Dauer durchgeführt, die zeitgleich begonnen und beendet wurden. In beiden Fällen sollte in Großgefäßen durch einen beengten Wurzelraum, eine dichte Bepflanzung mit unterschiedlichen wurzelaggressiven Gehölzen sowie optimierte Vegetationsbedingungen der gewünschte hohe Wurzeldruck auf die zu prüfenden Dichtungsmaterialien erzeugt werden.

Beide Ansätze lehnten sich so weit als möglich an die Testbedingungen (Versuchsgefäße, Standort, Pflanzdichte, Substrat, Wurzelraum, Bewässerung, Versuchsdauer) des anerkannten und bewährten FLL-Verfahrens zur Untersuchung der Wurzelfestigkeit von Bahnen und Beschichtungen für Dachbegrünungen an (FORSCHUNGSGESELLSCHAFT LANDSCHAFTSENTWICKLUNG LANDSCHAFTSBAU E. V., 2008).

2.1 Erster Versuchsansatz mit Rohrverbindungen

Im ersten Versuchsansatz wurden Rohrverbindungen mit praxisüblich installierten Dichtungen in Gefäße eingebaut, um die Interaktion zwischen Wurzeln und Dichtung unter realitätsnahen Bedingungen untersuchen zu können. Der Versuch umfasste die Prüfung von drei unterschiedlichen Dichtungsmaterialien jeweils in Kombination mit drei verschiedenen Gehölzarten. Ferner wurde die Verpressung der Dichtungen in zwei Stufen variiert.

2.1.1 Rohrverbindungen

Die von der Theodor Cordes GmbH & Co. KG bereitgestellten Betonrohr-Abschnitte, ca. 20 cm lange Muffen und rund 38 cm lange Spitzenden, wurden vor dem Anbringen der Dichtungen mit einem Hochdruckreiniger von anhaftendem Betonstaub, der aufgrund seiner hohen Alkalität das Wurzelwachstum beeinträchtigen kann, befreit. Die Muffen und Spitzenden wurden danach von einem Mitarbeiter der Theodor Cordes GmbH & Co. KG im Hinblick auf die Spaltweiten exakt vermessen, um die passenden Kombinationen für die einzustellenden unterschiedlichen Verpressungen der Dichtungen zusammenstellen zu können. Die Messdaten der einzelnen Rohrabschnitte sind im Anhang aufgeführt.

Die Länge der zusammengesetzten Rohrverbindung mit einem Innendurchmesser von 30 cm und einem Außendurchmesser von ca. 55 cm lag bei rund 50 cm (Abb. 1).



Abb. 1: Aus Spitzende (oben) und Muffe (unten) zusammengesetzte Rohrverbindung

Aufgrund der Geometrie der Rohrverbindung (Abb. 2) war die eingebaute Dichtung für Wurzeln nur über einen verwinkelten rund 2 mm breiten Spalt zugänglich. Die aus der Spaltbreite und dem Rohrumfang in diesem Bereich (ca. 130 cm) errechnete potenzielle Kontaktfläche von Wurzeln und Dichtung an der Stützscherle war mit 26 cm² sehr gering.

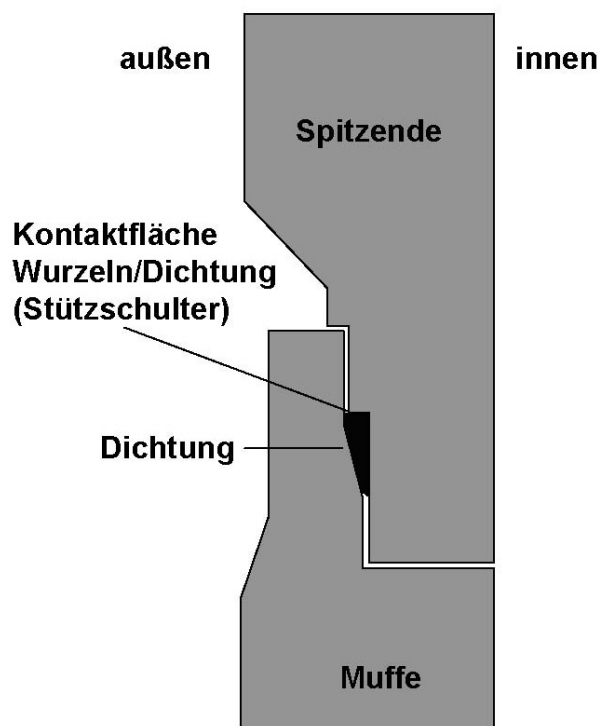


Abb. 2: Schematische Darstellung der Geometrie der Rohrverbindung

2.1.2 Dichtungen

Es wurden drei unterschiedliche von der Theodor Cordes GmbH & Co. KG hergestellte Dichtungsringe mit keilförmigem Querschnitt verwendet. Die auf derselben Werkstoffbasis (Styrol-Butadien-Kautschuk / Styrene Butadiene Rubber / SBR) produzierten Ringe trugen die Bezeichnung SBR, SBR WS und SBR WS-CX. Die SBR-WS- und die SBR-WS-CX-Dichtungen enthielten ein Additiv, das zusätzlichen Schutz vor eindringenden bzw. durchdringenden Wurzeln bieten soll. Die Dichtungen wurden unter Verwendung eines Gleitmittels auf die Spitzenden aufgezogen und mit dem maschinenunterstützten Anfügen der passenden Muffe um 10 bzw. 35 % verpresst. Pro Dichtung und Verpressung wurden 12 Rohrverbindungen hergestellt, wobei jeweils 4 mit derselben Pflanzenart bepflanzt wurden (Tab. 1).

Als Kontrollmaterial dienten Streifen einer 4 mm dicken Bitumenschweißbahn (V 60 S4, gemäß DIN EN 13707). Bitumenschweißbahnen bieten keinen dauerhaften Widerstand gegen Wurzeleindringungen oder -durchdringungen. Mit dem gewünschten Einwachsen in das bituminöse Material sollte nachgewiesen werden, dass die Wurzeln der verwendeten Pflanzenarten grundsätzlich in der Lage waren, den sehr schmalen abgedichteten Bereich der Rohrverbindung aufzuspüren. Von der Bitumenschweißbahn wurden 5 cm breite und ca. 125 cm lange Streifen mit einem Propangasbrenner auf die Spitzenden der Rohrabschnitte aufgeschweißt (Abb. 3).



Abb. 3: Auf das Spitzende aufgeschweißter Bitumenring

Die sich bei der Verbindung mit der Muffe einstellende Verpressung der Bitumenringe wurde nicht gemessen. Sie kann jedoch als sehr gering angenommen werden, da sich die beiden Rohrabschnitte ohne Maschineneinsatz verbinden ließen. Insgesamt wurden 48 Rohrverbindungen (16 pro Pflanzenart) mit Bitumenringen versehen (Tab. 1).

Tab. 1: Versuchsumfang (Ansatz mit Rohrverbindungen)

Dichtung	Verpressung	Pflanzenart	Anzahl Gefäße
SBR	10 %	<i>Pyracantha coccinea</i>	4 ¹⁾
		<i>Ficus carica</i> var. <i>caprificus</i>	4 ¹⁾
		<i>Ficus benjamina</i>	4 ¹⁾
	35 %	<i>Pyracantha coccinea</i>	4 ¹⁾
		<i>Ficus carica</i> var. <i>caprificus</i>	4 ¹⁾
		<i>Ficus benjamina</i>	4 ¹⁾
SBR WS	10 %	<i>Pyracantha coccinea</i>	4 ¹⁾
		<i>Ficus carica</i> var. <i>caprificus</i>	4 ¹⁾
		<i>Ficus benjamina</i>	4 ¹⁾
	35 %	<i>Pyracantha coccinea</i>	4 ¹⁾
		<i>Ficus carica</i> var. <i>caprificus</i>	4 ¹⁾
		<i>Ficus benjamina</i>	4 ¹⁾
SBR WS-CX	10 %	<i>Pyracantha coccinea</i>	4 ¹⁾
		<i>Ficus carica</i> var. <i>caprificus</i>	4 ¹⁾
		<i>Ficus benjamina</i>	4 ¹⁾
	35 %	<i>Pyracantha coccinea</i>	4 ¹⁾
		<i>Ficus carica</i> var. <i>caprificus</i>	4 ¹⁾
		<i>Ficus benjamina</i>	4 ¹⁾
Kontrolle (Bitumen, V 60 S4)	nicht definiert	<i>Pyracantha coccinea</i>	16 ²⁾
		<i>Ficus carica</i> var. <i>caprificus</i>	16 ²⁾
		<i>Ficus benjamina</i>	16 ²⁾

¹⁾Auswertung der 4 Gefäße nach 24 Monaten (Ende des Versuchs)

²⁾Auswertung von jeweils 4 Gefäßen während des Versuchs, nach 6, 12 und 18 Monaten sowie zum Ende des Versuchs nach 24 Monaten

2.1.3 Weitere Daten zur Versuchsanlage und -durchführung

Die mit den unterschiedlichen Dichtungen bestückten Rohrabschnitte wurden mit Hilfe einer Hubvorrichtung vertikal, mit der Muffe nach unten, in die Versuchsgefäße eingebaut (Abb. 4 und 5). Bei den Gefäßen handelte es sich um PE-Baumschulcontainer mit ca. 230 Liter Fassungsvermögen (Innen-Ø: 78 cm, Außen-Ø: 85 cm, Höhe: 55 cm), die am Boden mit 8 Bohrungen (Ø 13 mm) versehen wurden, um einen freien Wasserablauf sicherzustellen.

Die Gefäße wurden aufgeständert in einem klimatisierten Gewächshaus (Heiztemperatur tags 18 °C, nachts 16 °C, Lüftungstemperatur 25 °C) aufgestellt, damit ein ganzjähriges Wachstum der Testpflanzen gewährleistet war (Abb. 6).



Abb. 4: Einbau einer Rohrverbindung in ein Versuchsgefäß

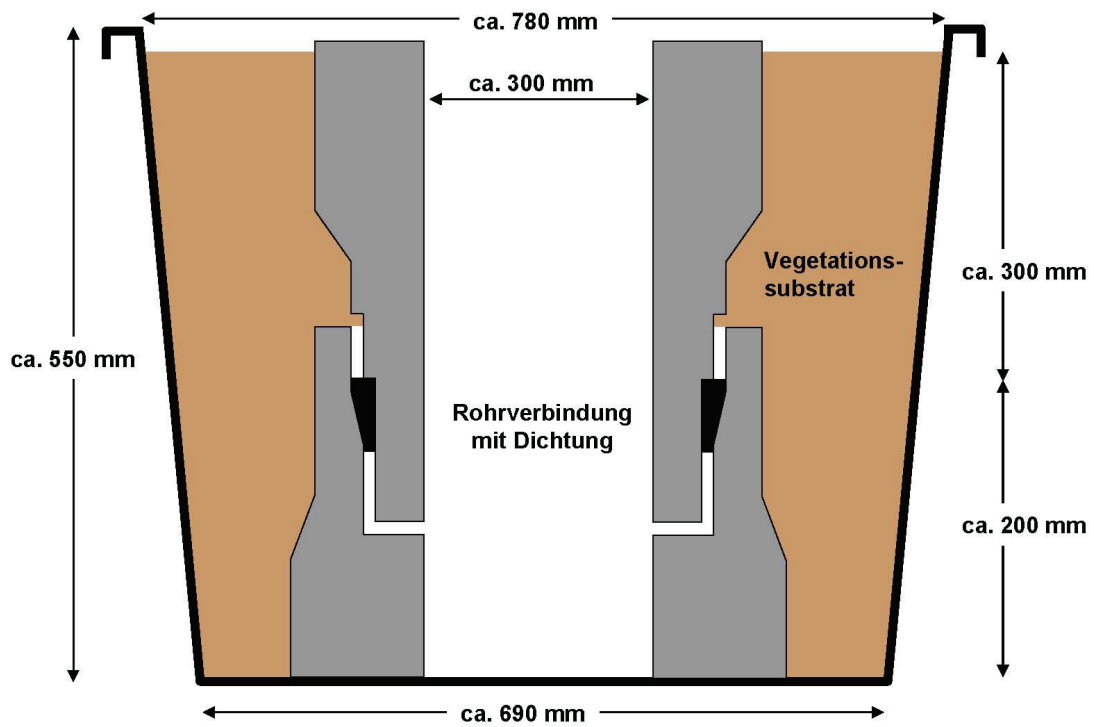


Abb. 5: Maße des Versuchsgefäßes und Lage der Rohrverbindung (Querschnitt, nicht maßstabsgerecht)

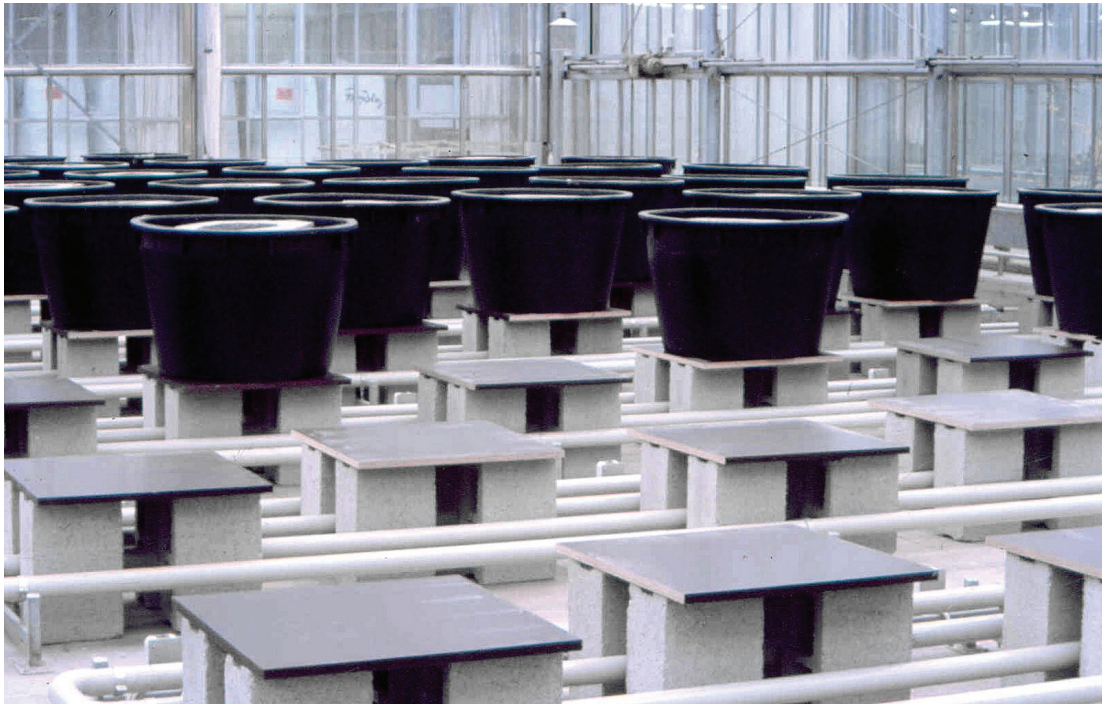


Abb. 6: Versuchsanlage im Gewächshaus

Der Raum zwischen Gefäßwand und Rohrverbindung wurde mit rund 100 l eines Vegetationssubstrats, zusammengesetzt aus 70 Vol.-% norddeutschem Hochmoortorf und 30 Vol.-% Perlite 3-6 mm, verfüllt. Das von den Einheitserde- und Humuswerken Gebr. Patzer GmbH & Co. KG bezogene Substrat wies einen günstigen pH-Wert, einen geringen Salzgehalt sowie die gewünschten geringen Nährstoffgehalte auf (Tab. 10 im Anhang). Die Vegetationsfähigkeit des Substrats wurde vor der Verwendung anhand eines Keimpflanzentests mit Chinakohl (VERBAND DEUTSCHER LANDWIRTSCHAFTLICHER UNTERSUCHUNGS- UND FORSCHUNGSANSTALTEN, 2007) mit positivem Ergebnis geprüft (Tab. 11 im Anhang).

Als Testpflanzen wurden mit *Pyracantha coccinea* 'Orange Charmer' (Feuerdorn), *Ficus carica* var. *caprificus* (Ziegenfeige) und *Ficus benjamina* (Birkenfeige) drei Arten verwendet, die sich in zurückliegenden Versuchen als wurzelaggressiv erwiesen hatten (FORSCHUNGSANSTALT FÜR GARTENBAU WEIHENSTEPHAN, UNVERÖFFENTLICHT). Feuerdorn und Ziegenfeige stammten aus FGW-eigener, rund einjähriger Anzucht, während die Birkenfeige von der Landgard Blumen & Pflanzen GmbH in 85609 Aschheim bezogen wurde. Die Pflanzen wurden vermessen und anschließend sortiert, um bei allen Versuchsgefäßen einen möglichst einheitlichen Bestand zu erzielen.

Die im 2-Liter-Container kultivierten *Pyracantha* wiesen mit einem mittleren Stammdurchmesser von 1,2 cm und einer mittleren Höhe von 102 cm eine ähnliche Größe wie die in den gleichen Gefäßen kultivierten *Ficus carica* auf (mittlerer Stammdurchmesser 1,2 cm, mittlere Höhe 98 cm) auf. Bei den ebenfalls rund 1 Jahr alten *Ficus benjamina* befanden sich - wie handelsüblich - 3 Pflanzen im rund 3 Liter fassenden Kulturgefäß. Die Einzelpflanzen wiesen einen mittleren Stammdurchmesser von 1,1 cm und eine mittlere Höhe von 102 cm auf (Abb. 87 und 88 im Anhang). Pro Versuchsgefäß wurden 4 Pflanzen in den beengten Raum zwischen Gefäßwand und Rohrverbindung gesetzt. Die Bewässerung erfolgte von Hand mit Freisinger Leitungswasser (16 °dKH). Der Gießzeitpunkt wurde anhand der Saugspannung des Substrats, die mit je einem Tensiometer/Gefäß erfasst wurde, festgelegt. Um ein gutes Anwachsen der Gehölze sicherzustellen, erfolgte in den ersten 8 Wochen nach der Bepflanzung eine Bewässerung, sobald die Saugspannung einen Wert von -100 hPa unterschritt. Im weiteren Versuchsverlauf wurde erst dann bewässert, wenn die Saugspannung auf einen Wert unter -300 hPa absank.

Zur Pflanzung wurden pro Gefäß 75 g eines langsam wirkenden, umhüllten Mehrnährstoffdüngers mit einer Wirkungsdauer von rund 6 Monaten gegeben. Die Düngung wurde im halbjährlichen Abstand wiederholt (Nährstoffgehalte des Düngemittels: 15 % N, 9 % P₂O₅, 5 % K₂O, 2,5 % MgO + Spurenelemente).

Bei Schädlingsbefall der Pflanzen wurden geeignete Pflanzenschutzmaßnahmen durchgeführt. Ein Rückschnitt der Pflanzen in der Höhe wie auch an den Seiten wurde bei Bedarf durchgeführt.

Die nach oben offenen Rohrverbindungen wurden mit einem 500 g/m² schweren Vlies abgedeckt, das ständig feucht gehalten wurde. Das dadurch im Innern der Rohrabschnitte geschaffene feuchte Klima sollte ein Weiterwachsen der durch die Dichtungen durchgedrungenen Wurzeln begünstigen.

Da außer den Daten zu Versuchsende auch der zeitliche Verlauf der Einwirkung der Wurzeln auf die Dichtungen der Rohrverbindung festgehalten werden sollte, wurden im Abstand von sechs Monaten jeweils vier Kontrollgefäße/Pflanzenart ausgewertet, d.h. die Bitumenringe der Rohrverbindungen auf Wurzeleindringungen und -durchdringungen untersucht. Die Varianten wurden in 4-facher Wiederholung angelegt. Der Versuchsansatz umfasste insgesamt 120 Rohrverbindungen bzw. Gefäße (Tab. 1).

Eine Übersicht der wichtigsten Daten zur Versuchsanlage und -durchführung wird in Tab. 2 vermittelt.

Tab. 2: Daten zur Versuchsanlage und -durchführung (Rohrverbindungen)

Rohrabschnitte	abgelängte Betonrohre, Spitzende ca. 38 cm lang, Muffe ca. 20 cm lang, Innen-Ø: ca. 30 cm, Außen-Ø: ca. 55 cm
Dichtungen	<ul style="list-style-type: none"> • drei unterschiedlich konzipierte Dichtungsringe mit keilförmigem Querschnitt auf Styrol-Butadien-Kautschuk-Basis (SBR, SBR WS und SBR WS-CX) der Theodor Cordes GmbH & Co. KG • streifenförmige Teilstücke einer 4 mm dicken Bitumenschweißbahn (V 60 S4) als Kontrolle
Verpressung der Dichtungen	<ul style="list-style-type: none"> • SBR-Dichtungen um jeweils 10 und 35 % • Kontrolle: nicht definiert
Versuchsgefäße	PE-Baumschulcontainer 230 L: Innen-Ø: 78 cm, Außen-Ø: 85 cm, Höhe: 55 cm, mit freiem Wasserablauf
Vegetationssubstrat	aufgekalkte und aufgedüngte Mischung aus 70 Vol.-% norddeutschem Hochmoortorf + 30 Vol.-% Perlite 3-6 mm
Testpflanzenarten	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Pyracantha coccinea</i> 'Orange Charmer' (Feuerdorn) • <i>Ficus carica</i> var. <i>caprificus</i> (Ziegenfeige) • <i>Ficus benjamina</i> (Birkenfeige)
Pflanzdichte	4 Pflanzen/Gefäß
Standort	klimatisiertes Gewächshaus (Heizungstemperatur tags 18 °C, nachts 16 °C, Lüftungstemperatur 22 °C, keine Schattierung)
Pflege der Pflanzen	<ul style="list-style-type: none"> • Bewässerung: von Hand mit Freisinger Leitungswasser (16 °dKH) bei einer Sauspannung des Substrats < -300 hPa • Düngung: halbjährlich pro Gefäß mit 75 g eines langsam wirkenden, umhüllten Mehrnährstoffdüngers mit einer Wirkungsdauer von rund 6 Monaten (Nährstoffgehalte: 15 % N, 9 % P₂O₅, 5 % K₂O, 2,5 % MgO + Spurenelemente) • Pflanzenschutz: bei Bedarf • Rückschnitt: bei Bedarf
Versuchsbeginn	KW 49/2006 (Pflanzung)
Versuchsende	KW 46 bis 48/2008 (Auswertung)
Auswertungen	Kontrollvariante mit Bitumenschweißbahn-Ringen: alle 6 Monate Pflanzenhöhe und Stammdurchmesser sowie Wurzeleindringungen und -durchdringungen SBR-Varianten: nach 24 Monaten (Versuchsende) Pflanzenhöhe und Stammdurchmesser sowie Wurzeleindringungen und -durchdringungen
Versuchsanlage	dreifaktorielle Blockanlage (Faktoren: Pflanzenart, Dichtungsart, Verpressung) in 4 Wiederholungen

2.2 Zweiter Versuchsansatz mit Plattenstapel

Der zweite Versuchsansatz wich von den Praxisbedingungen ab, indem ringförmige Dichtungen lose als Zwischenlagen von übereinander gestapelten Betonplatten verlegt und in ein Gefäß eingebaut wurden (Abb. 7). Mittels unterschiedlich dimensionierter Distanzelemente zwischen den Platten und einer Verschraubung des gesamten Plattenstapels ermöglichte dieser Ansatz die Prüfung des Widerstands der Dichtungsmaterialien gegen Durchwurzelungen bei einem fünffach abgestuften Anpressdruck innerhalb eines Gefäßes. Der Versuch umfasste die Prüfung von 2 unterschiedlichen Dichtungsmaterialien jeweils in Kombination mit drei verschiedenen Gehölzarten.

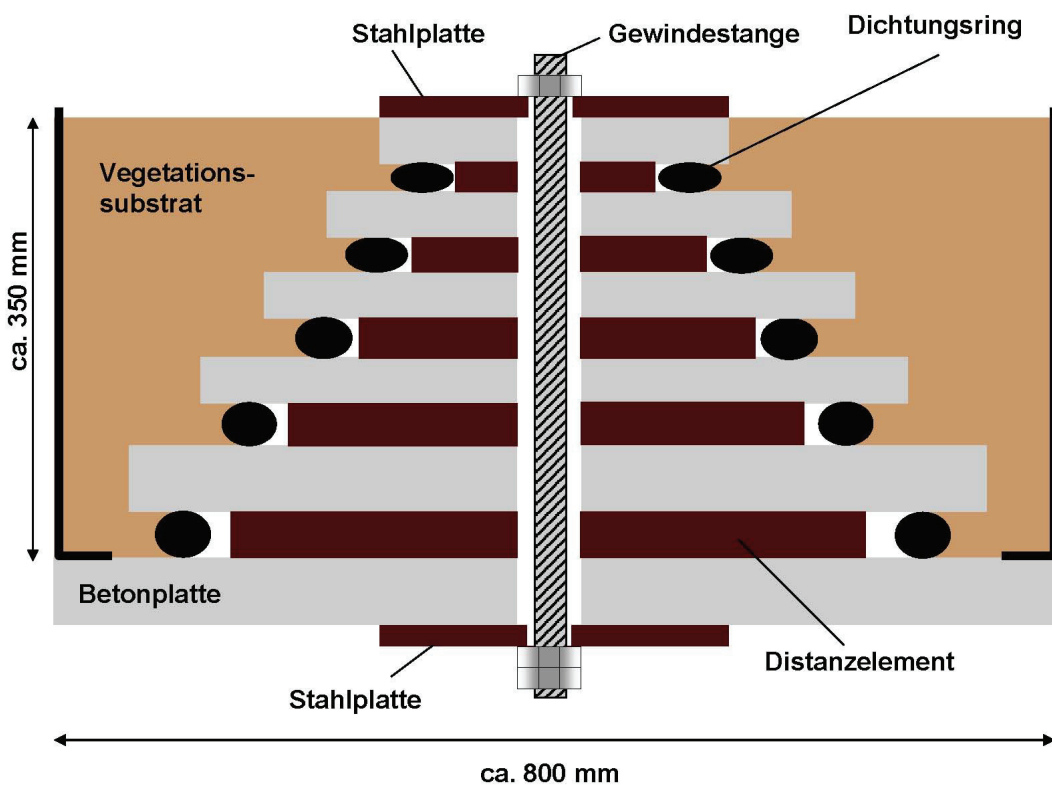


Abb. 7: Maße des Versuchsgefäßes sowie Lage der Betonplatten und Dichtungsringe (Querschnitt, nicht maßstabsgerecht)

2.2.1 Platten

Die von der Theodor Cordes GmbH & Co. KG in unterschiedlichen Größen (800 x 800 x 80 mm, 700 x 700 x 70 mm, 600 x 600 x 60, 500 x 500 x 50 mm, 400 x 400 x 50 mm und 300 x 300 x 50 mm) bereitgestellten Betonplatten wurden entsprechend den Rohrverbindungen des 1. Versuchsansatzes vor dem Auflegen der Dichtungen mit einem Hochdruckreiniger gesäubert. Die z.T. armierten Platten wurden mittig mit einer Bohrung versehen.

2.2.2 Dichtungen

Es wurden zwei unterschiedliche von der Theodor Cordes GmbH & Co. KG wiederum auf der Basis von Styrol-Butadien-Kautschuk hergestellte ringförmige Dichtungen (SBR, SBR WS) verwendet. Die Dichtung SBR WS war mit einem speziellen Wurzelschutz ausgerüstet. Die 20 mm dicken Dichtungsringe wiesen entsprechend der Platten, auf denen sie lose verlegt wurden, unterschiedliche Durchmesser auf (Tab. 3). Auf die untersten Platten (800 x 800 mm) wurden zentriert Dichtungsringe mit einem Außendurchmesser von 650 mm gelegt. Innerhalb der Ringe wurden sternförmig 18 mm dicke Distanzelemente aus Vierkantstahl angebracht, die als Begrenzung der Verpressung dienten (Abb. 8). Bei den nachfolgend aufgelegten kleineren Platten wurde ebenso verfahren. Die Maße der Dichtungen und der Distanzelemente sowie die dazugehörigen Plattenformate sind in Tabelle 3 dargestellt.



Abb. 8: Lage der Dichtung und der Distanzelemente zwischen zwei Platten

Tab. 3: Maße der Platten, SBR-Dichtungen und Distanzelemente sowie die erzielte Verpressung nach Verschrauben der Platten

Plattengröße (mm)	Dichtungsring	Größe der Dichtungsringe ohne Verpressung (mm)			Dicke	Höhe der Distanzelemente (mm)	Verpressung	
		Durchmesser					(mm)	(%)
		innen	mittig	außen				
300 x 300 x 50	1	210	230	250	20	13	7	35
400 x 400 x 50		2	310	330	350	20	14	6
500 x 500 x 50	3		410	430	450	20	15	5
600 x 600 x 60		4	510	530	550	20	16	4
700 x 700 x 70	5		610	630	650	20	18	2
800 x 800 x 80								

Tab. 4: Versuchsumfang (Plattenstapel)

Dichtung	Verpressung bzw. Anpressdruck	Pflanzenart	Anzahl Gefäße
SBR	10, 20, 25, 30 und 35 % ¹⁾	<i>Pyracantha coccinea</i>	4 ³⁾
		<i>Ficus carica var. caprificus</i>	4 ³⁾
		<i>Ficus benjamina</i>	4 ³⁾
SBR WS	10, 20, 25, 30 und 35 % ¹⁾	<i>Pyracantha coccinea</i>	4 ³⁾
		<i>Ficus carica var. caprificus</i>	4 ³⁾
		<i>Ficus benjamina</i>	4 ³⁾
V 60 S4	0,51 N/cm ² , 0,97 N/cm ² , 1,48 N/cm ² , 2,18 N/cm ² und 3,27 N/cm ² ²⁾	<i>Pyracantha coccinea</i>	16 ⁴⁾
		<i>Ficus carica var. caprificus</i>	16 ⁴⁾
		<i>Ficus benjamina</i>	16 ⁴⁾

¹⁾Verpressung der 20 mm dicken Dichtungsringe auf die angegeben Werte durch unterschiedlich dicke Distanzelemente zwischen den Platten (Anpressdruck wird durch Verschraubung der Platten erzeugt)

²⁾Verpressung der zu 20 mm dicken Ringen zusammengefassten Bitumenformteile nicht definiert. Anpressdruck wird durch das Gewicht der aufliegenden Platten erzeugt (Tab. 7).

³⁾Auswertung der 4 Gefäße nach 24 Monaten (Ende des Versuchs)

⁴⁾Auswertung von jeweils 4 Gefäßen während des Versuchs nach 6, 12 und 18 Monaten sowie zum Ende des Versuchs und 24 Monaten

Nach dem Anbringen einer 10 mm dicken Stahlplatte an der obersten und untersten Betonplatte zur Druckaufnahme und -verteilung wurden die zu einem pyramidenähnlichen Stapel zusammengefügt Platten mit Hilfe einer Gewindestange verschraubt. Dabei wurden die Dichtungen von 20 mm auf 18, 16, 15, 14 bzw. 13 mm (um 10, 20, 25, 30 und 35 %) verpresst (Abb. 9 und Tab. 3). Die höchste Verpressung erfolgte beim obersten (kleinsten) Dichtungsring, die geringste Verpressung beim untersten (größten) Ring. Pro Dichtungsmaterial wurden 12 Plattenstapel (4 pro Pflanzenart) errichtet (Tab. 4).

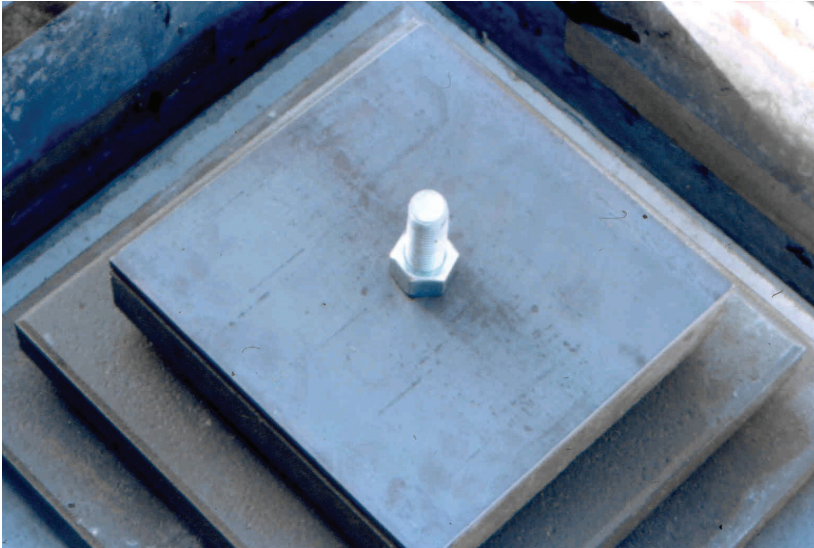


Abb. 9: Mittels Gewindestange verschraubter Plattenstapel (mit oberseitiger Stahlplatte zur Druckverteilung)

Aus dem mittleren Durchmesser der Dichtungsringe und deren Dicke (20 mm) kann die Oberfläche der Dichtungen, die in Kontakt zum Wurzelraum stand, annähernd berechnet werden. Ohne Berücksichtigung der ellipsenähnlichen Verformung der elastischen Dichtungen durch die Verpressung lag diese Fläche pro Ring zwischen 227 und 621 cm² (kleinster und größter Dichtungsring) (Tab. 5). Um trotz der unterschiedlich großen potenziellen Angriffsflächen die Anzahl der Wurzeleindringungen und -durchdringungen bei den einzelnen Dichtungsringen direkt vergleichen zu können, wurde sie auf eine Dichtungsfläche von 200 cm², d.h. auf eine Dichtung mit 100 cm Länge und 2 cm Dicke bezogen und mit den in Tab. 5 aufgezeigten Korrekturfaktoren umgerechnet.

Tab. 5: Oberfläche der Dichtungsringe mit Kontakt zum Wurzelraum

Dichtungsring	Durchmesser mittig (cm)	Dicke (cm)	Kontaktfläche Wurzelraum/Dichtungen (cm ²)	Korrekturfaktoren ¹⁾
1	23	2,0	227	0,91
2	33	2,0	325	0,62
3	43	2,0	424	0,47
4	53	2,0	523	0,38
5	63	2,0	621	0,32
Summe			2120	

¹⁾Korrekturfaktoren für die Umrechnung der Kontaktfläche der Dichtungsringe mit dem Wurzelraum auf eine Fläche von 200 cm² (entspricht einer Dichtung mit 100 cm Länge und 2 cm Dicke)

Die gesamte Kontaktfläche der Dichtungsringe zum Wurzelraum war mit 2120 cm² pro Gefäß weitaus größer als beim ersten Versuchsansatz mit Rohrverbindungen (ca.

26 cm²/Gefäß).

Als Kontrollmaterial dienten Dichtungsringe, die aus der auch im 1. Versuchsansatz verwendeten 4 mm dicken Bitumenschweißbahn (V 60 S4) gefertigt wurden. Die konfektionierten ringförmigen Teilstücke wiesen eine Breite von 30 mm und – entsprechend der SBR-Dichtungsringe - einen Außendurchmesser von 250 bis 650 mm auf (Tab. 6). Jeweils 5 übereinander gelegte, 4 mm dicke Teilstücke mit dem gleichen Durchmesser bildeten einen Bitumen-Dichtungsring von 20 mm Dicke (Abb. 10).

Tab. 6: Maße der Platten und Bitumenringe

Plattengröße (mm)	Bitu- men- ring	Größe der Bitumenringe ohne Verpressung (mm)			
		Durchmesser		Dicke	Breite
		innen	außen		
300 x 300 x 50	1	190	250	20	30
400 x 400 x 50					
500 x 500 x 50	2	290	350	20	30
600 x 600 x 60	3	390	450	20	30
700 x 700 x 70	4	490	550	20	30
800 x 800 x 80	5	590	650	20	30

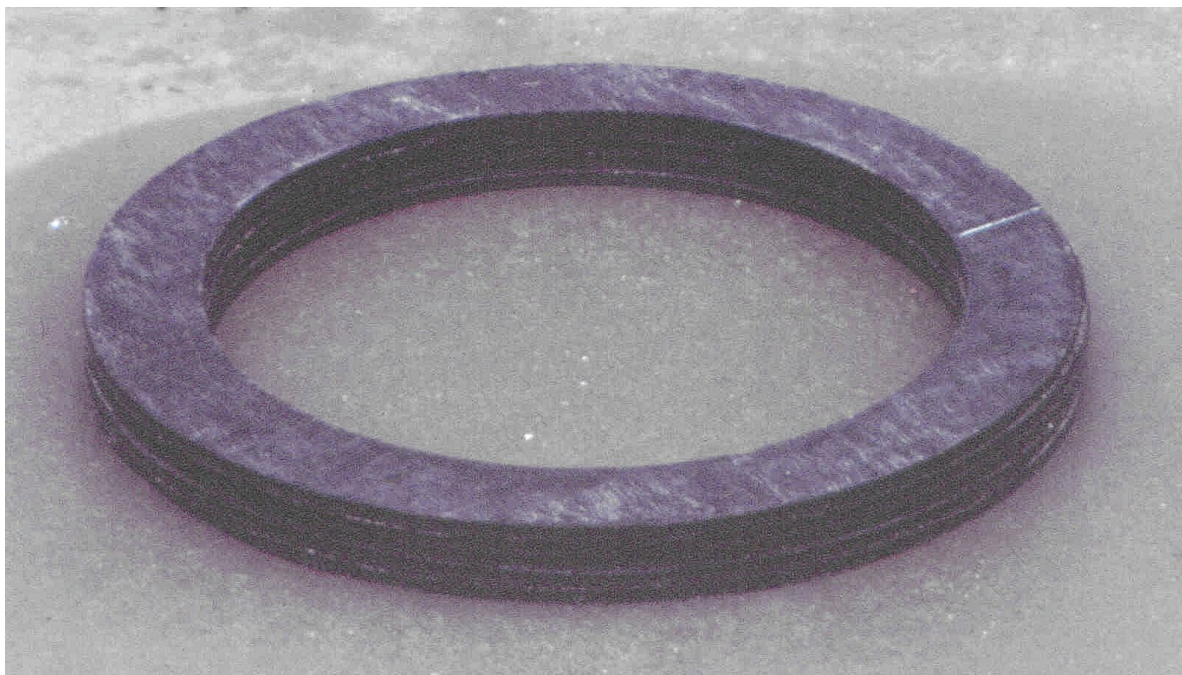


Abb. 10: Aus 5 Lagen einer Bitumenbahn zusammengesetzter Dichtungsring mit einer Dicke von 20 mm

Durch die aufliegenden Betonplatten (Abb. 11) lastete auf den Bitumenringen ein Gewicht von 106 (oberster Ring) bis 1910 N (unterster Ring) (Tab. 7). Die Auflast bewirkte bei dem nicht elastischen Bitumenmaterial im oberen Bereich des Plattenstapels keine erkennbare Verpressung. Die beiden unteren Ringe 4 und 5 wurden um rund 1 bzw. 2 mm (ca. 5 bzw. 10 %) verpresst. Insgesamt wurden 48 Plattenstapel (16 pro Pflanzenart) mit Bitumenringen versehen.



Abb. 11: Zu einem Stapel zusammengefasste Betonplatten mit dazwischen liegenden Bitumenringen (ohne Verschraubung)

Tab. 7: Auf die Bitumenringe durch das Eigengewicht der darüber liegenden Platten ausgeübter Anpressdruck

Plattengröße (mm)	Plattengewicht (N) ¹⁾	Bitumenring	Fläche (cm ²)	Auflast (N)	Anpressdruck (N/cm ²)	Verpressung	
						(mm)	(%)
300 x 300 x 50	106	1	207	106	0,51	0	0
400 x 400 x 50	187	2	301	293	0,97	0	0
500 x 500 x 50	293	3	396	586	1,48	0	0
600 x 600 x 60	483	4	490	1069	2,18	ca. 1	ca. 5
700 x 700 x 70	841	5	584	1910	3,27	ca. 2	ca. 10
800 x 800 x 80	1255						

¹⁾1 N = 0,102 kp

Die aus dem äußeren Durchmesser und der Dicke der Bitumenringe – unter Berücksichtigung der Verpressung - berechnete Kontaktfläche zum Wurzelraum lag zwischen rund 157 und 367 cm² (kleinster und größter Ring) (Tab. 8). Um trotz der unterschiedlich großen potenziellen Angriffsflächen die Anzahl der Wurzeleindringungen und -durchdringungen bei den einzelnen Bitumenringen direkt vergleichen zu können, wurde sie wie bei den SBR-Dichtungsringen auf eine Fläche von 200 cm², d.h. auf eine Dichtung mit 100 cm Länge und 2 cm Dicke bezogen und mit den in Tab. 8 aufgezeigten Korrekturfaktoren umgerechnet. Die gesamte Kontaktfläche zwischen Bitumenringen und Wurzelraum lag bei 1355 cm²/Gefäß.

Tab. 8: Oberfläche der Bitumenringe mit Kontakt zum Wurzelraum

Bitumen-ring	Durchmesser außen (cm)	Dicke (cm)	Kontaktfläche Wurzelraum/Ring (cm ²)	Korrekturfaktoren ¹⁾
1	25	2	157	1,27
2	35	2	220	0,91
3	45	2	283	0,71
4	55	1,9	328	0,61
5	65	1,8	367	0,55
Summe			1355	

¹⁾Korrekturfaktoren für die Umrechnung der Kontaktfläche der Dichtungsringe mit dem Wurzelraum auf eine Fläche von 200 cm² (entspricht einer Dichtung mit 100 cm Länge und 2 cm Dicke)

2.2.3 Weitere Daten zur Versuchsanlage und -durchführung

Die Plattenstapel mit SBR-Dichtungen und Bitumenringen wurden mit nach unten offenen, 80 x 80 x 35 cm großen Aluminium-Gefäßen (Fassungsvermögen ca. 225 Liter) umgeben, wobei die größte Platte als Gefäßboden diente. Ein freier Wasserablauf war durch den losen Kontakt zwischen Gefäß und Bodenplatte gegeben. Die weiteren Versuchsbedingungen, wie z.B. Substrat, Standort, Bewässerung und Düngung, waren mit den bereits unter 2.1.3 (erster Versuchsansatz mit Rohrverbindungen) geschilderten identisch (Tab. 2 und 9).

Die Varianten wurden in 4-facher Wiederholung angelegt. Der Versuchsansatz umfasste insgesamt 72 Plattenstapel bzw. Gefäße (Tab. 4).

Tab. 9: Daten zur Versuchsanlage und -durchführung (Plattenstapel)

Betonplatten	Platten in folgenden Größen: 300 x 300 x 50 mm, 400 x 400 x 50 mm, 500 x 500 x 50 mm, 600 x 600 x 60 mm, 700 x 700 x 70 mm und 800 x 800 x 80 mm (z.T. armiert und mit mittiger Bohrung versehen)
Dichtungen	<ul style="list-style-type: none"> • zwei unterschiedlich konzipierte Dichtungsringe mit kreisförmigem Querschnitt (Dicke 20 mm) auf Styrol-Butadien-Kautschuk-Basis (SBR und SBR WS) der Theodor Cordes GmbH & Co. KG • 20 mm dicke und 30 mm breite Bitumenringe, bestehend aus 5 ringförmigen Teilstücken einer 4 mm dicken Bitumenschweißbahn (V 60 S4) als Kontrolle
Verpressung der Dichtungen bzw. Anpressdruck	<ul style="list-style-type: none"> • SBR-Dichtungen um jeweils 10, 20, 25, 30 und 35 % • Bitumenringe: 0,51 N/cm², 0,97 N/cm², 1,48 N/cm², 2,18 N/cm² und 3,27 N/cm²
Versuchsgefäße	Aluminium-Vierkantgefäße (800 x 800 x 350 mm) mit ca. 225 l Fassungsvermögen
Vegetationssubstrat	identisch mit erstem Versuchsansatz, s. Kap. 2.1.3 und Tab. 2
Testpflanzenarten	
Pflanzdichte	
Standort	
Pflege der Pflanzen	
Versuchsbeginn	
Versuchsende	
Auswertungen	
Versuchsanlage	dreifaktorielle Blockanlage (Faktoren: Pflanzenart, Dichtungsart, Lage der Dichtung bzw. Höhe der Verpressung) in 4 Wiederholungen

2.3 Auswertungen

Im Rahmen der Untersuchung wurde außer der Gesamtzahl der Wurzeleindringungen und -durchdringungen nach 2 Jahren (Endauswertung) auch der zeitliche Verlauf der Einwirkung der Wurzeln auf die eingebauten Dichtungen festgehalten (Zwischenauswertungen). Hierfür wurden im Abstand von sechs Monaten jeweils vier Kontrollgefäße pro Pflanzenart ausgewertet, d.h. die nicht dauerhaft wurzelfesten Bitumenringe der Rohrverbindungen und der Plattenstapel auf Wurzeleindringungen und -durchdringungen untersucht.

Im Zuge der Auswertungen wurde zudem die Pflanzenentwicklung (Stammdurchmesser 10 cm über Substratoberfläche und Höhe der Versuchspflanzen) erfasst.

Die bei den Auswertungen gewonnenen, statistisch aufbereiteten Daten werden grafisch in Form von Boxplots dargestellt. Erläuterungen zu dieser Art der Darstellung finden sich unter Kap. 6.3 im Anhang.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Erste Zwischenauswertung der Kontrollgefäße (Juni 2007)

3.1.1 Versuchsansatz mit Rohrverbindungen

3.1.1.1 Pflanzenentwicklung

Die Pflanzen kamen mit den eingestellten Bedingungen gut zurecht, was zu einer üppigen Entwicklung führte (Abb. 12). *Pyracantha coccinea* wies nach den ersten 6 Monaten im Durchschnitt eine Höhe 254 cm und einen Stammdurchmesser von 1,5 cm auf. Gegenüber dem Ausgangsstadium der Pflanzen (mittlere Höhe 102 cm, Ø 1,2 cm) war der Zuwachs beachtlich. Während *Pyracantha* eintriebzig in die Länge wuchs und sich erst im oberen Bereich des Leittriebs verzweigte (akrotone Verzweigung), zeigte *Ficus carica* eine ausgeprägte Basitonie, d.h. es wurden in Konkurrenz zum Leittrieb an der Basis weitere Triebe gebildet. Diese bis zu 7 neuen, noch relativ kleinen Triebe/Pflanze wurden bei der Zwischenauswertung ab einer Länge von 30 cm mit berücksichtigt, weshalb sich im Mittel die Höhe und der Stammdurchmesser gegenüber den Ausgangswerten verringerten. Bei einem Vergleich der Maximalwerte zu Versuchsbeginn (Höhe 105 cm, Ø 1,4 cm) und zur 1. Zwischenauswertung (Höhe 148 cm, Ø 2,2 cm) lässt sich aber erkennen, dass auch die Ziegenfeige innerhalb von 6 Monaten einen deutlichen Zuwachs erfahren hatte. *Ficus benjamina* bildete ebenfalls neue Basistriebe, konnte aber dennoch aufgrund einer enormen Wachstumsleistung deutlich höhere Durchschnittswerte bei der Höhe (138 cm) und beim Stammdurchmesser (1,7 cm) erzielen als zu Versuchsbeginn (Höhe 102 cm, Ø 1,1 cm) (Abb. 89 und 90 im Anhang).



Abb. 12: Pflanzenbestand bei der 1. Zwischenauswertung

Die Wurzeln von *Pyracantha* hatten sich verstärkt am Gefäßboden angesammelt, während bei *Ficus carica* und *Ficus benjamina* das Substrat gleichmäßig mit einem dichten Wurzelwerk durchzogen war.

3.1.1.2 Wurzeleindringungen und -durchdringungen

Den Wurzeln von *Pyracantha* war es nicht gelungen, innerhalb von 6 Monaten in die Bitumenringe der Rohrverbindung ein- oder gar durchzuwachsen. Die Wurzeln von *Ficus carica* bewirkten ebenfalls keine Durchdringungen, aber im Mittel 1,0 Eindringungen/Gefäß. *Ficus benjamina* erzielte durchschnittlich 2,8 Wurzeleindringungen und 0,25 Wurzeldurchdringungen/Gefäß. Die Anzahl der Wurzeleindringungen von *Ficus benjamina* lässt sich gegenüber den (nicht gegebenen) Penetrationen von *Pyracantha* statistisch absichern (Abb. 13 und 14).

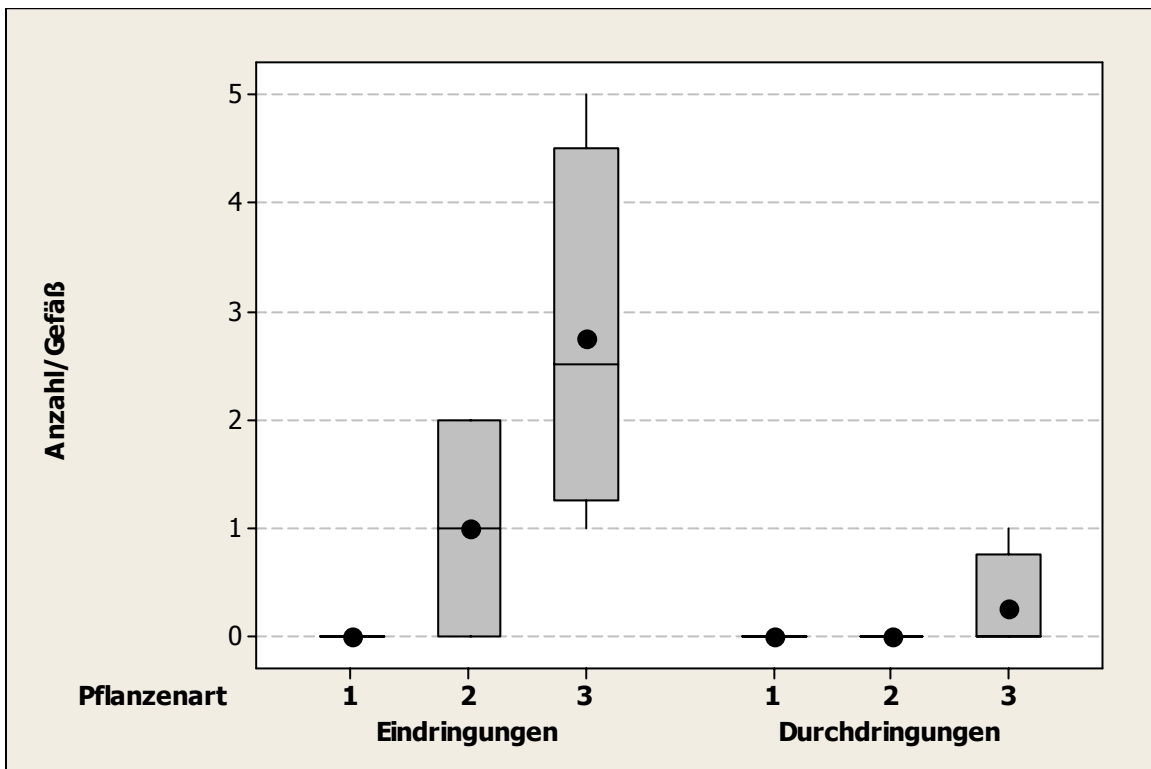


Abb. 13: Anzahl Wurzeleindringungen und -durchdringungen pro Gefäß nach 6 Monaten (1. Zwischenauswertung der Rohrabschnitte mit Bitumenringen, n = 4)
 Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*

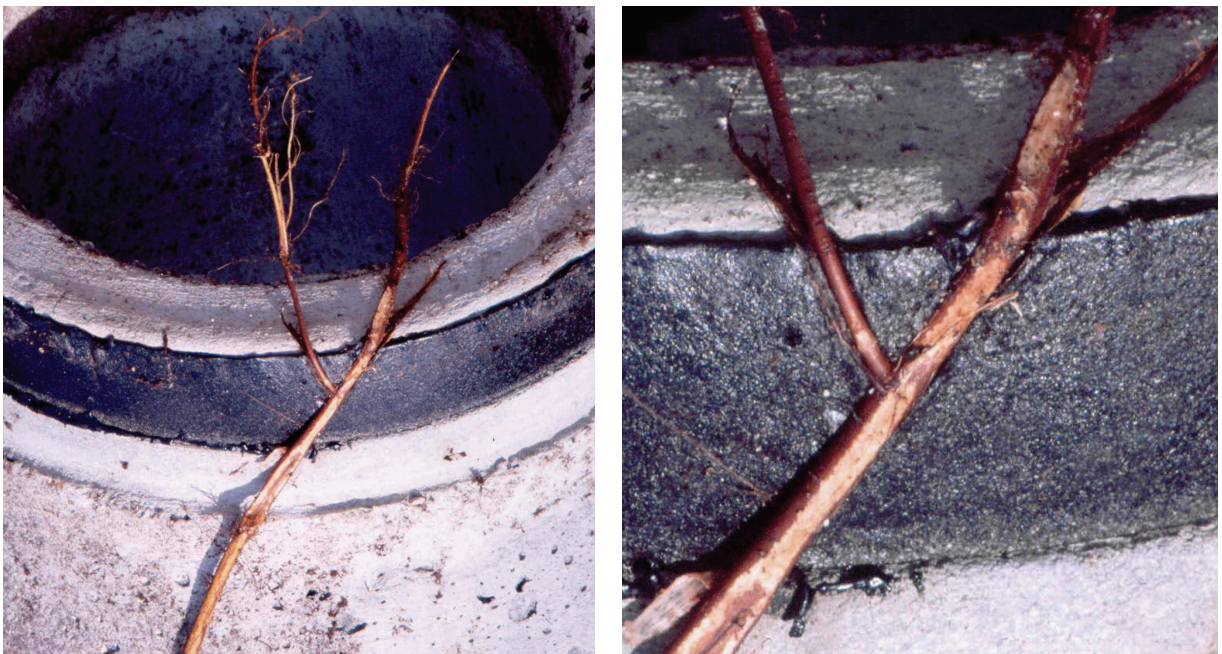


Abb. 14: Wurzeldurchdringung von *Ficus benjamina* bei der 1. Zwischenauswertung (rechts im Detail)

3.1.2 Versuchsansatz mit Plattenstapeln

3.1.2.1 Pflanzenentwicklung

Die drei Pflanzenarten erzielten in den Gefäßen mit Plattenstapeln im Durchschnitt ein sehr ähnliches Wachstum wie in den Gefäßen mit Rohrverbindungen (Abb. 91 und 92 im Anhang). Die geringen Unterschiede in der Höhe und im Stammdurchmesser der Pflanzen zwischen den beiden Versuchsansätzen lassen sich statistisch nicht absichern.

3.1.2.2 Wurzeleindringungen und -durchdringungen

Gegenüber *Pyracantha* und *Ficus carica* erzielte *Ficus benjamina* gemittelt über alle Ringe eine signifikant höhere Gesamtanzahl an Wurzeleindringungen pro Meter Bitumenring (Abb. 15). Die einzelnen Ringe waren von den Eindringungen im Mittel über die drei Pflanzenarten in ähnlichem Umfang betroffen (Abb. 16). Es zeigte sich aber, dass Wurzeln von *Pyracantha* v.a. die untersten beiden Ringe 4 und 5 attackierten. Die in Ring 5 festgestellte Anzahl Eindringungen bei *Pyracantha* lässt sich statistisch gegenüber den beiden anderen Pflanzenarten absichern (Abb. 17). Wurzeln von *Ficus carica* waren vornehmlich in Dichtungsring 3 im mittleren Bereich des Plattenstapels eingewachsen (nicht signifikant), während Wurzeleindringungen von *Ficus benjamina* insbesondere in den beiden oberen Ringen 1 und 2 festgestellt wurden. Die Anzahl Eindringungen bei *Ficus benjamina* lässt sich statistisch gegenüber den beiden anderen Pflanzenarten absichern.

Die von allen Pflanzenarten in ähnlichem Umfang bewirkten Durchdringungen verteilten sich im Mittel relativ gleichmäßig über die fünf Bitumenringe. Die geringen Unterschiede lassen sich statistisch nicht absichern (Abb. 18 und 19). Bei Betrachtung der Durchdringungen getrennt nach Pflanzenart und Dichtungsring fällt auf, dass die Wurzeln von *Pyracantha* v.a. Ring 5 durchdrungen hatten, während die Wurzeln von *Ficus benjamina* insbesondere Ring 1 perforierten (Abb. 20 - 23). Die Unterschiede zu den Durchdringungen der jeweils anderen Pflanzenarten bei diesen Ringen sind signifikant.

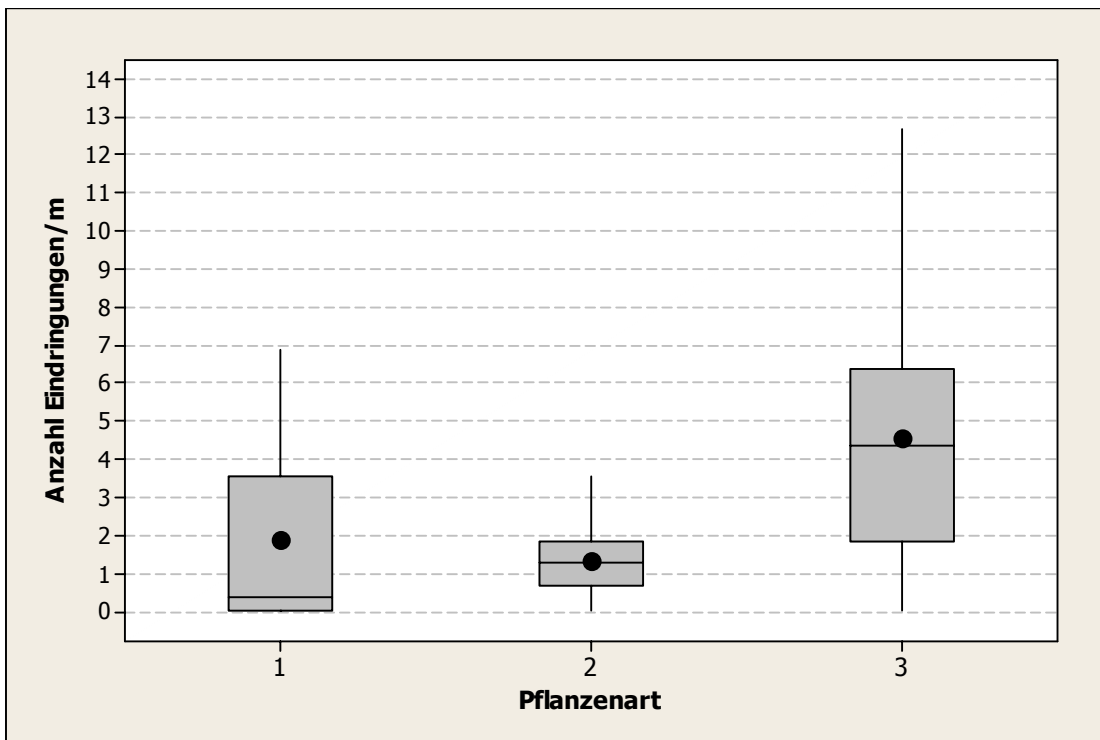


Abb. 15: Über die Dichtungsringe gemittelte Anzahl Wurzeleindringungen pro Meter Bitumenring nach 6 Monaten (1. Zwischenauswertung der Plattenstapel, n = 20)
Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*

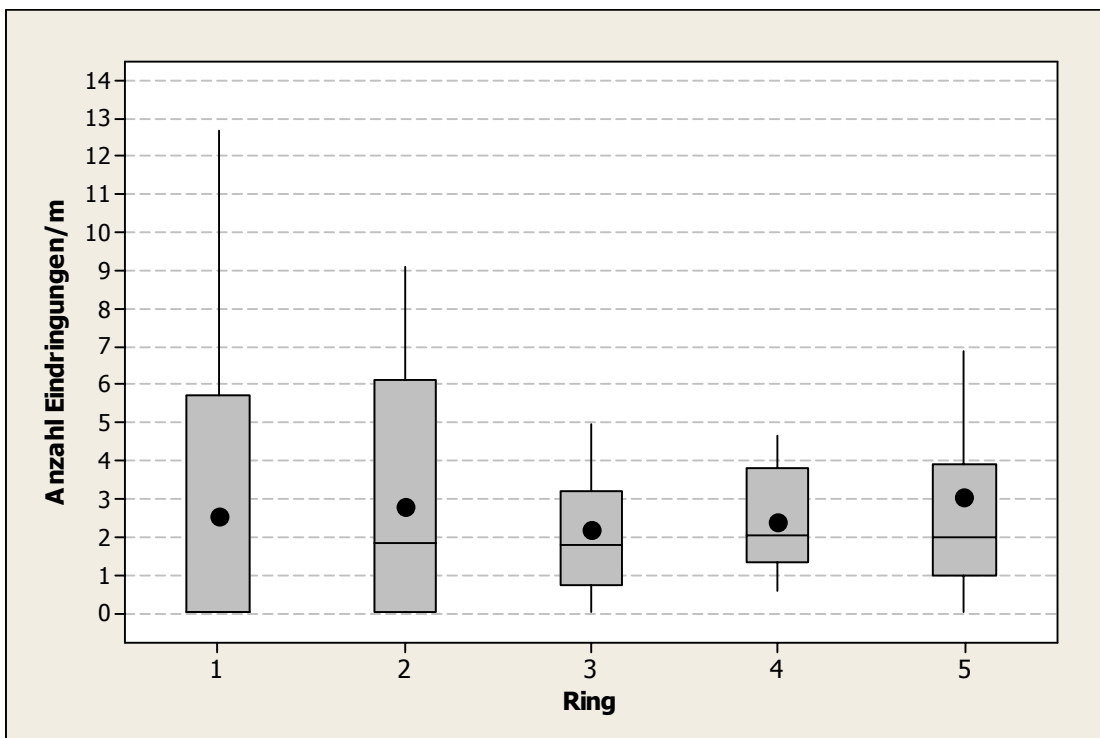


Abb. 16: Über die Pflanzenarten gemittelte Anzahl Wurzeleindringungen pro Meter Bitumenring nach 6 Monaten (1. Zwischenauswertung der Plattenstapel, n = 12)

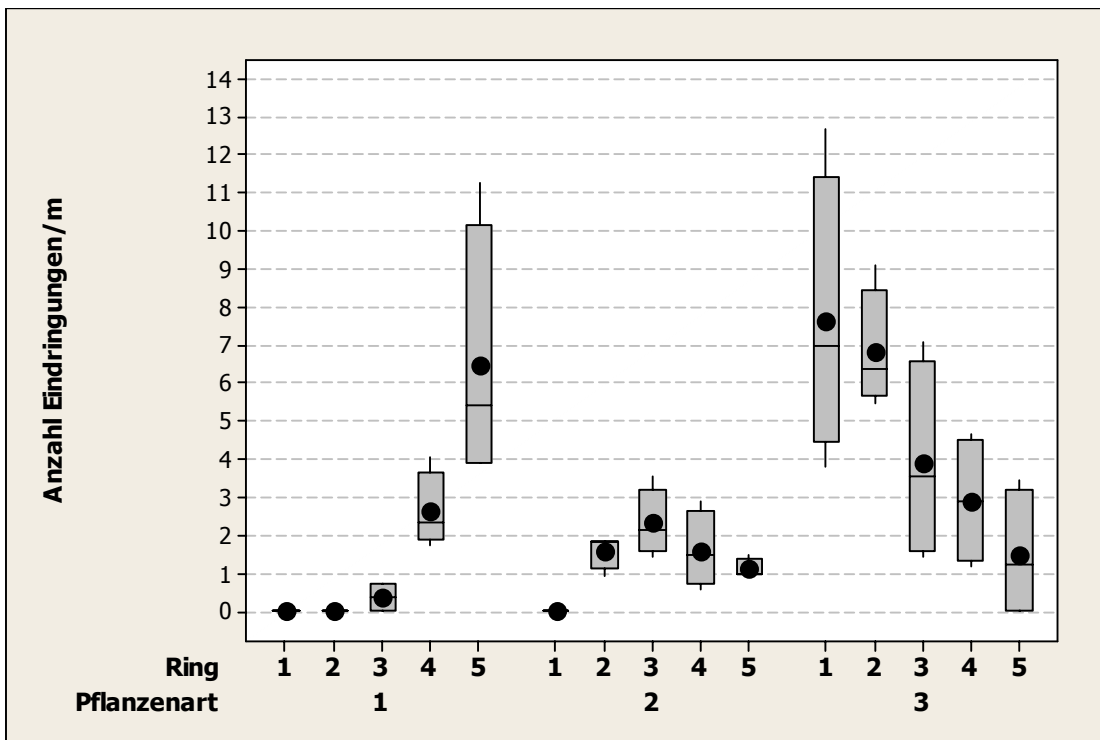


Abb. 17: Anzahl Wurzeleindringungen pro Meter Bitumenring nach 6 Monaten (1. Zwischenauswertung der Plattenstapel, n = 4)
Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*

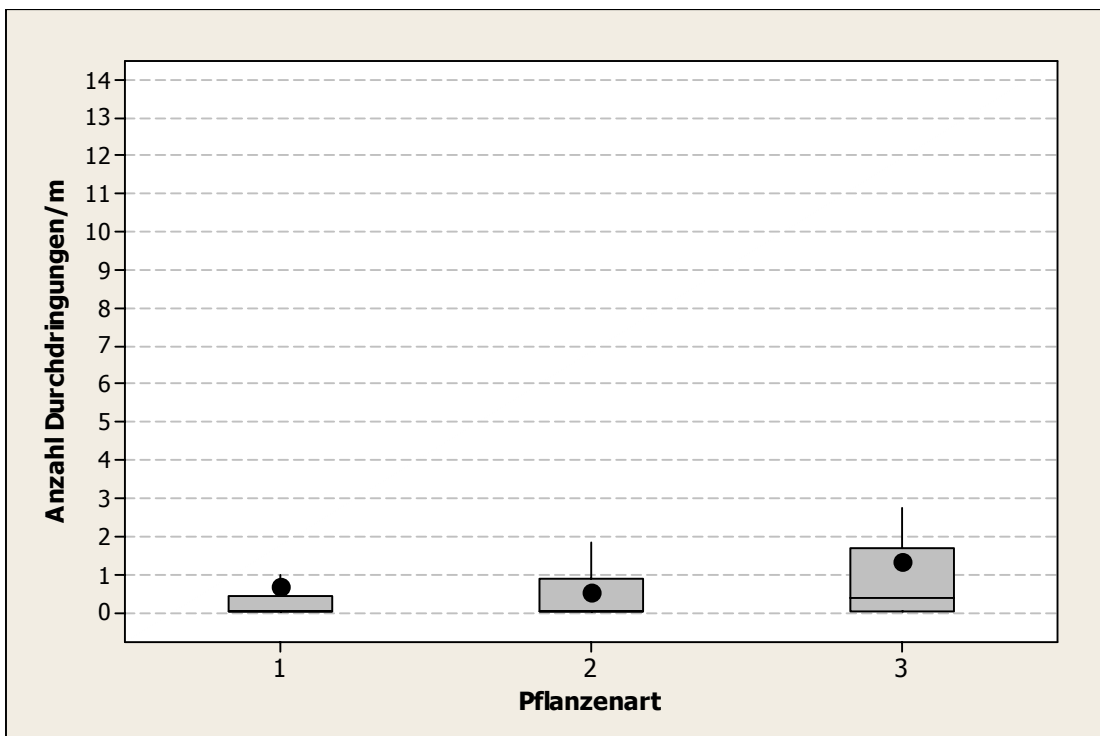


Abb. 18: Über die Dichtungsringe gemittelte Anzahl Wurzeleindringungen pro Meter Bitumenring nach 6 Monaten (1. Zwischenauswertung der Plattenstapel, n = 20)
Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*

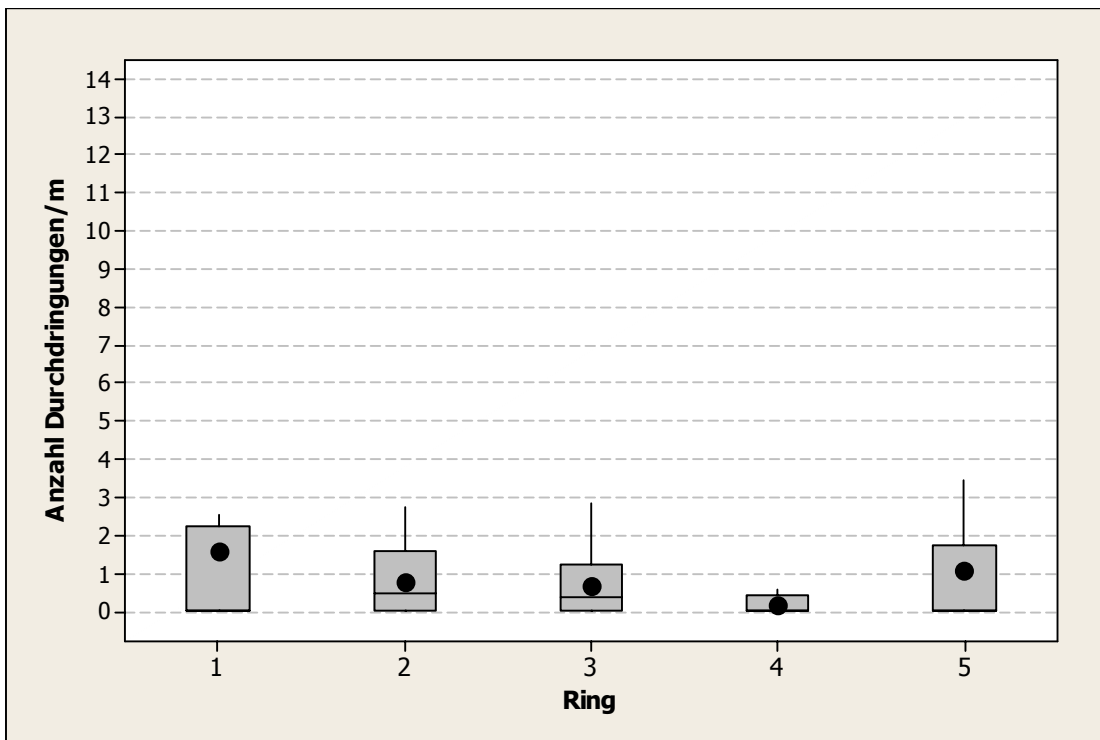


Abb. 19: Über die Pflanzenarten gemittelte Anzahl Wurzeldurchdringungen pro Meter Bitumenring nach 6 Monaten (1. Zwischenauswertung der Plattenstapel, n = 12)

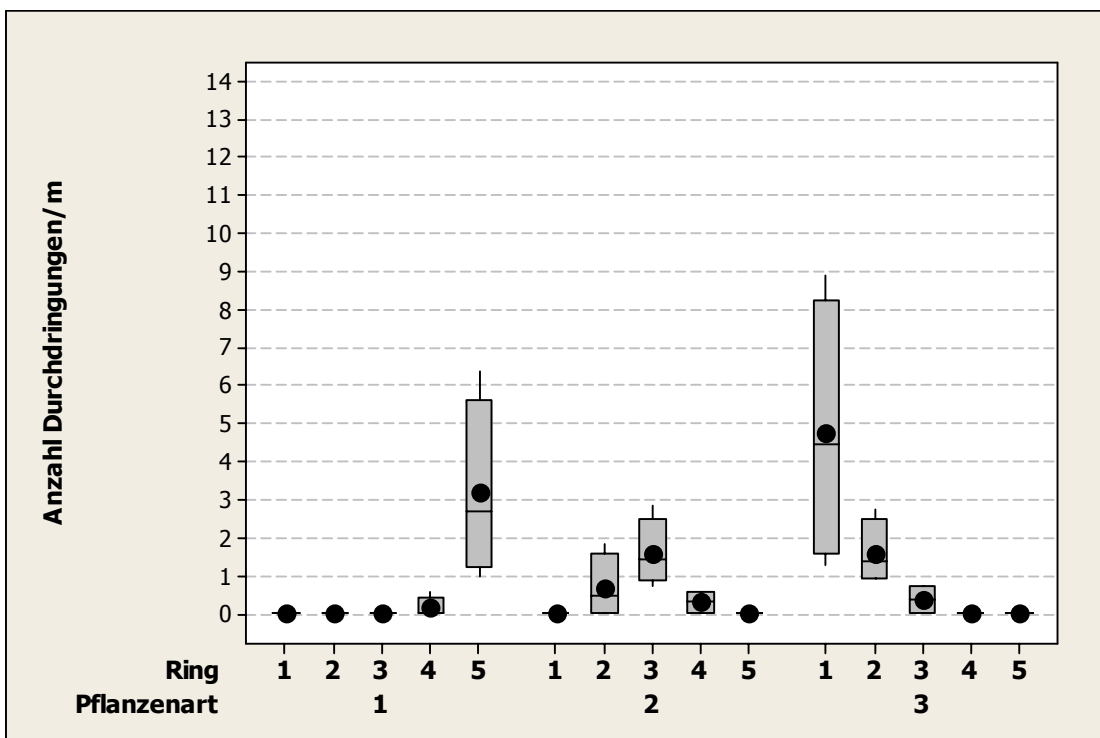


Abb. 20: Anzahl Wurzeldurchdringungen pro Meter Bitumenring nach 6 Monaten (1. Zwischenauswertung der Plattenstapel, n = 4)
Pflanzentyp 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*



Abb. 21: Wurzeldurchdringungen von *Pyracantha coccinea* (Ring 5)

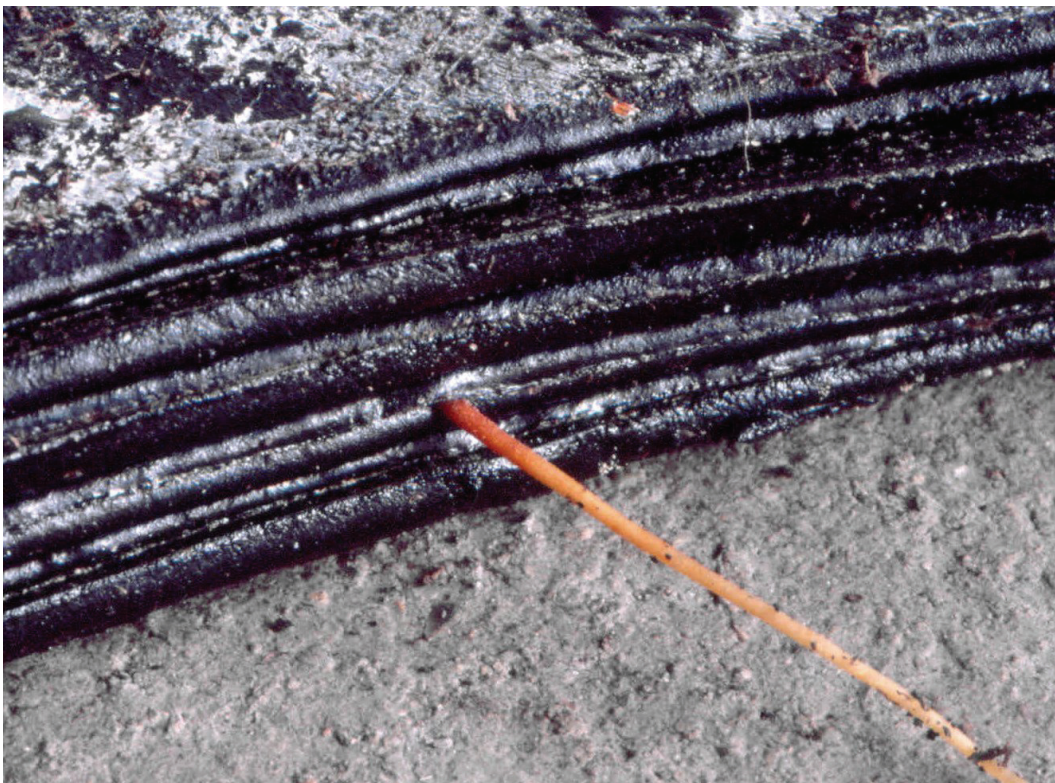


Abb. 22: Wurzeldurchdringung von *Ficus carica* (Ring 4)

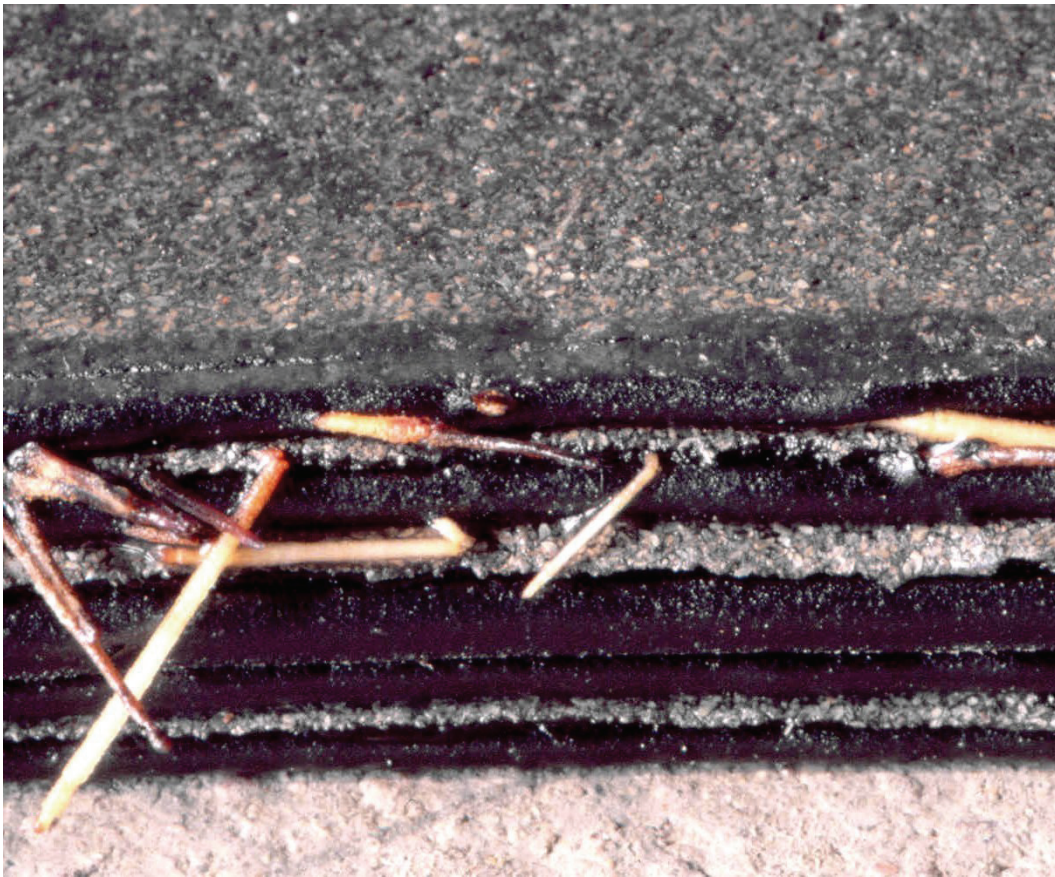


Abb. 23: Wurzeldurchdringung von *Ficus benjamina* (Ring 1)

3.2 Zweite Zwischenauswertung der Kontrollgefäße (Dez. 2007)

3.2.1 Versuchsansatz mit Rohrverbindungen

3.2.1.1 Pflanzenentwicklung

Wie Abbildung 93 im Anhang zu entnehmen ist, erzielte *Pyracantha coccinea* mit einer durchschnittlichen Höhe von 285 cm gegenüber der ersten Zwischenauswertung nur einen relativ geringen Zuwachs in der Länge. Dies liegt darin begründet, dass *Pyracantha* eine Wuchshöhe von 3 m kaum überschreitet und stattdessen - wie auch in den Versuchsgefäßen festzustellen - nach Erreichen dieser Höhe im mittleren und oberen Bereich des Haupttriebs eine starke Verzweigung ausbildet. Die Seitentriebe wurden bei der Auswertung nicht erfasst. Der Zuwachs beim Stammdurchmesser (Mittelwert 1,8 cm) war gegenüber der ersten Auswertung beachtlich (Abb. 94 im Anhang).

Ficus carica erreichte einen durchschnittlichen Stammdurchmesser von 1,2 cm. Die bei dieser Pflanzenart ebenfalls festzustellende Verzweigung im oberen Bereich der Triebe trug dazu bei, dass der mittlere Längenzuwachs relativ gering ausfiel (Höhe 74 cm).



Abb. 24: Pflanzenbestand bei der 2. Zwischenauswertung

Der ebenfalls mehrtrieblich wachsende *Ficus benjamina* lag mit einer mittleren Höhe von 156 cm und einem Stammdurchmesser von 1,9 cm deutlich über dem Niveau der ersten Zwischenauswertung nach 6 Monaten.

Abb. 24 zeigt einen Ausschnitt des Pflanzenbestands bei der 2. Zwischenauswertung.

3.2.1.2 Wurzeleindringungen und -durchdringungen

Die Anzahl der Penetrationen bei den Bitumenringen der Rohrverbindungen hatte sich gegenüber der ersten Zwischenauswertung kaum verändert. *Pyracantha* erzielte auch nach 12 Monaten weder Wurzeleindringungen noch -durchdringungen. Die Wurzeln von *Ficus carica* bewirkten im Durchschnitt 1,0 Eindringungen/Gefäß (Abb. 25 und 26). Bei *Ficus benjamina* wurden im Mittel 3,3 Wurzeleindringungen und 0,5 Wurzeldurchdringungen/Gefäß festgestellt. Die Anzahl der Wurzeleindringungen von *Ficus benjamina* lässt sich gegenüber den (nicht gegebenen) Penetrationen von *Pyracantha* statistisch absichern.

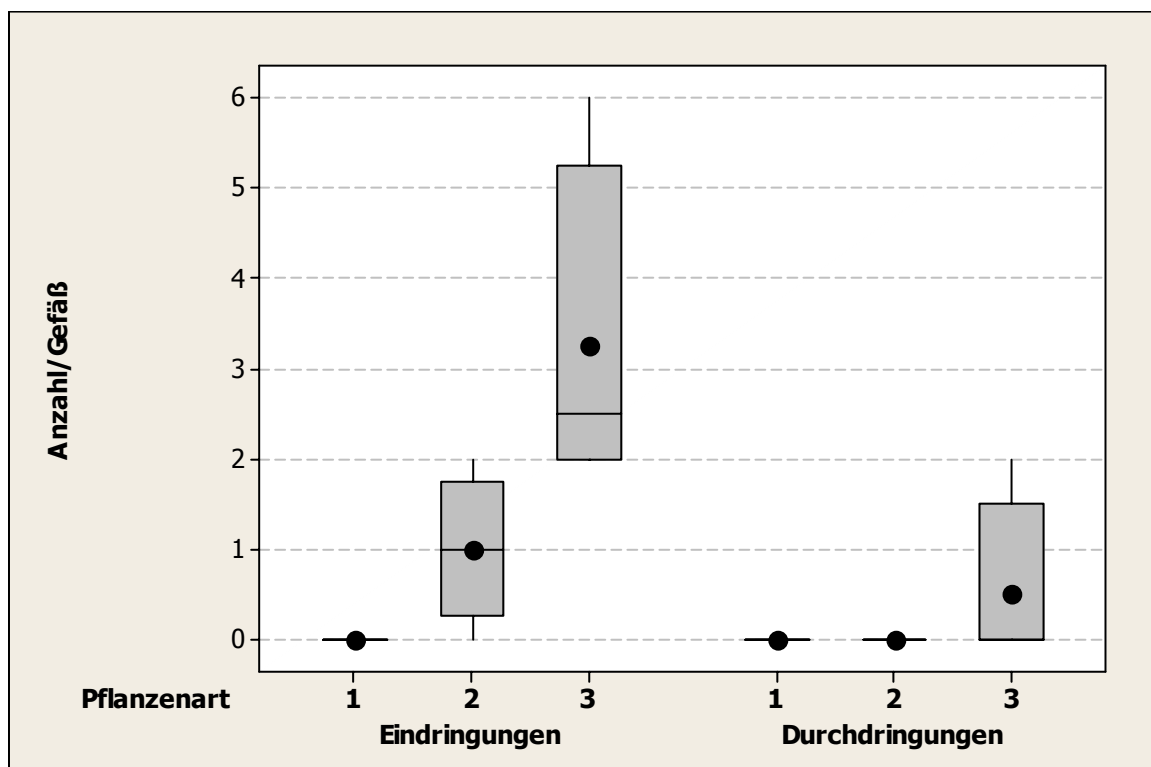


Abb. 25: Anzahl Wurzeleindringungen und -durchdringungen pro Gefäß nach 12 Monaten (2. Zwischenauswertung der Rohrabschnitte mit Bitumenringen, n = 4)
Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*



Abb. 26: Wurzel-
durchdringungen von
Ficus benjamina

3.2.2 Versuchsansatz mit Plattenstapeln

3.2.2.1 Pflanzenentwicklung

Zwischen dem Wachstum der drei Pflanzenarten in den Gefäßen mit Plattenstapeln und in den Gefäßen mit Rohrverbindungen waren nur geringe, statistisch nicht absicherbare Unterschiede zu erkennen (Abb. 95 und 96 im Anhang).

3.2.2.2 Wurzeleindringungen und -durchdringungen

Die Anzahl an Wurzeleindringungen und -durchdringungen hatte sich gegenüber der ersten Zwischenauswertung z.T. deutlich erhöht. Auch nach einer Standzeit von 12 Monaten wies *Ficus benjamina* gegenüber *Pyracantha* und *Ficus carica* im Durchschnitt der fünf Bitumenringe signifikant mehr Wurzeleindringungen und -durchdringungen pro Meter Bitumenring auf (Abb. 27, 30 und 33).

Wenngleich Ring 1 - gemittelt über alle drei Pflanzenarten - am häufigsten penetriert und perforiert wurde, lässt sich die unterschiedliche Anzahl an Ein- und Durchdringungen bei den einzelnen Ringen statistisch nicht absichern (Abb. 28 und 31).

Es zeigte sich entsprechend der 1. Zwischenauswertung, dass Wurzeln von *Pyracantha* bevorzugt die unteren beiden Ringe 4 und 5 attackierten, während von *Ficus benjamina* und *Ficus carica* verursachte Ein- und Durchdringungen vornehmlich in den oberen bzw. mittleren Ringen festgestellt wurden. Die bei Ring 5 von *Pyracantha* bewirkten Ein- und Durchdringungen lassen sich statistisch gegenüber denen von

Ficus carica absichern. Die Anzahl der bei den oberen beiden Ringen ein- und durchgewachsenen Wurzeln war bei *Ficus benjamina* signifikant höher als bei den beiden anderen Pflanzenarten (Abb. 29 und 32).

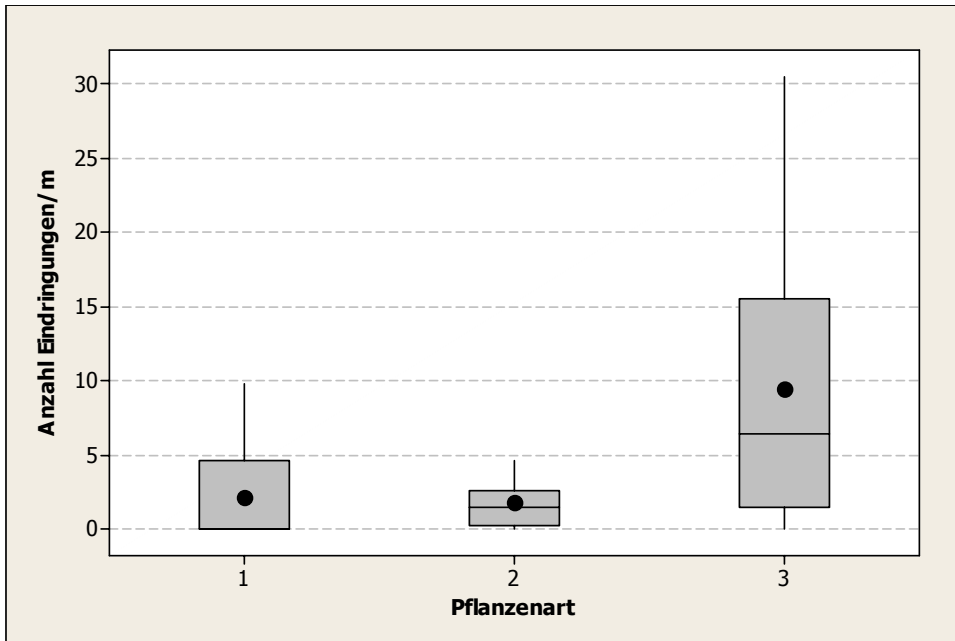


Abb. 27: Über die Dichtungsringe gemittelte Anzahl Wurzeleindringungen pro Meter Bitumenring nach 12 Monaten (2. Zwischenauswertung der Plattenstapel, n = 20)
Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*

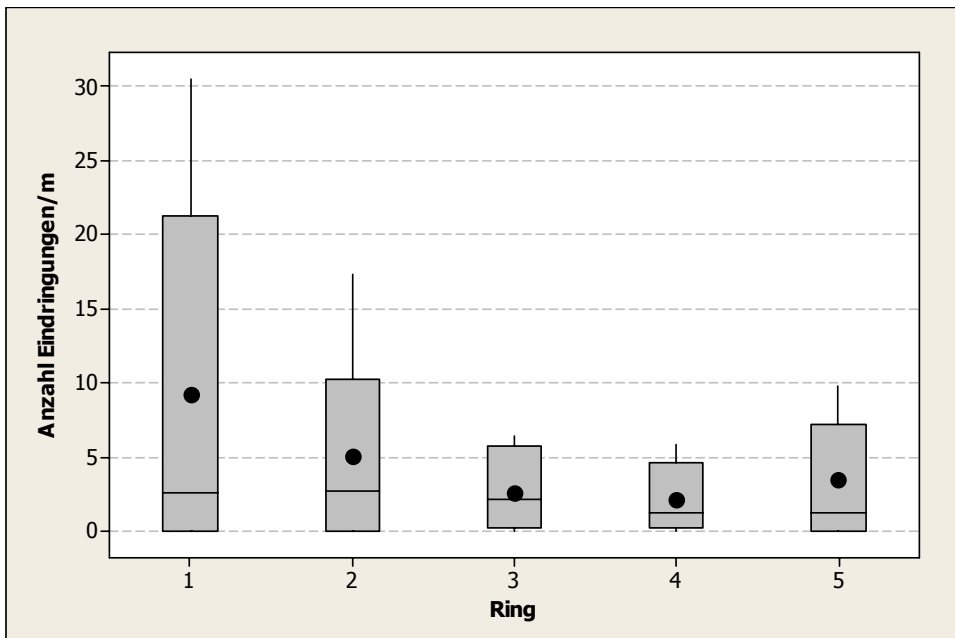


Abb. 28: Über die Pflanzenarten gemittelte Anzahl Wurzeleindringungen pro Meter Bitumenring nach 12 Monaten (2. Zwischenauswertung der Plattenstapel, n = 12)

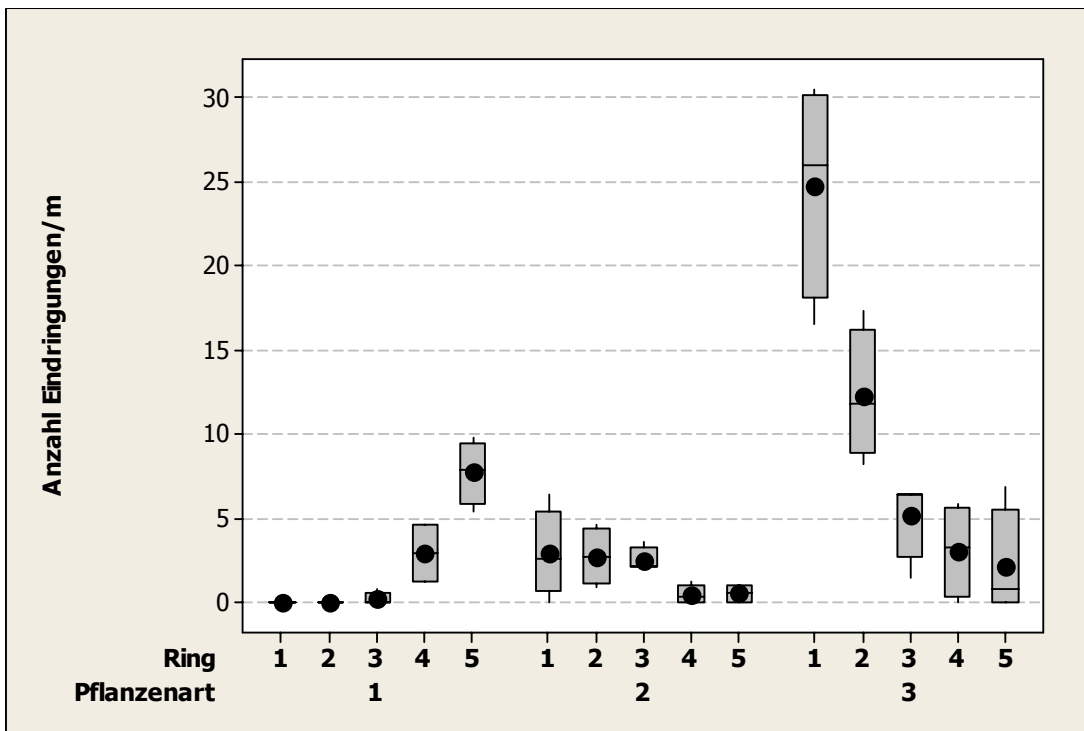


Abb. 29: Anzahl Wurzeleindringungen pro Meter Bitumenring nach 12 Monaten (2. Zwischenauswertung der Plattenstapel, n = 4)
Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*

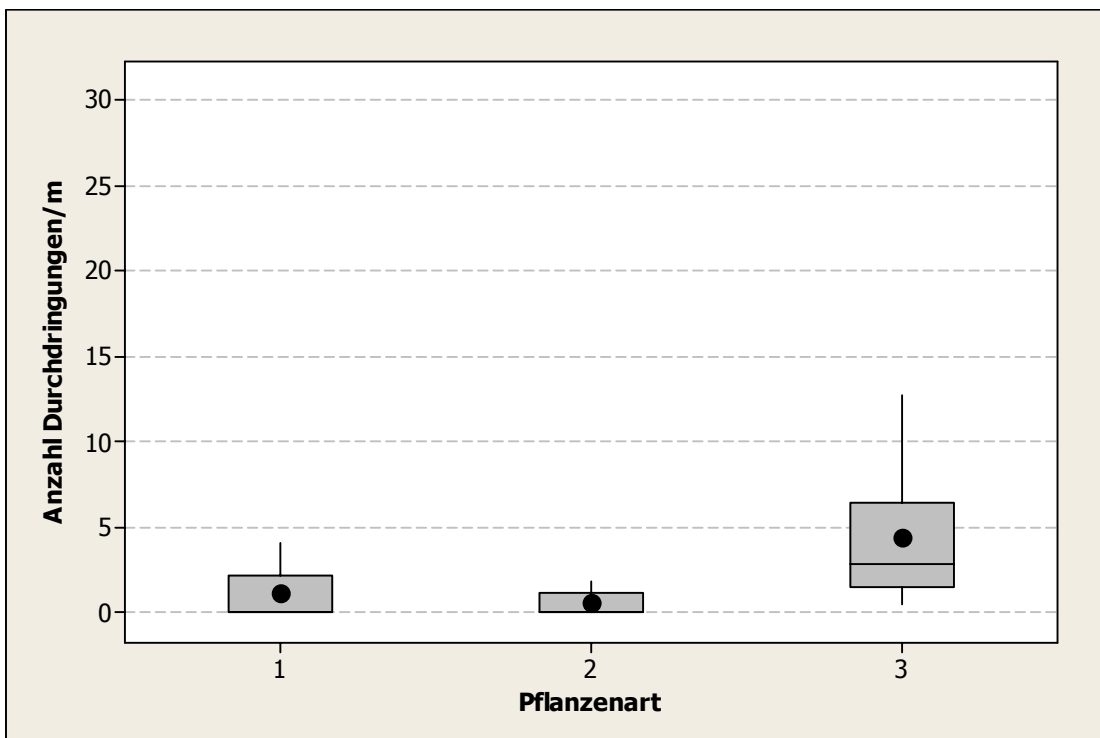


Abb. 30: Über die Dichtungsringe gemittelte Anzahl Wurzel durchdringungen pro Meter Bitumenring nach 12 Monaten (2. Zwischenauswertung der Plattenstapel, n = 20)
Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*

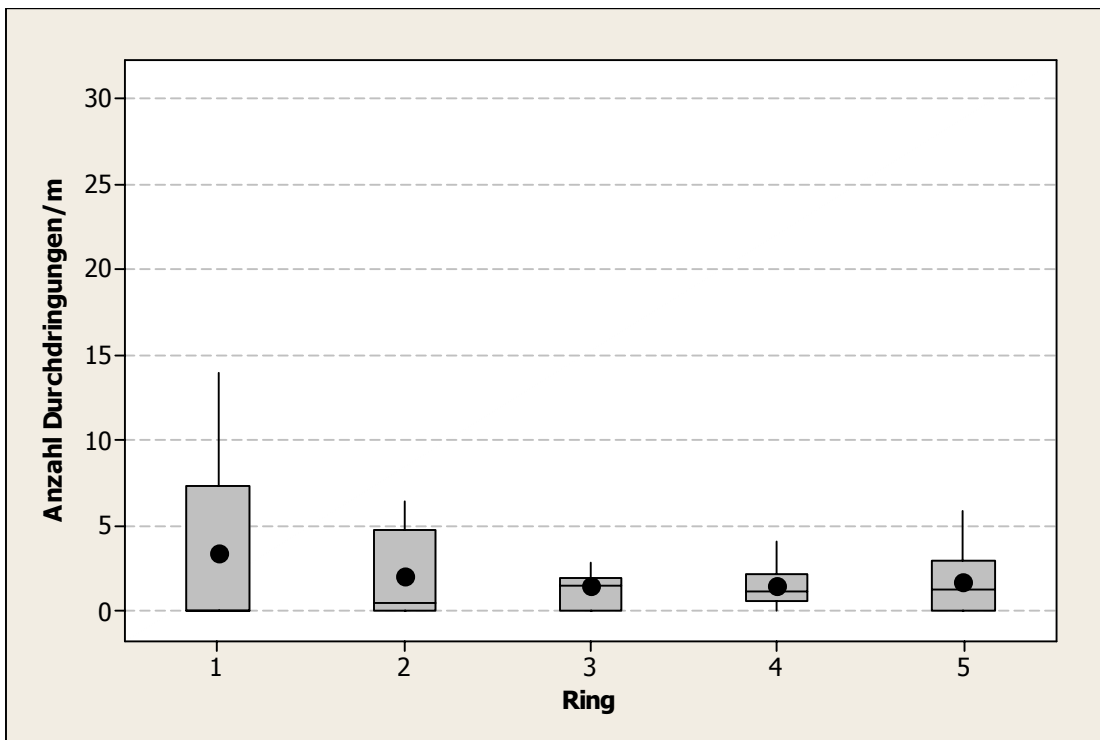


Abb. 31: Über die Pflanzenarten gemittelte Anzahl Wurzeldurchdringungen pro Meter Bitumenring nach 12 Monaten (2. Zwischenauswertung der Plattenstapel, n = 12)

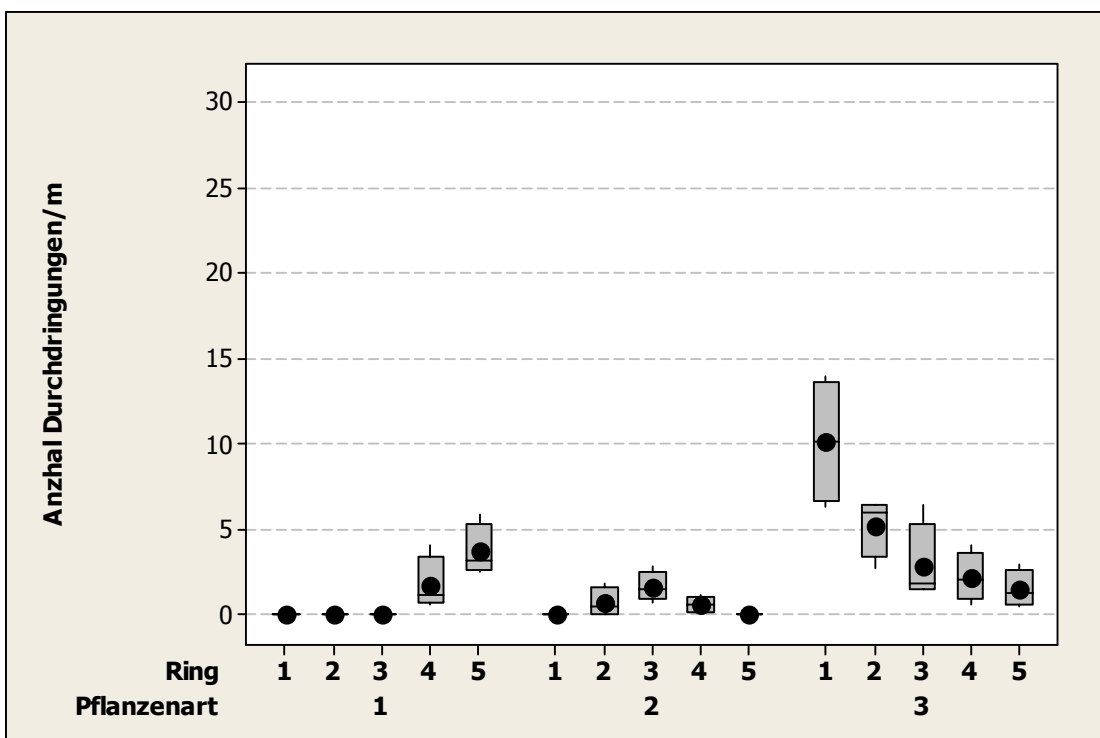


Abb. 32: Anzahl Wurzeldurchdringungen pro Meter Bitumenring nach 12 Monaten (2. Zwischenauswertung der Plattenstapel, n = 4)
Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*

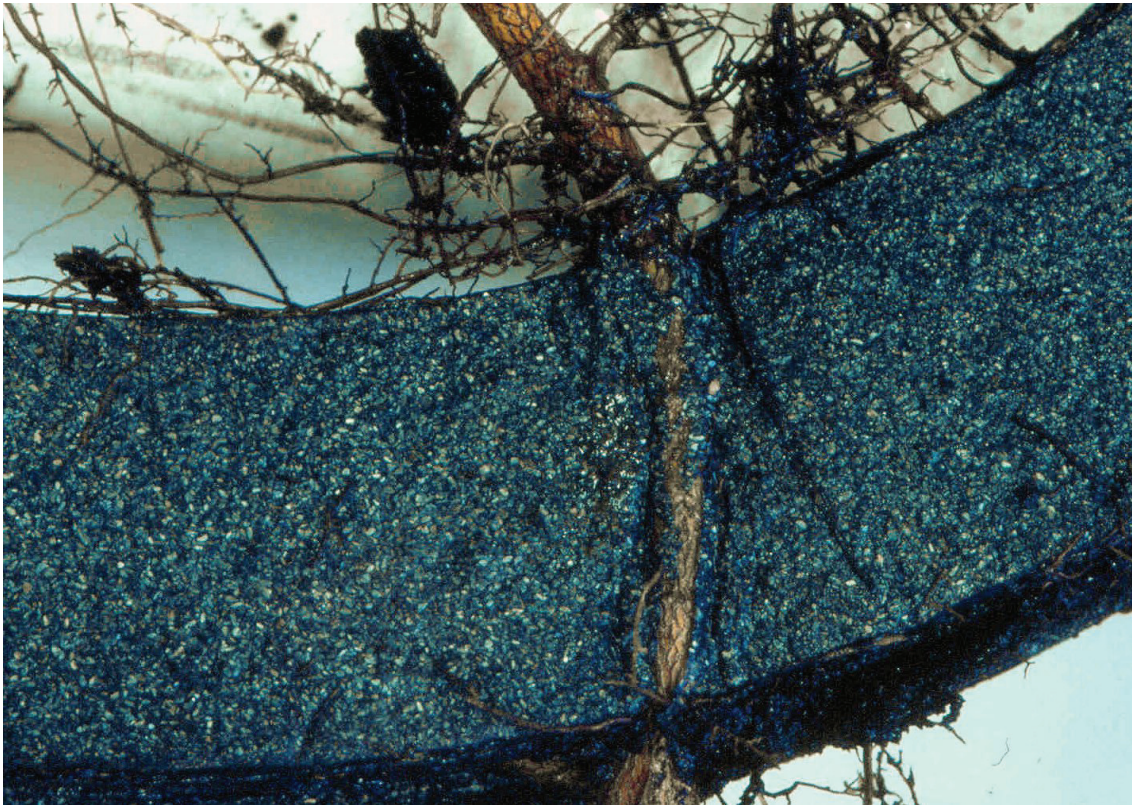


Abb. 33: Wurzeldurchdringung von *Ficus benjamina* (Ring 1)

3.3 Dritte Zwischenauswertung der Kontrollgefäße (Juni 2008)

3.3.1 Versuchsansatz mit Rohrverbindungen

3.3.1.1 Pflanzenentwicklung

Pyracantha coccinea erzielte mit einer durchschnittlichen Höhe des Haupttriebs von 338 cm gegenüber der zweiten Zwischenauswertung wiederum nur ein relativ geringes Längenzuwachs. Die durchschnittliche Zunahme beim Stammdurchmesser von 1,8 auf 2,1 cm war aber beachtlich. Bei *Ficus carica* wurden eine durchschnittliche Höhe von 108 cm und ein Stammdurchmesser von 1,6 cm ermittelt, was einen stattlichen Zuwachs bedeutete. *Ficus benjamina* lag mit einer mittleren Höhe von 236 cm und einem Stammdurchmesser von 2,6 cm am deutlichsten über dem Niveau der zweiten Zwischenauswertung nach 12 Monaten (Abb. 97 und 98 im Anhang).

Aufgrund der üppigen Entwicklung der Pflanzen (Abb. 34) musste deren Wachstum z.T. in der Höhe (zum Schutz der Gewächshauseinrichtungen) wie auch an den Seiten (Behinderung der Pflegearbeiten) durch Rückschnitt begrenzt werden. Dabei wurde auf eine verbleibende Höhe der Pflanzen von 300 cm geachtet.



Abb. 34: Pflanzenbestand bei der dritten Zwischenauswertung

3.3.1.2 Wurzeleindringungen und -durchdringungen

Die Anzahl der Penetrationen in die Bitumenringe der Rohrverbindung hatte sich gegenüber den zurückliegenden Auswertungen z.T. nur wenig verändert. Die Wurzeln von *Pyracantha* waren nach 18 Monaten erstmals in der Lage, die Bitumenringe zu penetrieren und zu perforieren (im Mittel 0,75 Eindringungen und 0,25 Durchdringungen/Gefäß. Die Wurzeln von *Ficus carica* bewirkten im Durchschnitt ebenfalls 0,75 Eindringungen/Gefäß, jedoch keine Durchdringungen. *Ficus benjamina* erzielte pro Gefäß durchschnittlich 2,75 Wurzeleindringungen und 1,50 Wurzeleindringungen (Abb. 35 und 36). Letztere lassen sich gegenüber den (nicht gegebenen) Durchdringungen von *Ficus carica* statistisch absichern.

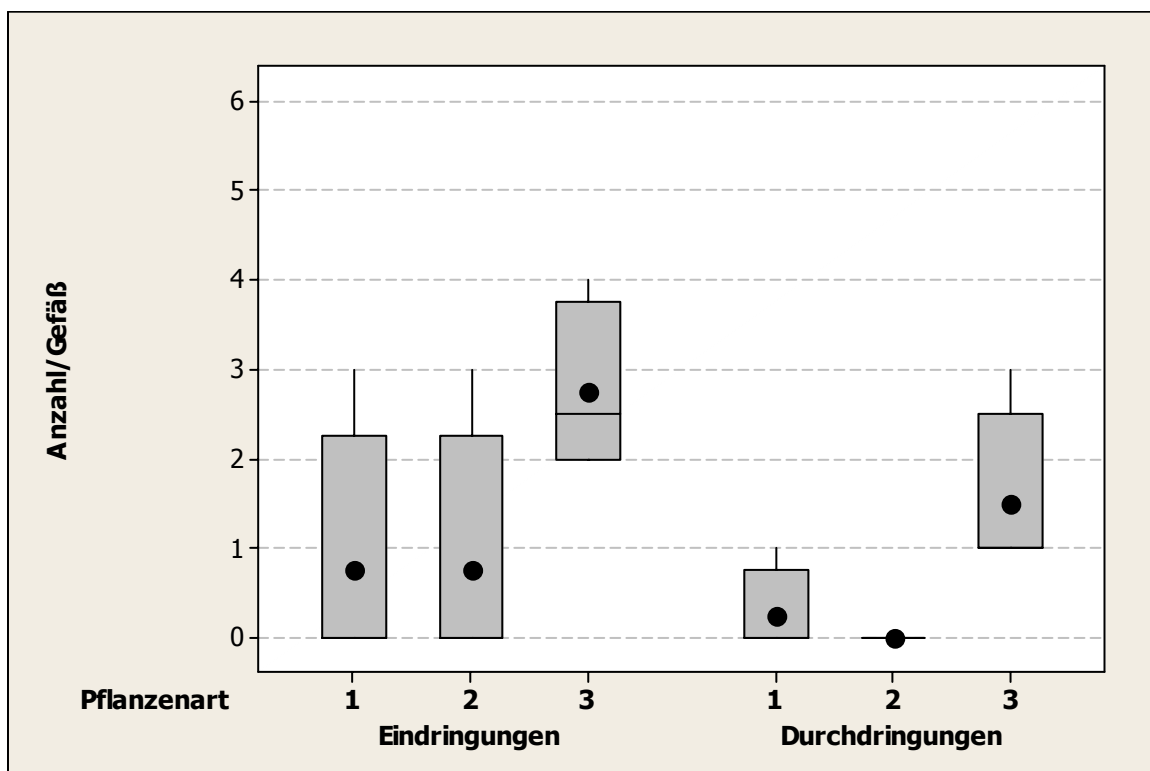


Abb. 35: Anzahl Wurzeleindringungen und -durchdringungen pro Gefäß nach 18 Monaten (3. Zwischenauswertung der Rohrabschnitte mit Bitumenringen, n = 4)
Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*



Abb. 36: Wurzeldurchdringung von *Ficus benjamina*

3.3.2 Versuchsansatz mit Plattenstapeln

3.3.2.1 Pflanzenentwicklung

Die drei Pflanzenarten zeigten in den Gefäßen mit Plattenstapeln ein sehr ähnliches Wachstum wie in den Gefäßen mit Rohrverbindungen (Abb. 99 und 100 im Anhang). Die geringen Unterschiede in der Höhe und im Stammdurchmesser der Pflanzen zwischen den beiden Versuchsansätzen sind nicht signifikant.

3.3.2.2 Wurzeleindringungen und -durchdringungen

Die Anzahl an Wurzeleindringungen und -durchdringungen hatte sich gegenüber den zurückliegenden Zwischenauswertungen weiter erhöht. Gemittelt über die Dichtungsringe wurde bei *Ficus benjamina* wiederum die signifikant höchste Anzahl Wurzeleindringungen und -durchdringungen pro Meter Bitumenring festgestellt (Abb. 37, 40 und 43 - 45). Die im Durchschnitt der Pflanzenarten bei Ring 1 verstärkt aufgetre-

nen Ein- und Durchdringungen lassen sich gegenüber den anderen Ringen statistisch nicht absichern (Abb. 38 und 41).

Wurzeln von *Pyracantha* hatten auch nach 18 Monaten bevorzugt die unteren Ringe penetriert und perforiert, während *Ficus carica* bei allen Ringen eine ähnliche Anzahl Eindringungen zeigte, aber nur die oberen 3 Ringe mit Wurzeln durchdrang (nicht statistisch gesichert gegenüber den beiden anderen Ringen). Die in Ring 1 und 2 festgestellte Anzahl Eindringungen und Durchdringungen war bei *Ficus benjamina* signifikant höher als bei den beiden anderen Pflanzenarten (Abb. 39 und 42).

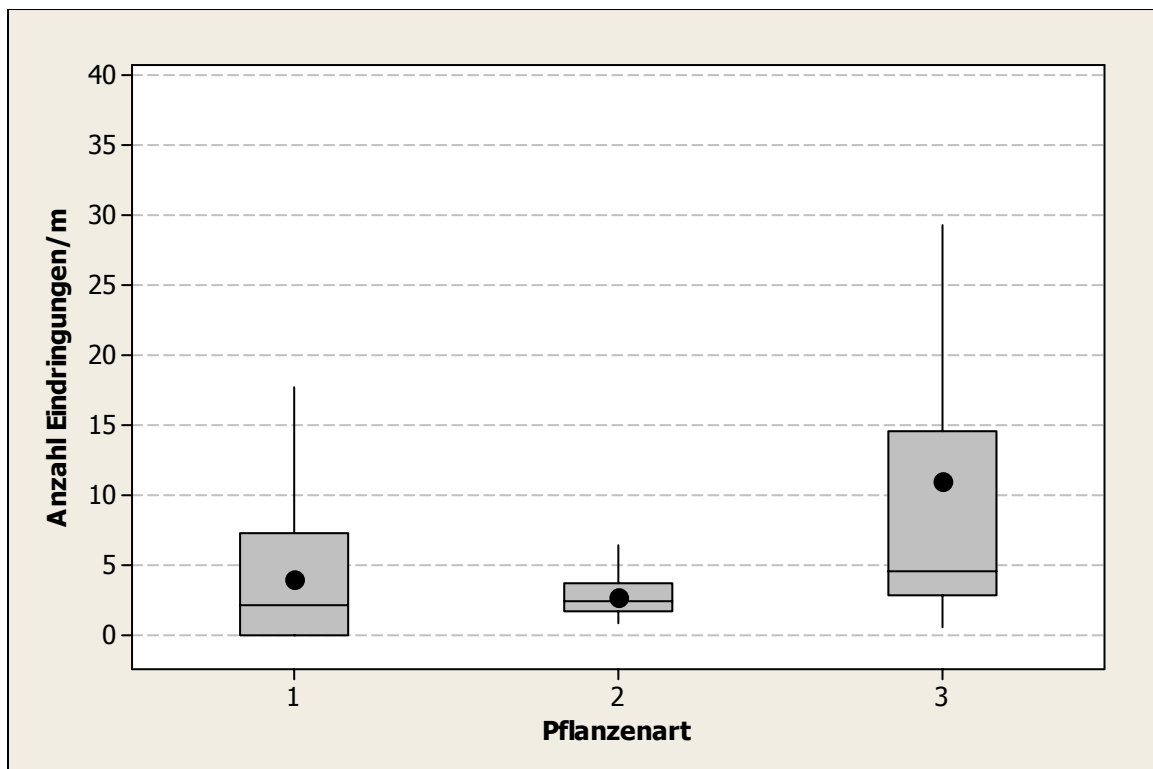


Abb. 37: Über die Dichtungsringe gemittelte Anzahl Wurzeleindringungen pro Meter Bitumenring nach 18 Monaten (3. Zwischenauswertung der Plattenstapel, n = 20)
Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*

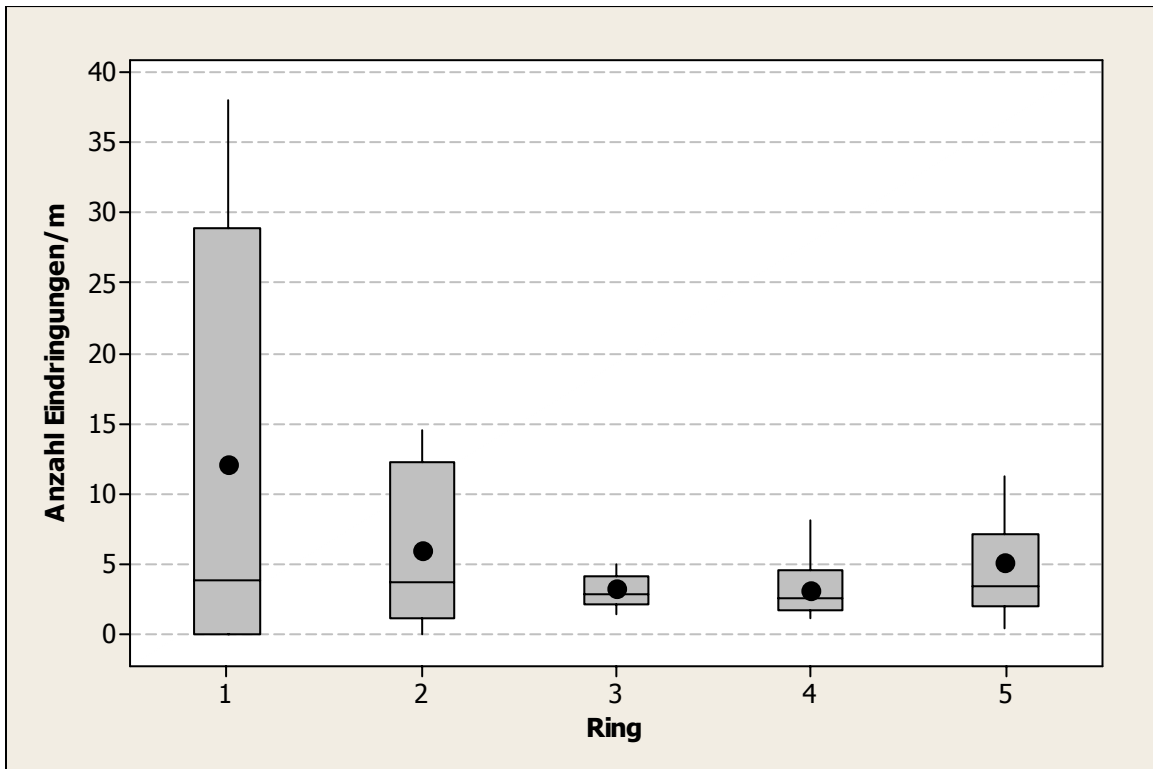


Abb. 38: Über die Pflanzenarten gemittelte Anzahl Wurzeleindringungen pro Meter Bitumenring nach 18 Monaten (3. Zwischenauswertung der Plattenstapel, n = 12)

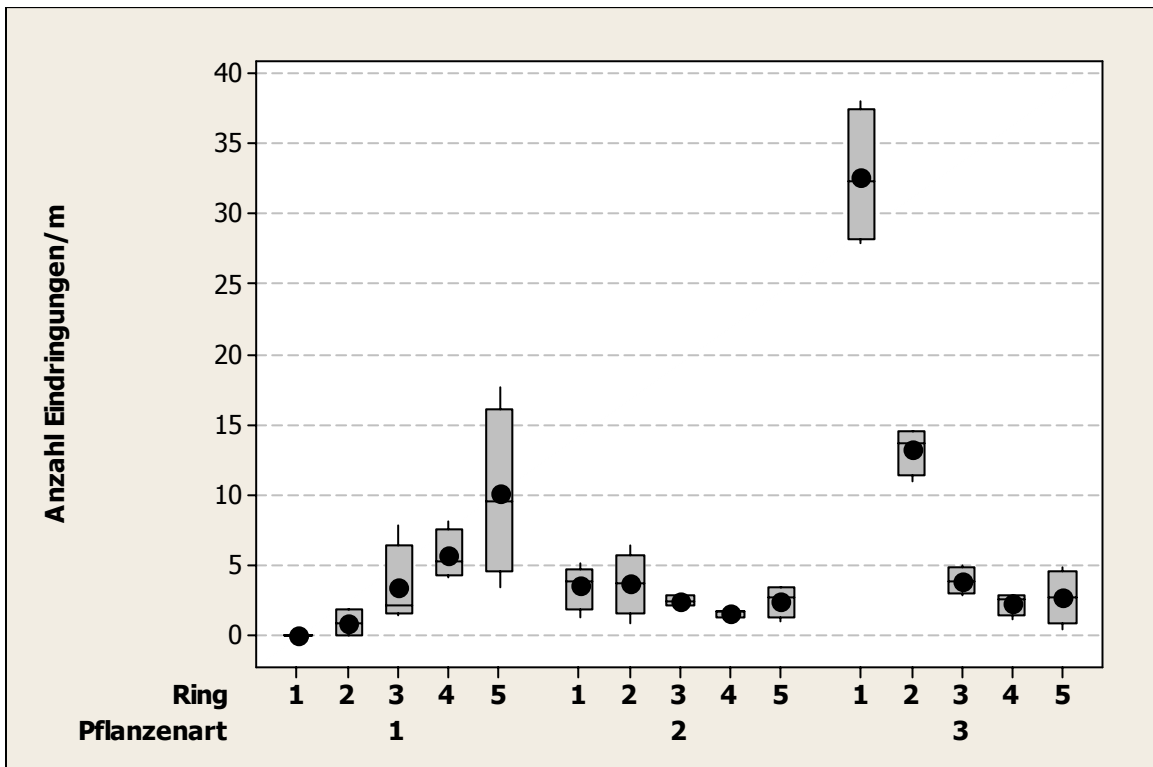


Abb. 39: Anzahl Wurzeleindringungen pro Meter Bitumenring nach 18 Monaten (3. Zwischenauswertung der Plattenstapel, n = 4)
 Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*

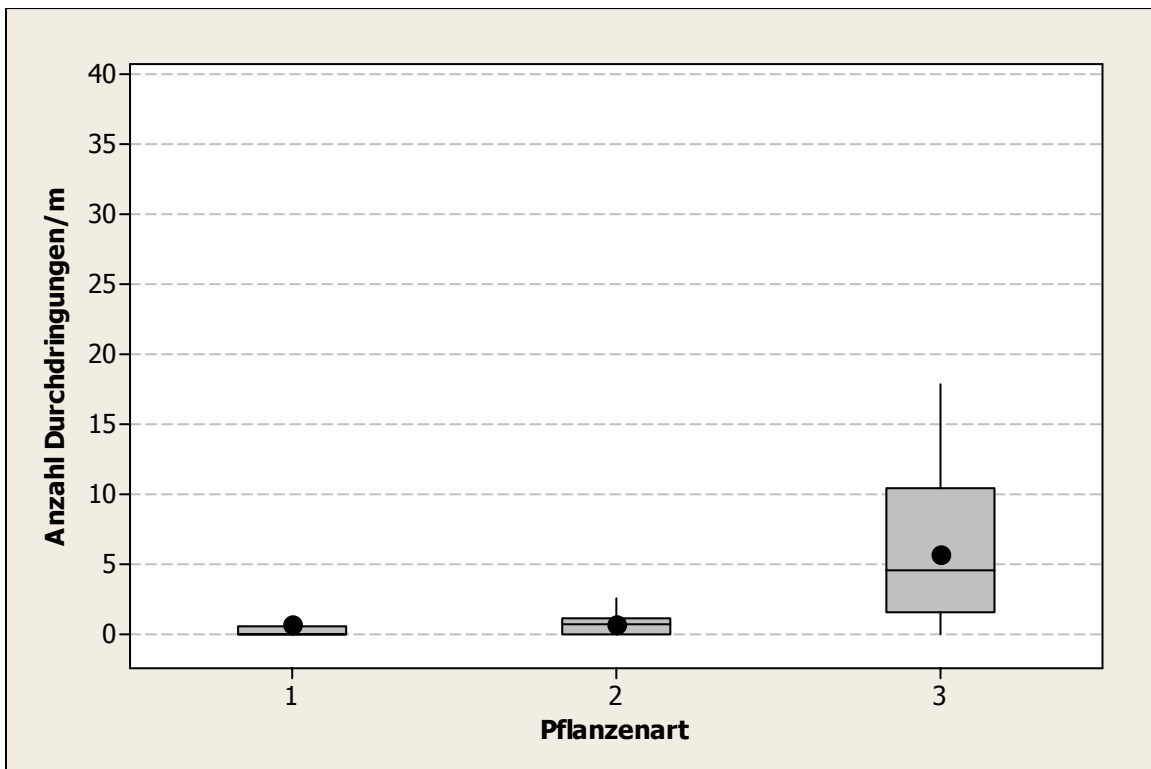


Abb. 40: Über die Dichtungsringe gemittelte Anzahl Wurzeldurchdringungen pro Meter Bitumenring nach 18 Monaten (3. Zwischenauswertung der Plattenstapel, n = 20) Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*

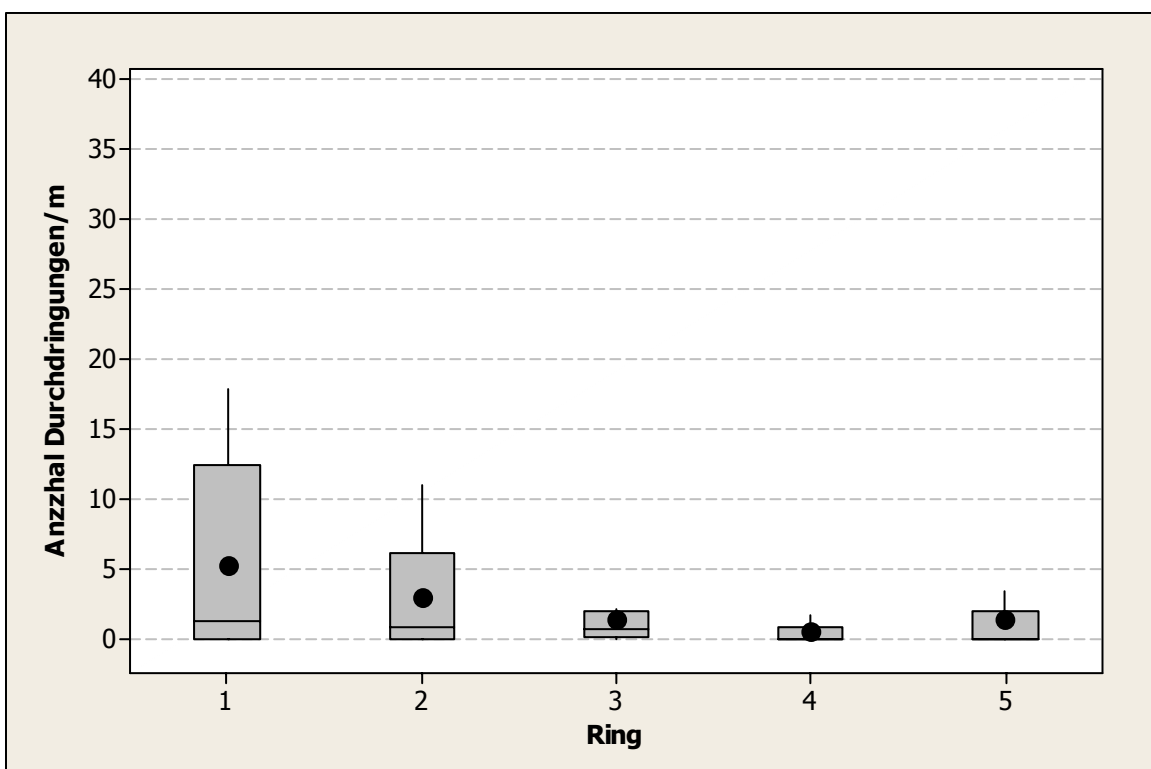


Abb. 41: Über die Pflanzenarten gemittelte Anzahl Wurzeldurchdringungen pro Meter Bitumenring nach 18 Monaten (3. Zwischenauswertung der Plattenstapel, n = 12)

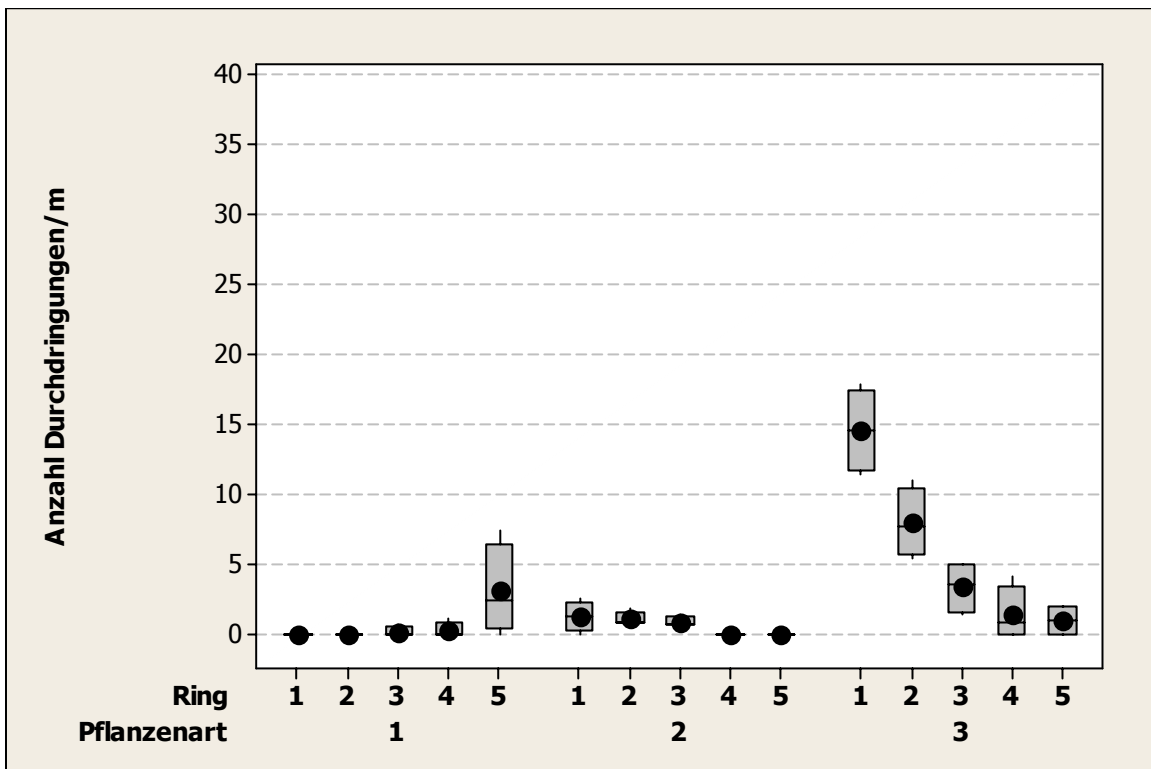


Abb. 42: Anzahl Wurzeleindringungen pro Meter Bitumenring nach 18 Monaten (3. Zwischenauswertung der Plattenstapel, n = 4)
 Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*



Abb. 43: Wurzeleindringungen von *Pyracantha* (Ring 5)



Abb. 44: Wurzeleindringungen von *Ficus carica* (Ring 3)



Abb. 45: Wurzeleindringungen von *Ficus benjamina* (Ring 1)

3.4 Endauswertung (Dezember 2008)

3.4.1 Kontrollgefäße mit Bitumenringen

3.4.1.1 Versuchsansatz mit Rohrverbindungen

3.4.1.1.1 Pflanzenentwicklung

Wie im Anhang (Abb. 101 und 102) dargestellt, wies *Pyracantha* im Dezember 2008 in etwa die gleiche mittlere Höhe (340 cm) wie bei den 3. Zwischenauswertung (Juni 2008) auf. Der Stammdurchmesser war auf durchschnittlich 2,3 cm angewachsen. Bei *Ficus carica* wurden im Durchschnitt eine Höhe von 114 cm und ein Stammdurchmesser von 1,8 cm ermittelt. Der Zuwachs gegenüber der letzten Auswertung war damit beachtlich. Mit einer durchschnittlichen Höhe von 260 cm und einem Stammdurchmesser von 3,1 cm lag *Ficus benjamina* gleichfalls deutlich über dem Niveau der Auswertung 6 Monate zuvor (Abb. 46).



Abb. 46: Pflanzenbestand bei der Endauswertung

Ficus benjamina hatte zahlreiche sprossbürtige, dem Boden zustrebende Luftwurzeln gebildet, die z.T. außerhalb des Gefäßes wuchsen, vornehmlich aber in das Substrat eingedrungen waren und die bereits vorhandene Wurzelmasse erheblich erhöht hatten (Abb. 47 – 49).



Abb. 47: *Ficus benjamina* mit Luftwurzeln außerhalb der Gefäße



Abb. 48: *Ficus benjamina* mit Luftwurzeln innerhalb eines Gefäßes

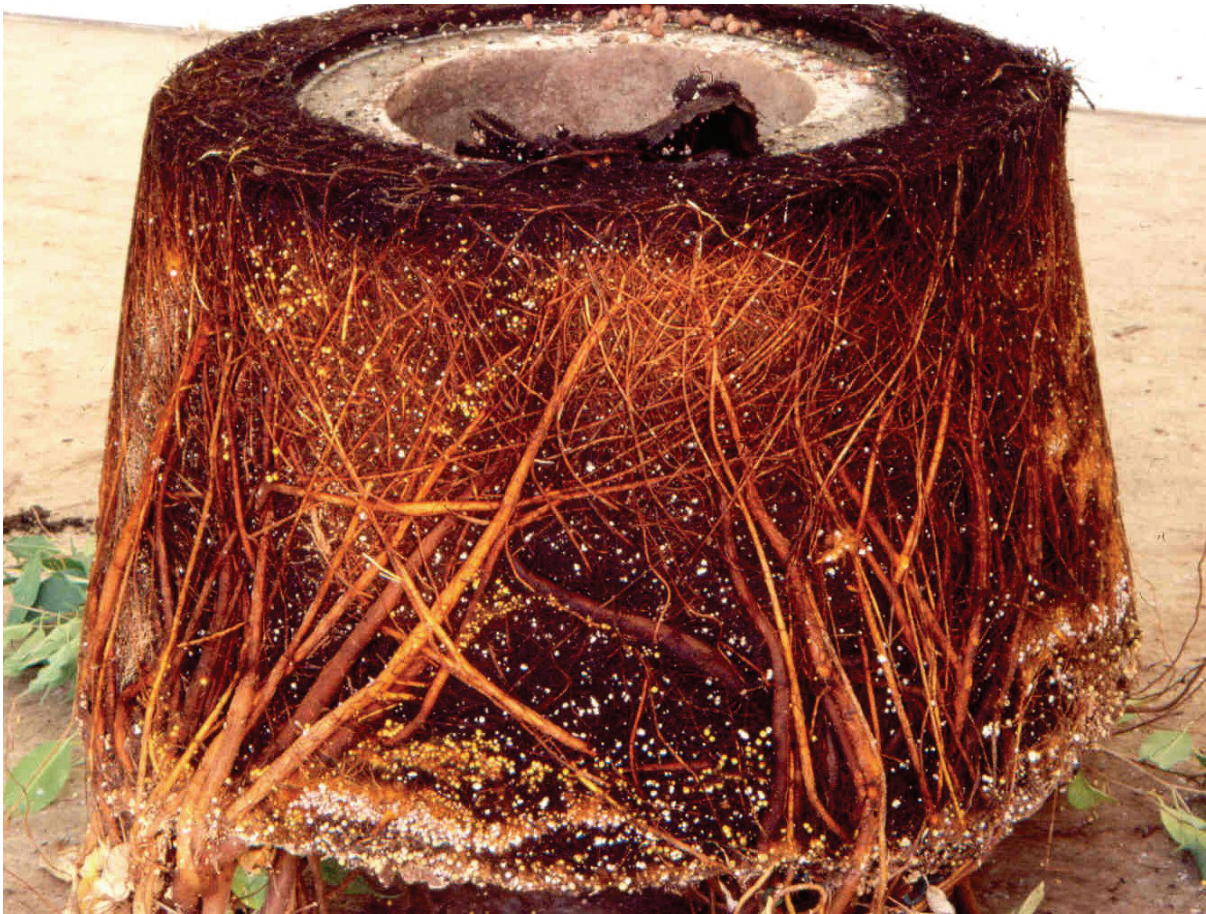


Abb. 49: Wurzelbild von *Ficus benjamina*

3.4.1.1.2 Wurzeleindringungen und -durchdringungen

Die Anzahl der Penetrationen in die Bitumenringe der Rohrverbindung hatte sich gegenüber der dritten Zwischenauswertung leicht erhöht. *Pyracantha* erzielte im Mittel 1,75 Eindringungen und 0,25 Durchdringungen/Gefäß. Demgegenüber konnten die Wurzeln von *Ficus carica* keine Durchdringungen, sondern lediglich im Durchschnitt 1,25 Eindringungen/Gefäß bewirken. *Ficus benjamina* verursachte mit durchschnittlich 3,5 Wurzeleindringungen und 3,0 Wurzeldurchdringungen/Gefäß die meisten Penetrationen (Abb. 50 - 52). Die Anzahl der Wurzeldurchdringungen von *Ficus benjamina* lässt sich gegenüber den beiden anderen Pflanzenarten statistisch absichern.

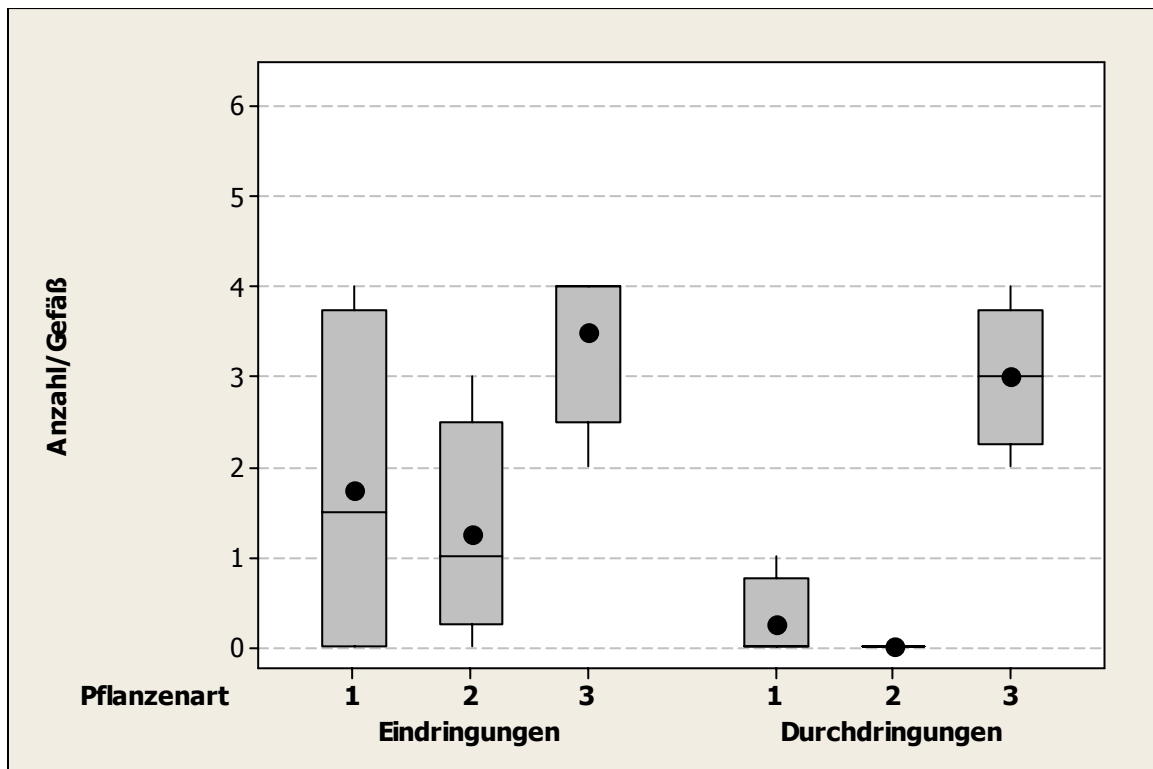


Abb. 50: Anzahl Wurzeleindringungen und -durchdringungen pro Gefäß nach 24 Monaten (Endauswertung der Rohrabschnitte mit Bitumenringen, n = 4)
 Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*



Abb. 51: Wurzeldurchdringung von *Ficus benjamina* (Innenseite der Rohrverbindung)



Abb. 52: Wurzeldurchdringung von *Ficus benjamina* (Außenseite der Rohrverbindung nach Entfernen der Muffe)

3.4.1.2 Versuchsansatz mit Plattenstapeln

3.4.1.2.1 Pflanzenentwicklung

Die drei Pflanzenarten erzielten in den Gefäßen mit Plattenstapeln im Durchschnitt ein ähnliches Wachstum wie in den Gefäßen mit Rohrverbindungen (Abb. 103 und 104 im Anhang). Die geringen Unterschiede in der Höhe und im Stammdurchmesser der Pflanzen zwischen den beiden Versuchsansätzen sind statistisch nicht gesichert. Die drei Pflanzenarten, insbesondere *Ficus benjamina*, hatten das Substrat mit einem dichten Wurzelwerk durchzogen (Abb. 53 - 56).



Abb. 53: Ausbreitung der Wurzeln von *Ficus benjamina* an der Substratoberfläche



Abb. 54: Ausbreitung der Wurzeln von *Ficus benjamina* im Substrat (Ring 3)



Abb. 55: Ausbreitung der Wurzeln von *Ficus carica* im Substrat (Ring 5)

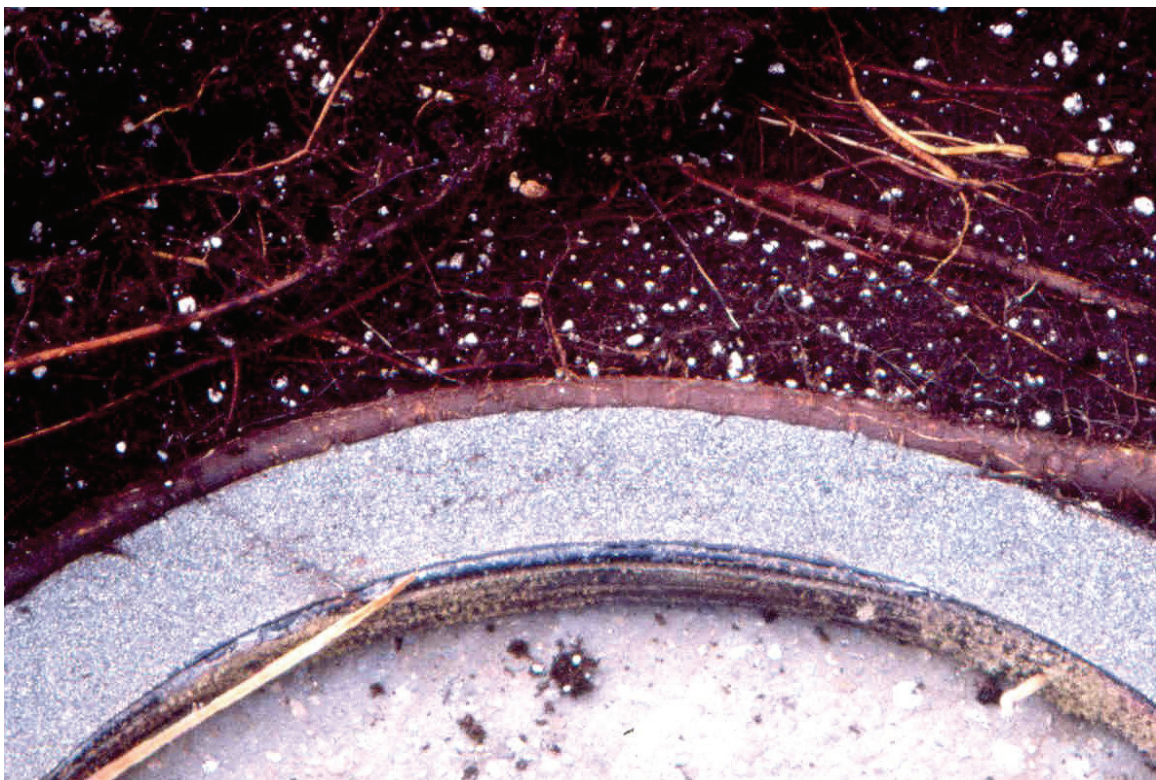


Abb. 56: Ausbreitung der Wurzeln von *Pyracantha* im Substrat (Ring 4)

3.4.1.2.2 Wurzeleindringungen und -durchdringungen

Die Anzahl an Wurzeleindringungen und -durchdringungen hatte sich nach 24 Monaten Standzeit gegenüber der dritten Zwischenauswertung nach 18 Monaten z.T. deutlich erhöht. Über alle Bitumenringe gemittelt wurden wiederum bei *Ficus benjamina* die signifikant meisten Wurzeleindringungen und -durchdringungen pro Meter Bitumenring festgestellt (Abb. 57 und 60). Die im Durchschnitt der drei Pflanzenarten verursachten Ein- und Durchdringungen bei den einzelnen Ringen lassen sich statistisch nicht absichern (Abb. 58 und 61). Wurzeln von *Pyracantha* attackierten vor allem die unteren Ringe, während *Ficus carica* bei allen Ringen eine ähnliche Anzahl Eindringungen und Durchdringungen erkennen ließ (nicht signifikant). *Ficus benjamina* führte insbesondere beim oberen Ring 1 zu Wurzeleindringungen. Die Anzahl der festgestellten Eindringungen lassen sich statistisch gegenüber den Penetrationen dieses Rings durch die anderen Pflanzenarten absichern (Abb. 59). Die Eindringungen von *Ficus benjamina* in Ring 2 unterschieden sich nur signifikant gegenüber den Penetrationen von *Pyracantha* in diesen Ring. Die von *Ficus benjamina* in Ring 1, 2 und 3 verursachten Durchdringungen sind gegenüber den Perforationen der anderen Pflanzenarten bei diesen Ringen gesichert (Abb. 62 - 64).

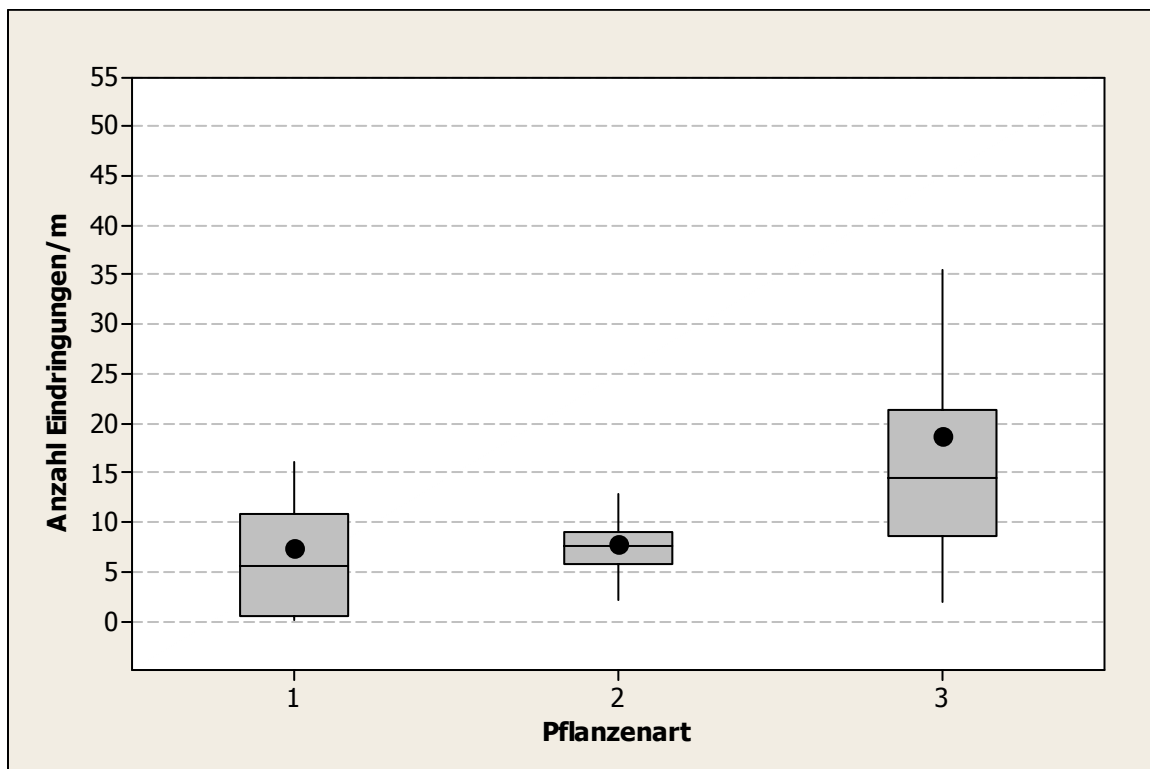


Abb. 57: Über die Dichtungsringe gemittelte Anzahl Wurzeleindringungen pro Meter Bitumenring nach 24 Monaten (Endauswertung der Plattenstapel, n = 20)
Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*

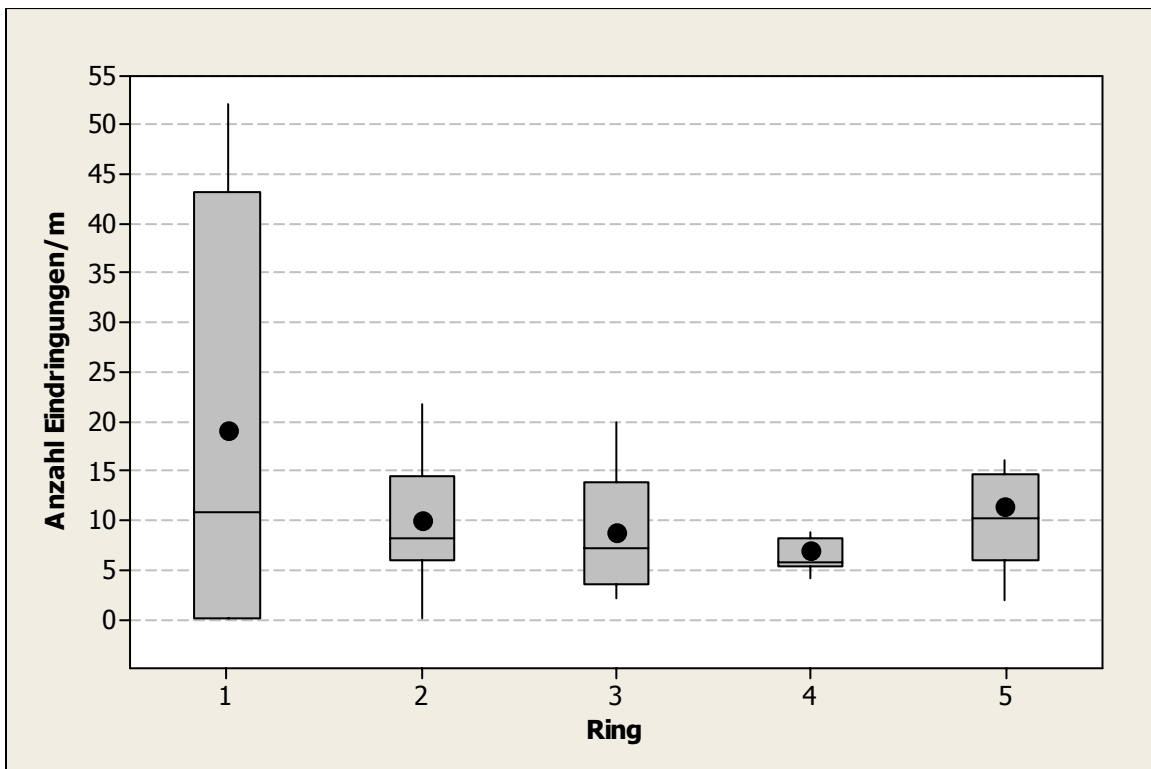


Abb. 58: Über die Pflanzenarten gemittelte Anzahl Wurzeleindringungen pro Meter Bitumenring nach 24 Monaten (Endauswertung der Plattenstapel, n = 12)

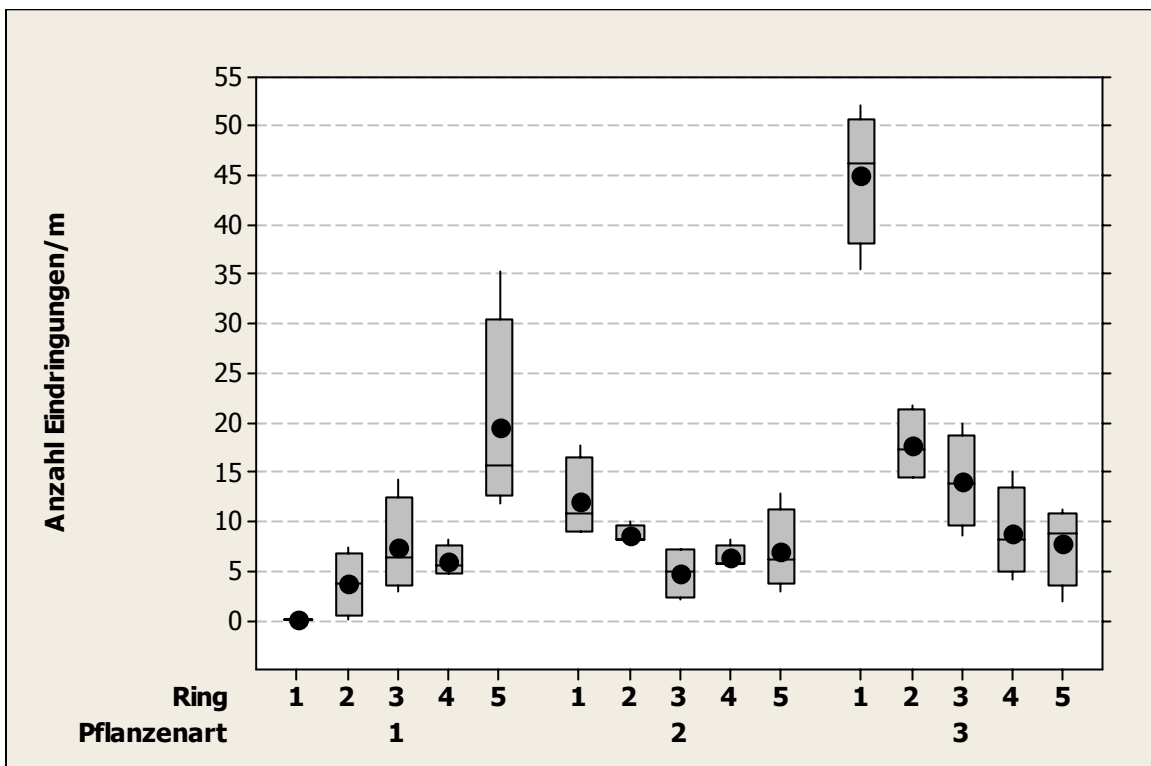


Abb. 59: Anzahl Wurzeleindringungen pro Meter Bitumenring nach 24 Monaten (Endauswertung der Plattenstapel, n = 4)

Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*

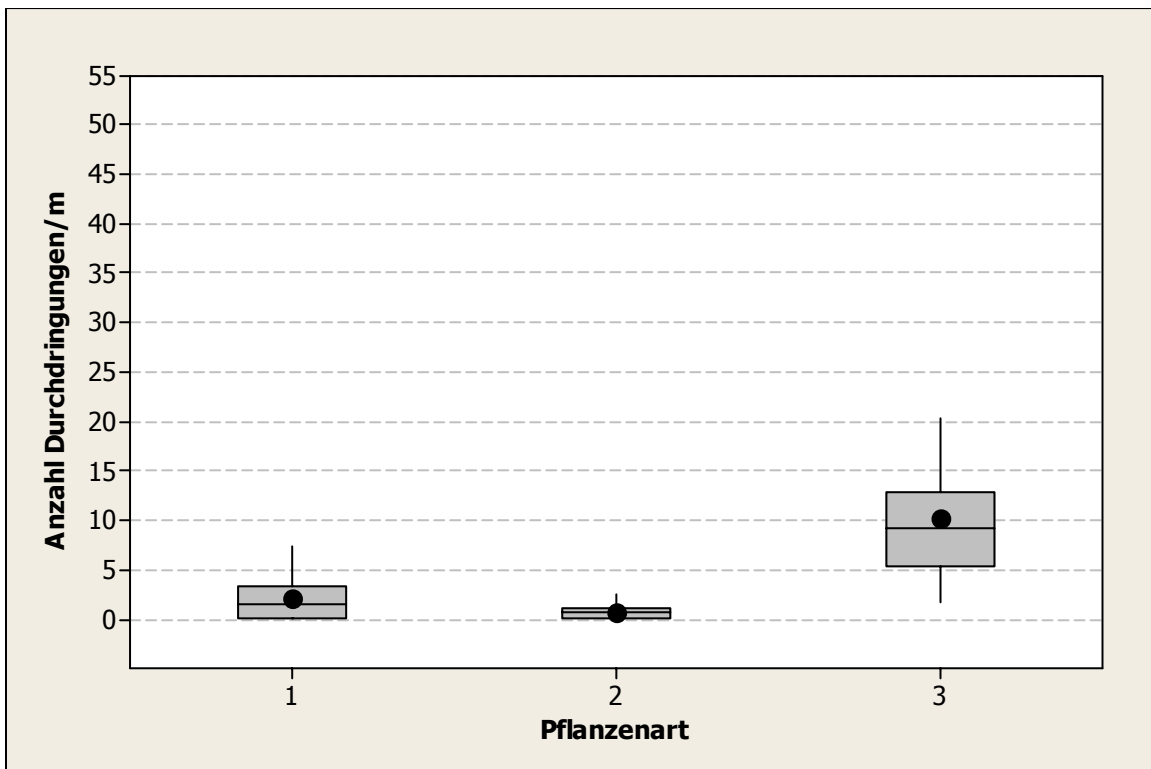


Abb. 60: Über die Dichtungsringe gemittelte Anzahl Wurzeldurchdringungen pro Meter Bitumenring nach 24 Monaten (Endauswertung der Plattenstapel, n = 20)
Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*

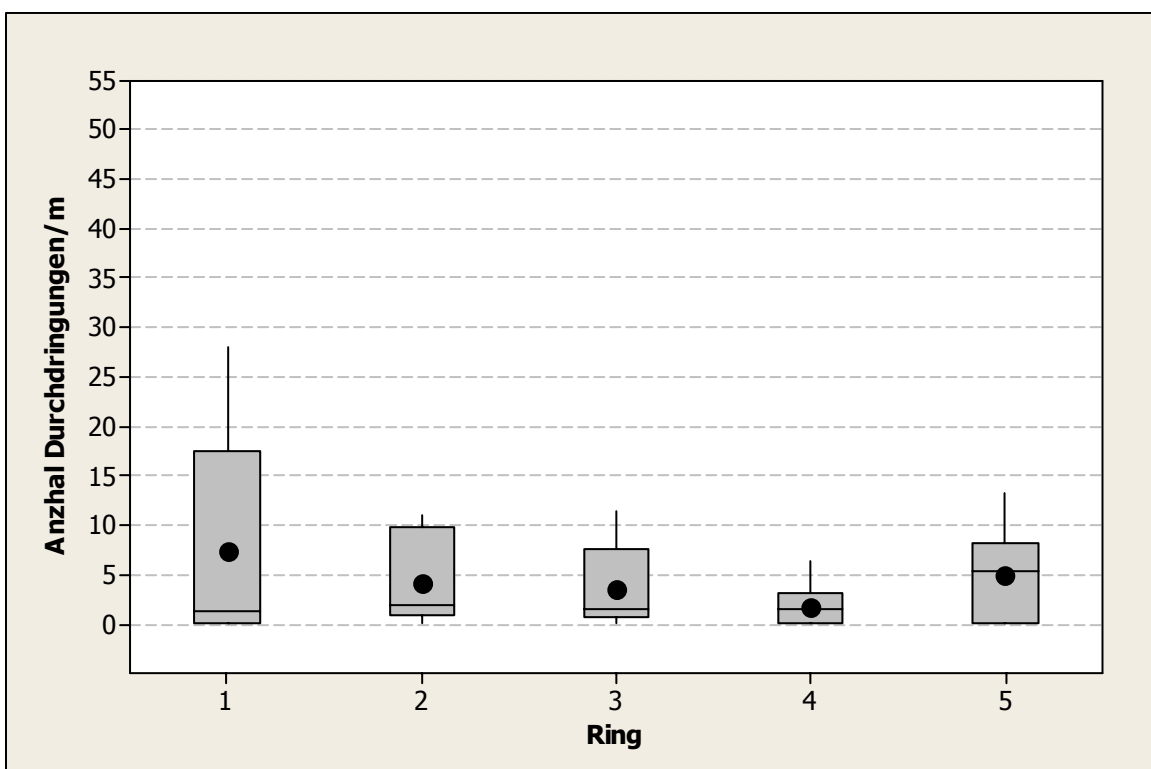


Abb. 61: Über die Pflanzenarten gemittelte Anzahl Wurzeldurchdringungen pro Meter Bitumenring nach 24 Monaten (Endauswertung der Plattenstapel, n = 12)

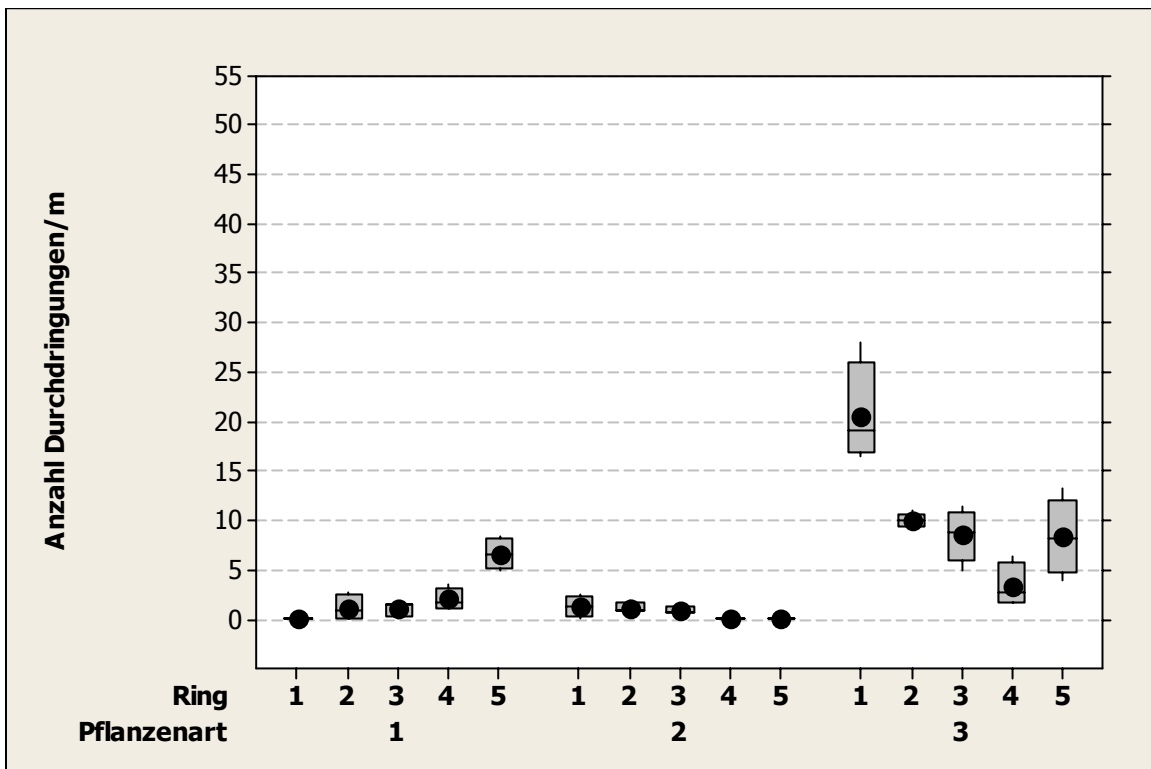


Abb. 62: Anzahl Wurzeldurchdringungen pro Meter Bitumenring nach 24 Monaten (Endauswertung der Plattenstapel, n = 4)
 Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*

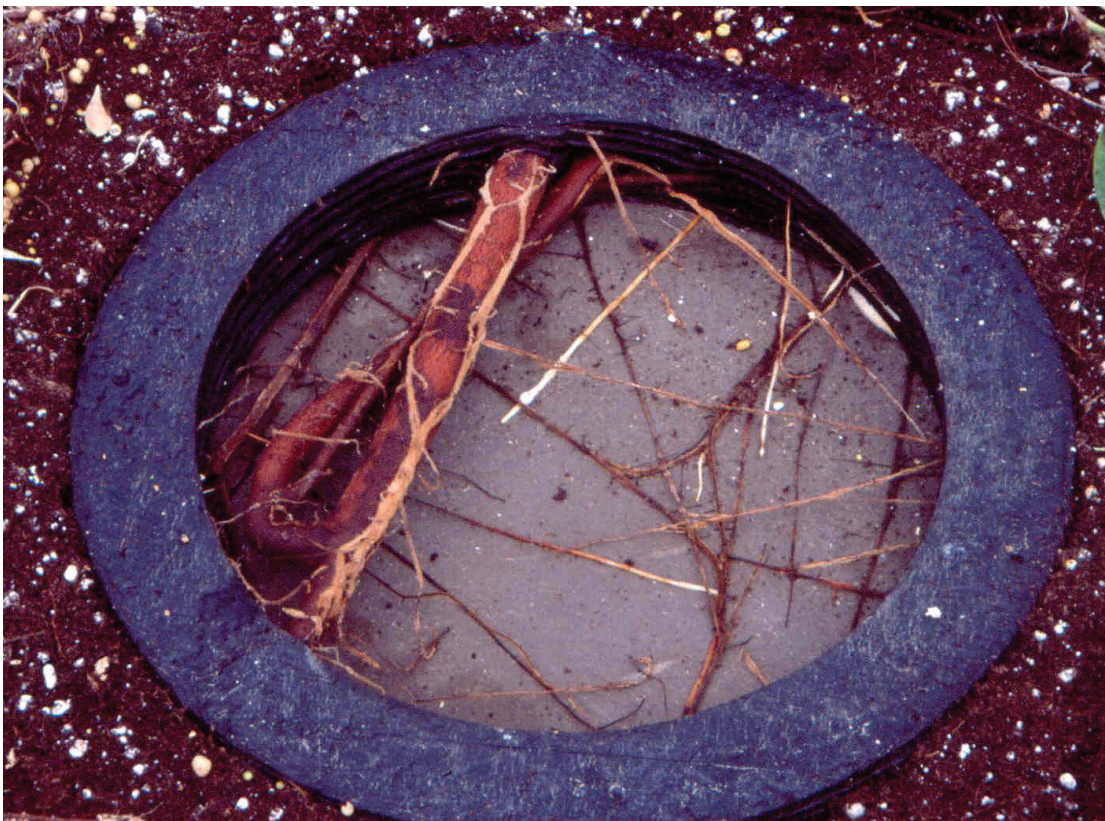


Abb. 63: Wurzeldurchdringungen von *Ficus benjamina* (Ring 1)



Abb. 64: Wurzeldurchdringung von *Pyracantha* (Ring 5)

3.4.2 Gefäße mit SBR-Dichtungen

3.4.2.1 Versuchsansatz mit Rohrverbindungen

3.4.2.1.1 Pflanzenentwicklung

Im Hinblick auf das Wachstum der drei Pflanzenarten konnten in den Gefäßen mit SBR-Dichtungen gegenüber den Kontrollgefäßen mit Bitumenringen nur geringe, nicht signifikante Unterschiede festgestellt werden (Abb. 105 und 106 im Anhang). Ein Einfluss der Dichtungsart und der Verpressung auf das Pflanzenwachstum ließ sich nicht erkennen.

Zahlreiche Wurzeln waren über den engen Spalt der Rohrverbindung bis zur Dichtung vorgedrungen (Abb. 65)



Abb. 65: Wurzeln von *Ficus carica* im Bereich der Dichtung

3.4.2.1.2 Wurzeleindringungen und -durchdringungen

Wurzeleindringungen waren nur in der Stützschulter, d.h. im oberen Kontaktbereich von Dichtung und Spitzende, der außerhalb der eigentlichen Verpressungszone liegt, festzustellen (Abb. 66). In diesem Bereich hatte sich z.T. ein dichtes Wurzelgeflecht ausgebreitet, so dass die Anzahl der einzelnen Wurzeln nicht festgestellt werden konnte (Abb. 67 – 69). Es wurde daher der Anteil der mit Wurzeln bedeckte Fläche in diesem Bereich visuell in 6 Stufen bewertet (0, 20, 40, 60, 80 und 100 %).

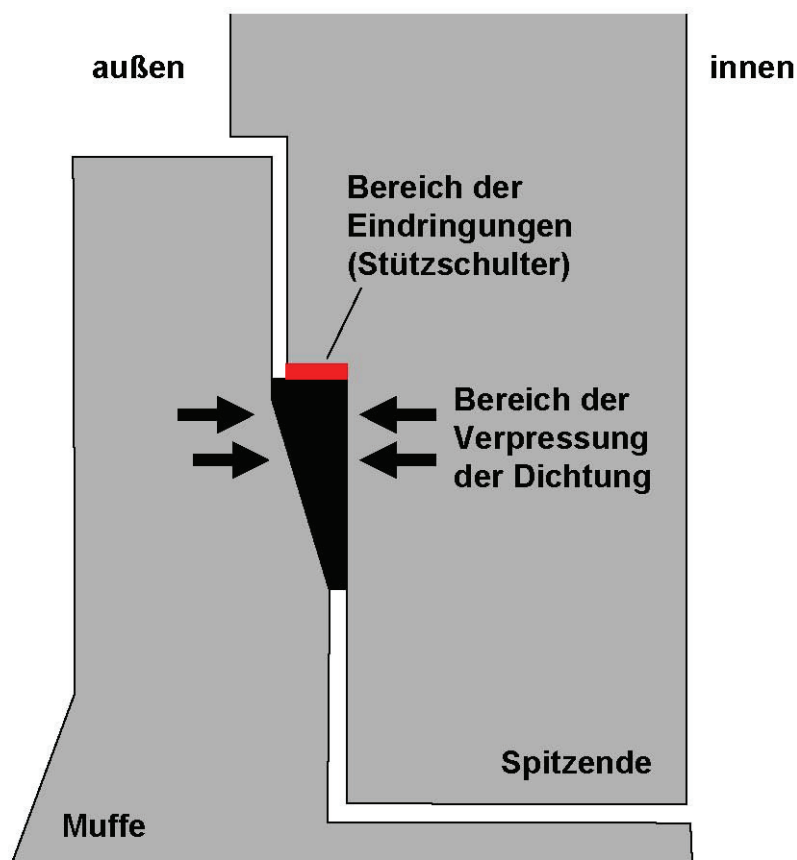


Abb. 66: Bereich der festgestellten Wurzeleindringungen



Abb. 67: Wurzeleindringungen im Bereich der Stützschulter (SBR-Dichtung, *Ficus carica*)



Abb. 68: Wurzeleindringungen im Bereich der Stützschulter (SBR-Dichtung, *Ficus benjamina*)



Abb. 69: Wurzeleindringungen im Bereich der Stützschulter nach Entfernen des SBR-Dichtungsringes (*Ficus benjamina*)

Gegenüber *Pyracantha* waren die Wurzeleindringungen von *Ficus carica* und *Ficus benjamina* im oberen Kontaktbereich von Dichtung und Spitzende – über alle Dichtungen und Verpressungen hinweg betrachtet - signifikant stärker ausgeprägt (Abb. 70).

Von den Wurzeleindringungen aller drei Pflanzenarten waren auch die mit einem Wurzelhemmstoff ausgerüsteten, unterschiedlich verpressten Dichtungsarten (SBR WS und SBR WS-CX) betroffen. Die Intensität der Eindringungen war aber insgesamt signifikant geringer als bei der SBR-Dichtung ohne Hemmstoff (Abb. 71).

Bei der hohen Verpressung (35 %) war das Ausmaß der Wurzeleindringungen – alle drei Pflanzenarten und drei Dichtungsarten zusammengefasst - signifikant geringer als bei der geringen Verpressung von 10 % (Abb. 72).

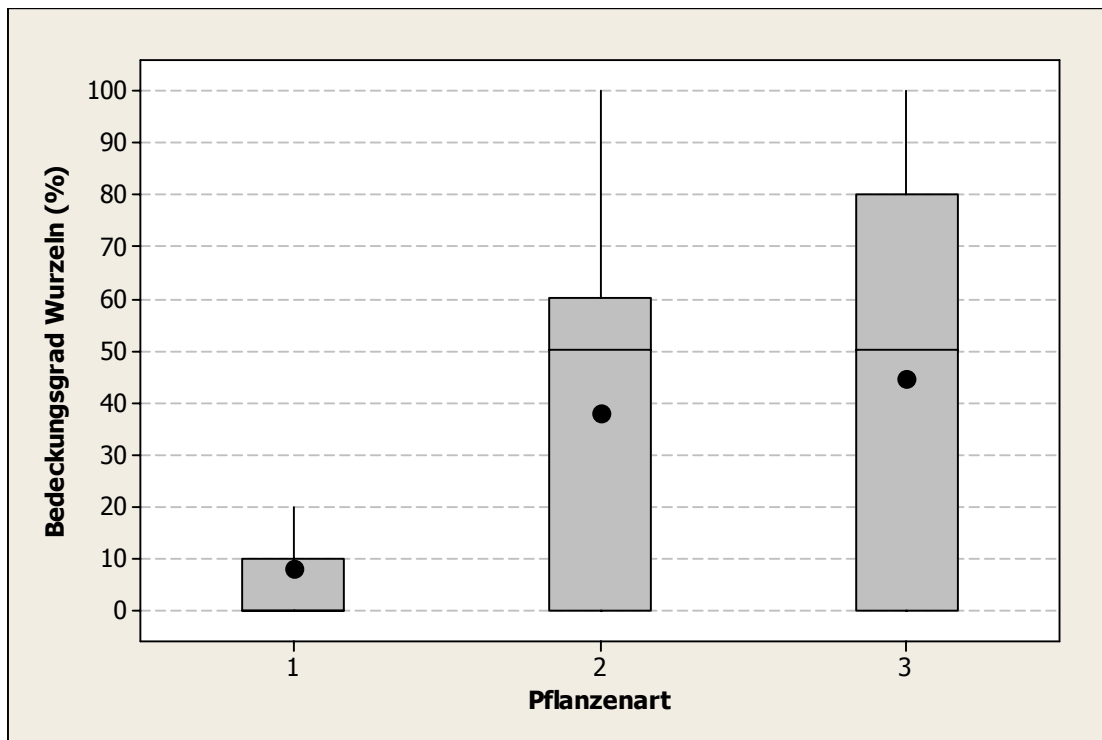


Abb. 70: Über die Dichtungen und Verpressungen gemittelter Anteil der mit Wurzeln bedeckten Fläche zwischen Dichtung und Spitzende nach 24 Monaten (Endauswertung der Rohrabschnitte mit SBR-Dichtungen, n = 24)

Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*

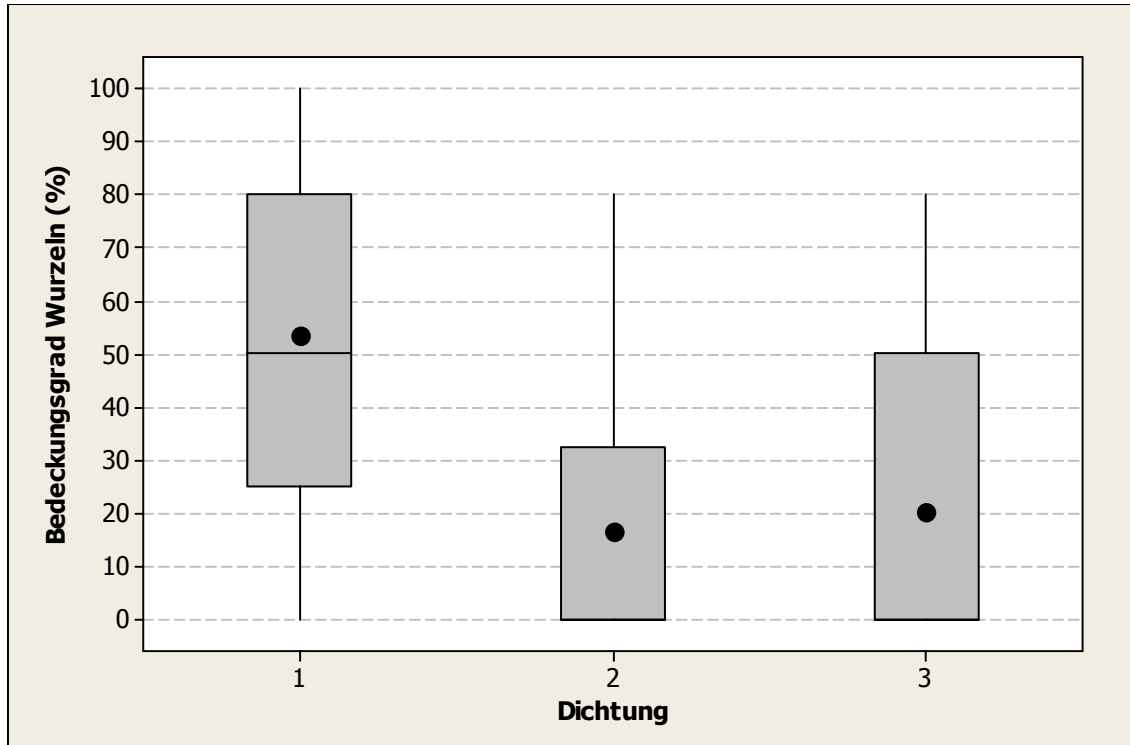


Abb. 71: Über die Pflanzenarten und Verpressungen gemittelter Anteil der mit Wurzeln bedeckten Fläche zwischen Dichtung und Spitzende nach 24 Monaten (Endauswertung der Rohrabschnitte mit SBR-Dichtungen, n = 24)

Dichtung 1 = SBR, 2 = SBR WS, 3 = SBR WS-CX

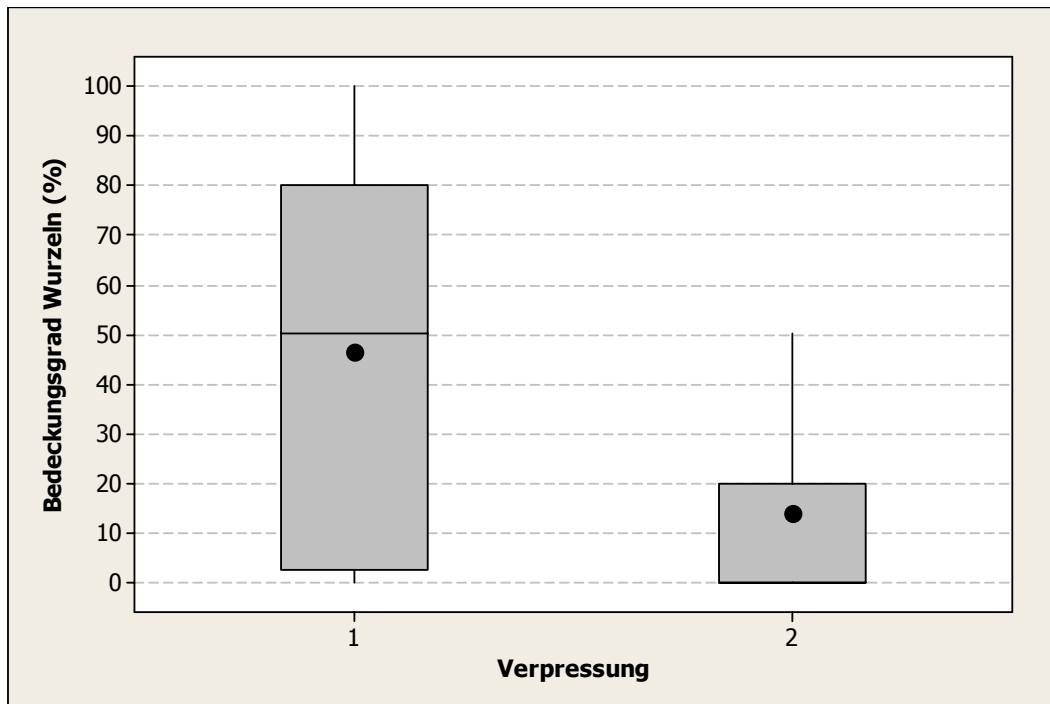


Abb. 72: Über die Dichtungen und Pflanzenarten gemittelter Anteil der mit Wurzeln bedeckten Fläche zwischen Dichtung und Spitzende nach 24 Monaten (Endauswertung der Rohrabschnitte mit SBR-Dichtungen, $n = 36$)
Verpressung 1 = 10 %, 2 = 35 %

Bezüglich der Einwirkungen der Wurzeln auf die unterschiedlichen Dichtungen gemittelt über die Verpressungen zeigten die einzelnen Pflanzenarten ein ähnliches Verhalten. Bei der SBR-Dichtung ohne Wurzelhemmstoff wurden die meisten Eindringungen beobachtet, wobei die mit Wurzeln bedeckte Fläche bei den beiden *Ficus*-Arten weitaus größer war als bei *Pyracantha* (Abb. 73). Der Zusatz eines Wurzelhemmstoffs verringerte die Anzahl Wurzeleindringungen maßgeblich; bei *Pyracantha* ließ es sich sogar fast vollständig vermeiden. Auf die Stärke der Verpressung reagierten die Pflanzenarten ebenfalls einheitlich in der Weise, dass die stärker verpressten Dichtungen (gemittelt über die Dichtungsart) eine deutlich geringere Anzahl an Wurzeleindringungen im Bereich der Stützschulterverursachten (Abb. 74). Die SBR-Dichtung ohne Wurzelhemmstoff zeigte im Durchschnitt der Pflanzenarten sowohl bei geringer (10 %) wie auch bei hoher Verpressung (35 %) Wurzeleindringungen - mit deutlicher Abnahme bei hoher Verpressung (Abb. 75). Die beiden wurzelfest ausgerüsteten Dichtungen (SBR WS und SBR WS-CX) hingegen boten bei 35 % Verpressung sicheren Schutz gegen Wurzeleindringungen und wurden nur bei 10 % Verpressung in geringem Umfang penetriert. Eine Interaktion zwischen Dichtungsart und Verpressung war nicht zu erkennen.

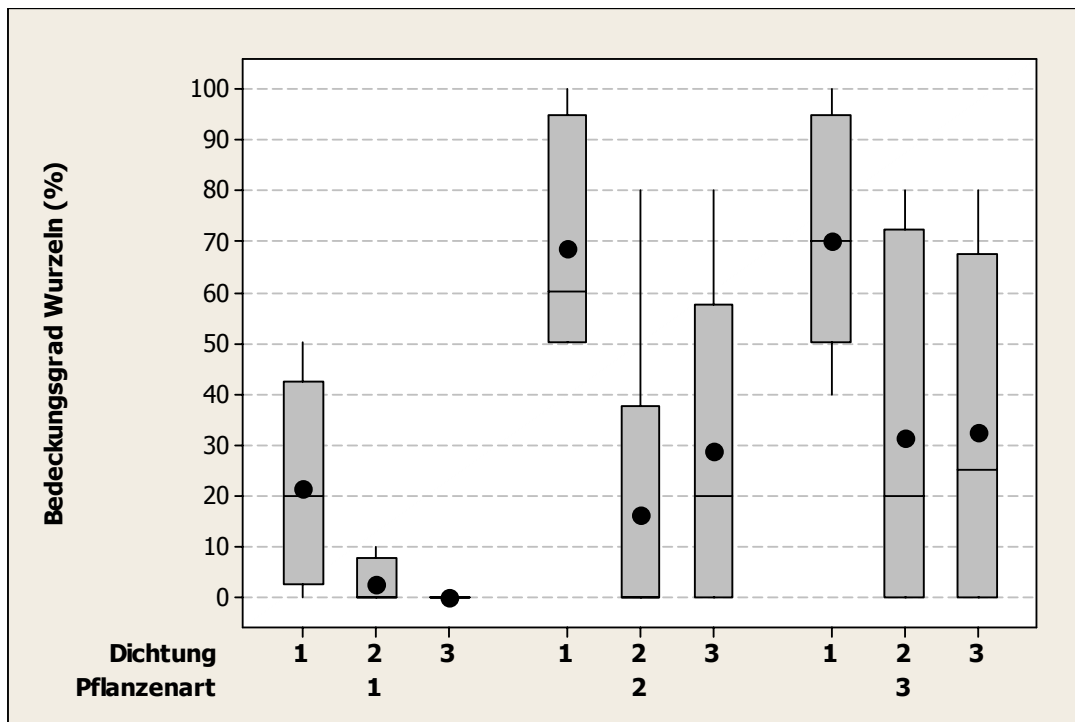


Abb. 73: Über die Verpressungen gemittelter Anteil der mit Wurzeln bedeckten Fläche zwischen Dichtung und Spitzende nach 24 Monaten (Endauswertung der Rohrabschnitte mit SBR-Dichtungen, n = 8)

Dichtung 1 = SBR, 2 = SBR WS, 3 = SBR WS-CX

Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*

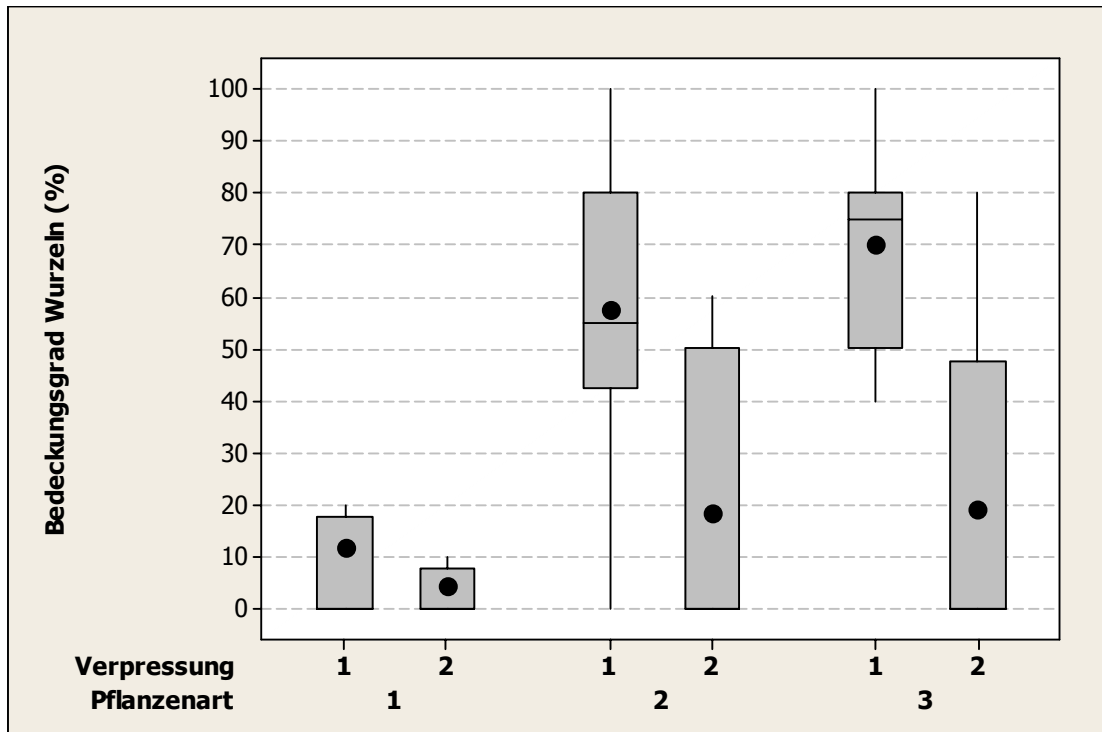


Abb. 74: Über die Dichtungen gemittelter Anteil der mit Wurzeln bedeckten Fläche zwischen Dichtung und Spitzende nach 24 Monaten (Endauswertung der Rohrabschnitte mit SBR-Dichtungen, n = 12)

Verpressung 1 = 10 %, 2 = 35 %

Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*

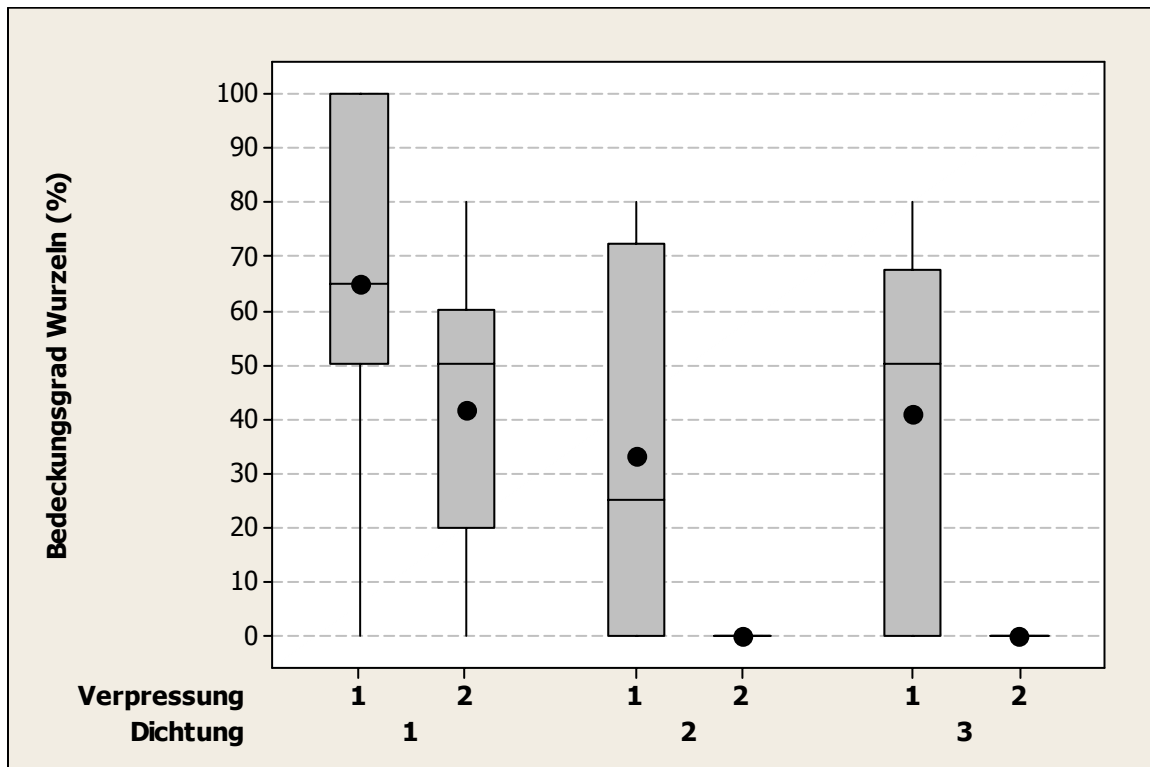


Abb. 75: Über die Pflanzenarten gemittelter Anteil der mit Wurzeln bedeckten Fläche zwischen Dichtung und Spitzende nach 24 Monaten (Endauswertung der Rohrab-schnitte mit SBR-Dichtungen, n = 12)

Verpressung 1 = 10 %, 2 = 35 %

Dichtung 1 = SBR, 2 = SBR WS, 3 = SBR WS-CX

Bezogen auf die einzelnen Dichtungen und die variierte Verpressung reagierten die verwendeten 3 Pflanzenarten im Hinblick auf das Ausmaß der Wurzeleindringungen z. T. sehr unterschiedlich. Bei allen Arten wurden jedoch die Eindringungen durch die Dichtungsart und die Stärke der Verpressung auf ähnliche Weise beeinflusst, so dass keine Wechselwirkung erkennbar ist (Abb. 76).

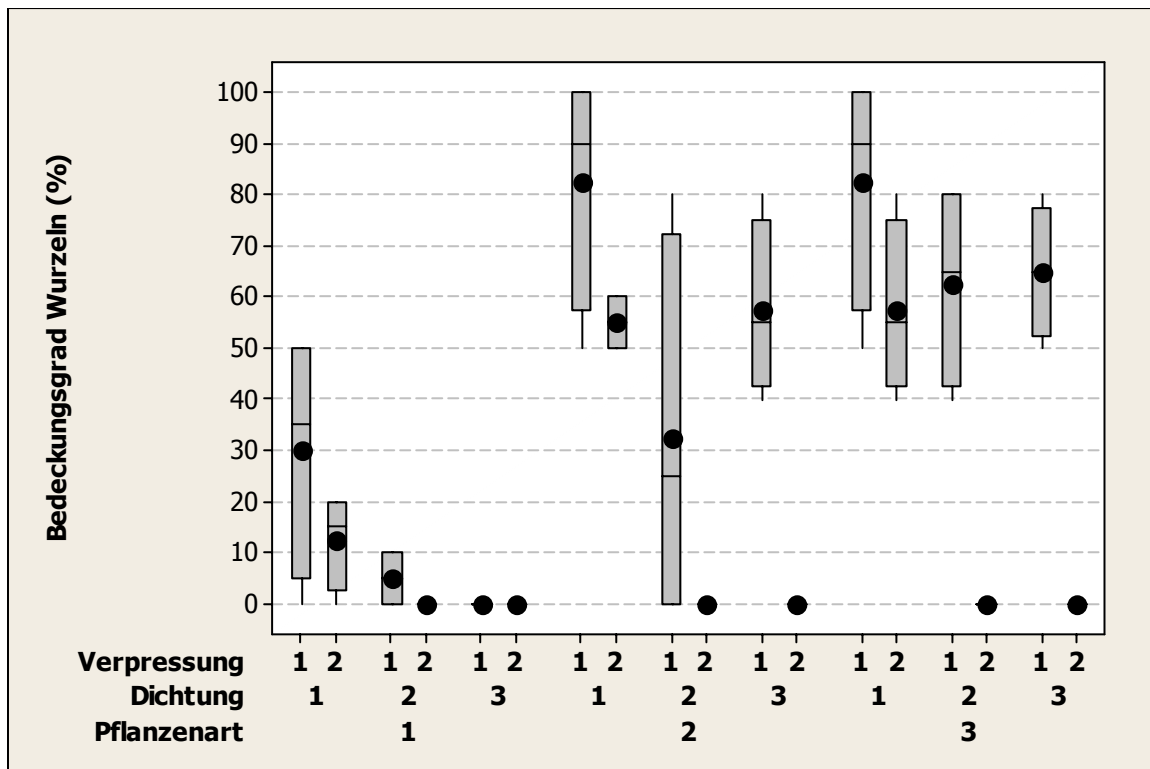


Abb. 76: Anteil der mit Wurzeln bedeckten Fläche zwischen Dichtung und Spitzende nach 24 Monaten (Endauswertung der Rohrabschnitte mit SBR-Dichtungen, n = 4)

Verpressung 1 = 10 %, 2 = 35 %

Dichtung 1 = SBR, 2 = SBR WS, 3 = SBR WS-CX

Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*

Aus den z.T. in beachtlichem Umfang aufgetretenen Wurzeleindringungen im Bereich der Stützschulter ging nur eine von *Ficus benjamina* bewirkte Durchdringung hervor. Dabei nutzte die Wurzel die an der breiteren Basis des Dichtprofils herrschende geringere Verpressung, um zwischen Dichtung und Spitzende durchzuwachsen (Abb. 77). Betroffen hiervon war eine um 10 % verpresste SBR-Dichtung ohne Wurzelhemmstoff (Abb. 78 bis 80).

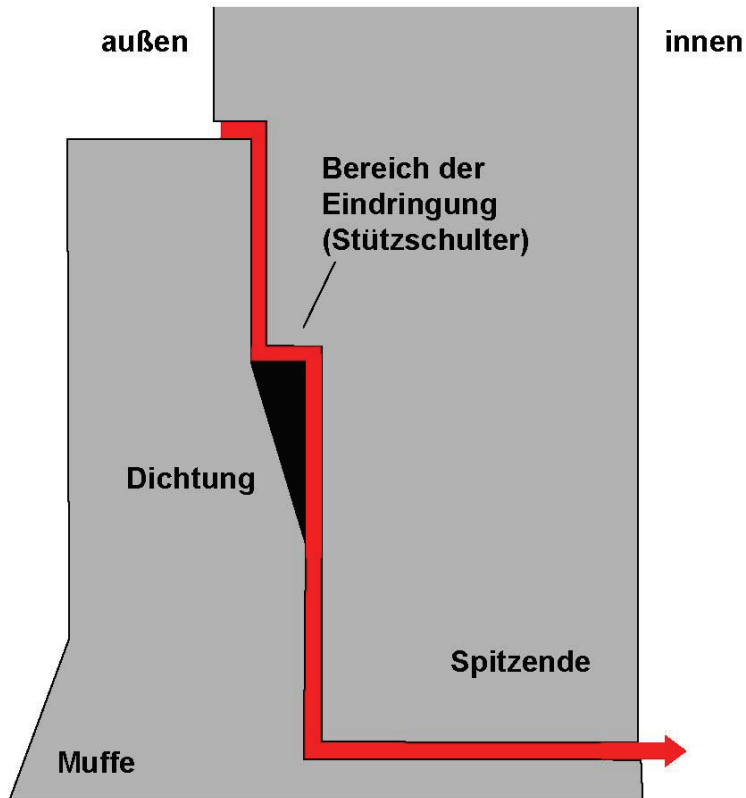


Abb. 77: Weg der Wurzel bei der Durchdringung der Dichtung (SBR, 10 %ige Verpressung)



Abb. 78: Durch eine SBR-Dichtung gedrückene Wurzel von *Ficus benjamina* (Innenseite der Rohrverbindung)



Abb. 79: Durch eine SBR-Dichtung gedrungene Wurzel von *Ficus benjamina* (Detail)



Abb. 80: Durch eine SBR-Dichtung gedrungene Wurzel von *Ficus benjamina* (Detail nach dem Entfernen der Dichtung)

3.4.2.2 Versuchsansatz mit Plattenstapeln

3.4.2.2.1 Pflanzenentwicklung

Die drei Pflanzenarten erzielten beim Versuchsansatz mit Plattenstapeln in den Gefäßen mit SBR-Dichtungen im Durchschnitt ein sehr ähnliches Wachstum wie in den Kontrollgefäßen mit Bitumenringen. Ein Einfluss des Dichtungsmaterials auf das Pflanzenwachstum war nicht festzustellen (Abb. 107 und 108 im Anhang).

Die zwischen den Platten eingebauten Dichtungsringe waren v. a. bei *Ficus benjamina* und *Ficus carica* von einem dichten Wurzelgeflecht umgeben (Abb. 81 und 82).



Abb. 81: An Dichtungsring 1 anliegende Wurzeln von *Ficus benjamina*



Abb. 82: An Dichtungsring 1 anliegende Wurzeln von *Ficus benjamina* (nach Entfernen des Rings)

3.4.2.2 Wurzeleindringungen und -durchdringungen

Bei den zwischen Betonplatten verlegten, unterschiedlich verpressten Dichtungsringen konnten nur wenige Eindringungen und keine Durchdringungen festgestellt werden. Wie in Abbildung 83 zusammengefasst dargestellt, begrenzten sich die Eindringungen auf die SBR-Dichtungen ohne Wurzelhemmstoff mit 10 bzw. 20 % Verpressung (Ring 4 und 5). Die Eindringungen wurden dabei ausschließlich von *Ficus benjamina* und *Ficus carica* bewirkt (Abb. 83 – 85).

Analog zu Wurzeleindringungen bei der Prüfung von Dachbahnen nach FLL (FORSCHUNGSGESELLSCHAFT LANDSCHAFTSENTWICKLUNG LANDSCHAFTSBAU E. V., 2008) werden die festgestellten Eindringungen als Beschädigung der Dichtungen bewertet, d.h. die SBR-Dichtungen ohne Wurzelhemmstoff mit 10 bzw. 20 % Verpressung haben sich bei der durchgeführten Untersuchung als nicht wurzelfest erwiesen.

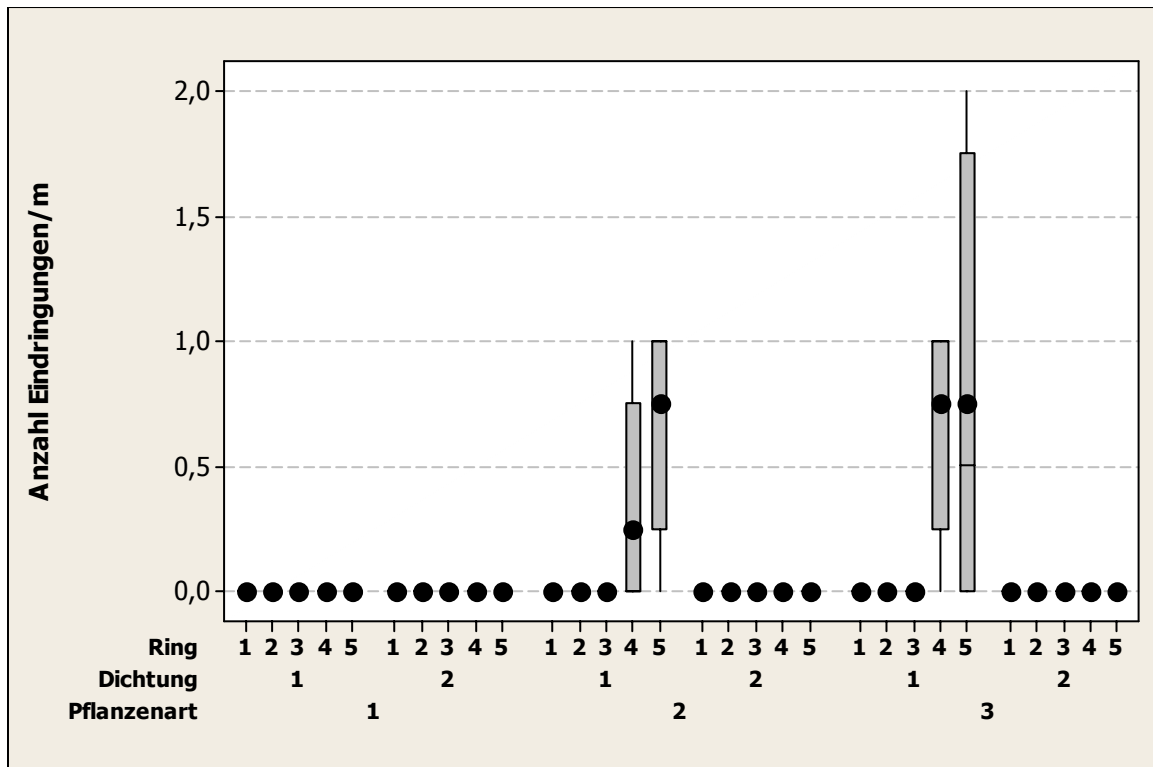


Abb. 83: Anzahl Wurzeleindringungen pro Meter Dichtungsring nach 24 Monaten (Endauswertung der Plattenstapel mit SBR-Dichtungen, n = 4)

Ring 1 = 35 %, 2 = 30 %, 3 = 25 %, 4 = 20 %, 5 = 10 % Verpressung

Dichtung 1 = SBR, 2 = SBR WS

Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*



Abb. 84: Wurzeleindringungen bei der SBR-Dichtung mit 10 %iger Verpressung (*Ficus carica*)



Abb. 85: Wurzeleindringungen bei der SBR-Dichtung mit 10 %iger Verpressung (*Ficus benjamina*)

4 Zusammenfassung und Ausblick

An der Forschungsanstalt für Gartenbau/FH Weihenstephan wurde ein von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördertes Forschungsprojekt bearbeitet mit dem Ziel, ein biomechanisches Verfahren zu entwickeln, das die Prüfung des Widerstands von Rohrverbindungen gegen Wurzeldurchdringungen erlaubt. In Zusammenarbeit mit der Theodor Cordes GmbH und Co.KG wurden hierzu von Dezember 2006 bis Dezember 2008 zwei Versuche durchgeführt.

Im ersten Versuchsansatz wurden Rohrverbindungen mit praxisüblich installierten Dichtungen in Gefäße eingebaut, um die Interaktion von Wurzeln und Dichtung unter realitätsnahen Bedingungen untersuchen zu können. Der Versuch umfasste die Prüfung von drei unterschiedlichen, z.T. mit einem Wurzelhemmstoff ausgerüsteten Dichtungsmaterialien auf Styrol-Butadien-Basis (SBR, SBR WS und SBR WS-CX), wobei der Anpressdruck der Rohrverbindungen in zwei Stufen (10 und 35 %) variiert wurde. Als Kontrollmaterial dienten zu Ringen geformte Teilstücke einer nicht wurzelfesten Bitumenschweißbahn (V 60 S4). Aufgrund der Geometrie der Rohrverbindung war die eingebaute Dichtung für Wurzeln nur über einen verwinkelten, schmalen Spalt zugänglich. Die potenzielle Kontaktzone von Wurzeln und Dichtung war mit rund 0,003 m²/Rohrverbindung sehr gering. Als Testpflanzen wurden drei wurzelaggressive Gehölzarten (*Pyracantha coccinea* (Feuerdorn), *Ficus benjamina* (Birkenfeige), *Ficus carica* var. *caprificus* (Ziegenfeige)) verwendet. Die Gefäße wurden in einem klimatisierten Gewächshaus (Heiztemperatur tags 18 °C, nachts 16 °C) aufgestellt, damit ein ganzjähriges Wachstum der Testpflanzen gewährleistet war.

Der zweite Versuchsansatz wich von den Praxisbedingungen ab, indem ringförmige Dichtungen lose als Zwischenlagen von übereinander gestapelten Betonplatten verlegt und in ein Gefäß eingebaut wurden. Dieses Modell ermöglichte die Prüfung des Widerstands der Dichtungsmaterialien gegen Ein- und Durchwurzeln bei einem fünffach abgestuften Anpressdruck (10, 20, 25 30 und 35 %) innerhalb eines Gefäßes. Die gesamte Kontaktfläche der Dichtungen zum Wurzelraum lag bei rund 0,2 m²/Gefäß. Mit Ausnahme der Versuchsgefäße sowie der Anordnung, Form und Art der Dichtungsringe waren alle anderen Versuchsparameter (Kontrollvariante, Testpflanzenarten, Standort etc.) mit dem ersten Ansatz identisch.

Die im halbjährlichen Turnus durchgeführten Zwischenauswertungen der Kontrollgefäße (Rohrverbindungen bzw. Plattenstapel mit Bitumenringen) zeigten, dass die Pflanzenarten bereits nach 6 Monaten einen hohen Wurzeldruck erzeugten, was zu ersten Penetrationen und Perforationen bei dem bituminösen Material führte. Im weiteren Verlauf der Untersuchung wurde eine deutliche Zunahme der Wurzeleindringungen und -durchdringungen bei den zwischen Betonplatten verlegten Bitumenringen festgestellt. Dabei wurden die meisten Penetrationen und Perforationen von *Ficus benjamina* verursacht. Bei den Rohrverbindungen wurde insgesamt nur eine geringe Anzahl Wurzeleindringungen und -durchdringungen beobachtet.

Bei der Auswertung der Gefäße mit Rohrverbindungen und SBR-Dichtungen nach zweijähriger Standzeit wurde eine Wurzeldurchdringung von *Ficus benjamina* festgestellt. Davon betroffen war eine um 10 % verpresste SBR-Dichtung ohne Wurzelhemmstoff. Darüber hinaus waren in der Stützsulter, d.h. im oberen Kontaktbereich von Dichtung und Spitze, der außerhalb der eigentlichen Verpressungszone liegt, zahlreiche Wurzeleindringungen erkennbar. Dabei zeigte die SBR-Dichtung ohne Wurzelhemmstoff sowohl bei geringer (10 %) wie auch bei hoher Verpressung (35 %) Wurzeleindringungen. Die beiden wurzelfest ausgerüsteten Dichtungen (SBR WS und SBR WS-CX) hingegen boten bei 35 % Verpressung sicheren Schutz gegen Wurzeleindringungen und wurden nur bei 10 % Verpressung in geringem Umfang penetriert.

Bei den zwischen Betonplatten verlegten, unterschiedlich verpressten Dichtungsringen konnten keine Wurzeldurchdringungen und nur wenige Eindringungen festgestellt werden. Die Eindringungen begrenzten sich auf die SBR-Dichtungen ohne Wurzelhemmstoff mit 10 bzw. 20 % Verpressung. Die Eindringungen wurden dabei ausschließlich von *Ficus benjamina* und *Ficus carica* bewirkt. Analog zu Wurzeleindringungen bei der Prüfung von Dachbahnen nach FLL wurden die festgestellten Eindringungen als Beschädigung der Dichtungen bewertet, d.h. die SBR-Dichtungen ohne Wurzelhemmstoff mit 10 bzw. 20 % Verpressung haben sich bei der durchgeführten Untersuchung als nicht wurzelfest erwiesen.

Um Wurzeleindringungen bei der Auswertung der SBR-Dichtungen in den Rohrverbindungen erfassen zu können, war eine Trennung von Muffe und Spitze erforderlich. Dies ließ sich - aufgrund der über die verpressten Dichtungen fest verbundenen Spitzen und Muffen - nur durch Zertrümmern der Muffen bewerkstelligen.

Beim Versuchsansatz mit SBR-Dichtungen zwischen gestapelten Betonplatten hingegen konnten die Platten bei der Auswertung lagenweise zerstörungsfrei entfernt werden (und können somit weiterhin verwendet werden). Da zudem die gesamte Kontaktfläche der Dichtungsringe zum Wurzelraum bei den Plattenstapeln weitaus größer war als bei den Rohrverbindungen, erscheint ein derartiger Versuchsaufbau wesentlich zweckdienlicher zur Prüfung des Durchwurzelungswiderstands von Kanalrohrdichtungen.

Bei beiden Versuchsansätzen erwiesen sich stark verpresste, hochwertige Dichtungen stets als wurzelfest - wie dies auch für die Praxis angenommen werden kann. Es erscheint daher sinnvoll, ein derartiges Verfahren vornehmlich zur Prüfung von Dichtungsmaterialien unter schadensträchtigen Bedingungen anzuwenden, wie sie sich häufig in der Praxis aufgrund eines verminderten Anpressdrucks einstellen (z.B. bedingt durch nachträgliche Setzungen der Rohrleitungen, Verlegefehler, Dichtungsmaterialien mit mangelhaften physikalischen Eigenschaften, Alterung der Dichtungsmaterialien). Zudem sollte auf Basis der erzielten Untersuchungsergebnisse in weiteren Forschungsarbeiten die Versuchsanstellung im Hinblick auf eine Vergrößerung der Kontaktfläche zwischen Dichtungsmaterial und Wurzelraum optimiert werden. Zur Verminderung des Aufwands an Heizenergie wäre ferner die Eignung weiterer Pflanzen zu prüfen, die auch bei niedrigen Temperaturen eine hohe Wurzelaggressivität aufweisen.

5 Literatur

- BERGER, C.; LOHAUS, J., 2004: Zustand der Kanalisation in Deutschland - Ergebnisse der DWA-Umfrage 2004, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft (DWA) Bundesgeschäftsstelle, Hennef.
- DIN EN 1916, 2002: Rohre und Formstücke aus Beton, Stahlfaserbeton und Stahlbeton, Ausgabe 4/2002.
- DIN V 1201, 2004: Rohre und Formstücke aus Beton, Stahlfaserbeton und Stahlbeton für Abwasserleitungen und -kanäle - Typ 1 und Typ 2 - Anforderungen, Prüfung und Bewertung der Konformität, Vornorm, Ausgabe 8/2004
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT LANDSCHAFTSENTWICKLUNG LANDSCHAFTS-BAU E. V. (FLL), 2008: Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen.
- FORSCHUNGSANSTALT FÜR GARTENBAU WEIHENSTEPHAN: Forschungsarbeiten zur Entwicklung eines FLL-Verfahrens zur Untersuchung der Wurzelfestigkeit von Bahnen und Beschichtungen für Dachbegrünungen mit 2-jähriger Dauer (unveröffentlicht).
- HEIDGER, C.; KRÜCKEN, R., 2005: Baumstandorte und unterirdische Ver- und Entsorgungsanlagen, Neue Landschaft und Stadt+Grün (Supplement), Patzer Verlag Berlin, S. 9-15, 2/2005.
- STÜTZEL, T.; BOSSELER, B., 2004: Wurzeleinwuchs in Abwasserleitungen und Kanäle, Ruhr-Universität Bochum; Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen.
- VERBAND DEUTSCHER LANDWIRTSCHAFTLICHER UNTERSUCHUNGS- UND FORSCHUNGSANSTALTEN (VDLUFA), 2007: Methodenbuch Band 1, A 10.2.1, Nachweis von pflanzenschädigenden Stoffen in Böden, gärtnerischen Substraten und Komposten, VDLUFA-Verlag, Darmstadt.

6 Anhang

6.1 Messdaten zu den Rohrverbindungen

MESSLISTE Nr. 2		ROHRVERBINDUNGEN MIT SPITZENDDICHTUNGEN				a)			
BAUSTELLE / BETONWERK		Freising		DATUM:		29.11.2006			
NENNWEITE DER ROHRE DN		300		DICHTRINGHÖHE h _j		12,5			
Messabstand Muffenende l _m		40		Messabstand vom Spitzende l _s		46,00			
Soll Muffenspalt		10,00	+/-1,6	Stützkantenhöhe					
Muffe		Sollmaß der Muffe d _{so} =		Sollmaß der Spitze d _{sp} =		405			
Rohr-		MESSERGEBNISSE MUFFE		MESSERGEBNISSE SPITZE		Rohr-			
Numm.		Messung in der Achse: (0°, 45°, 90°, 135°)		Messung in der Achse: (0°, 45°, 90°, 135°)		Numm.			
		1	2	3	4	1	2	3	4
3	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	405,0	405,0	404,0	404,0
4	425,0	425,0	425,5	425,0	425,0	406,0	405,0	404,0	404,5
5	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	404,0	405,0	404,0	404,0
6	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	405,0	405,0	404,0	404,0
7	425,0	425,5	425,0	425,0	425,0	405,0	405,0	405,0	404,5
8	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	405,0	404,5	403,0	404,0
9	425,0	425,5	425,0	424,5	424,5	405,0	405,0	404,0	405,0
12	425,5	425,0	425,0	425,0	425,0	405,0	405,0	403,5	405,0
14	425,5	425,5	426,0	425,0	425,0	404,5	405,0	405,0	405,0
15	424,5	425,0	425,5	425,0	425,0	405,0	405,0	404,0	404,0
16	424,0	425,0	425,5	424,5	424,5	405,0	404,0	404,0	404,0
17	425,0	425,0	425,0	424,5	424,5	405,0	404,5	404,0	404,0
18	424,5	425,0	425,0	425,0	425,0	405,0	405,0	404,0	404,0

20	424,5	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	405,0	404,0	404,0	404,0	20
24	424,5	424,5	426,0	425,0	425,0	425,0	425,0	405,0	405,0	404,0	405,0	24
26	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	405,0	405,0	405,0	404,0	26
27	425,0	425,5	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	404,5	405,0	404,5	404,0	27
28	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	405,0	405,0	403,5	405,0	28
31	424,5	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	405,0	404,0	403,0	404,0	31
32	424,5	425,5	425,0	425,0	424,5	425,0	425,0	405,0	405,0	405,0	404,0	32
34	425,0	425,0	426,0	425,0	425,0	425,0	425,0	404,0	405,5	405,0	404,0	34
35	425,5	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	406,0	406,0	404,0	404,5	35
40	424,5	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	405,0	405,0	404,0	405,0	40
43	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	405,5	405,0	404,0	405,0	43
45	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	405,0	404,0	404,0	404,0	45
49	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	405,0	405,0	404,0	404,0	49
52	424,5	425,0	425,5	425,0	425,0	425,0	425,0	405,5	405,0	404,0	404,5	52
53	424,5	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	406,5	405,5	403,0	405,0	53
56	424,5	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	405,0	405,0	403,0	404,0	56
57	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	405,5	405,0	404,0	405,0	57
58	425,0	425,0	425,0	425,0	424,5	425,0	424,5	405,0	405,0	404,0	405,0	58
59	424,5	425,0	425,0	425,0	424,5	424,5	424,5	405,0	405,0	404,0	404,0	59
60	424,5	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	404,5	405,0	405,0	404,0	60
62	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	405,0	405,0	404,0	405,0	62
64	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	404,0	405,0	403,0	404,0	64
68	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	405,0	404,0	404,0	405,0	68

RESULTATE AUS DEN MESSERGEBNISSEN FÜR DIE MUFFE in mm			
Min. Wert=	424,0	Mittelwert	425,0
			Max. Wert= 426,0
RESULTATE AUS DEN MESSERGEBNISSEN FÜR DIE SPITZE in mm			
Max. Wert=	406,5	Mittelwert	404,6
			Min. Wert= 403,0
ZUGEHÖRIGER MUFFENSPALT w in mm GEMESSEN			
$w_{\min.} =$	8,75	$w_{\text{mittel}} =$	10,21
			$w_{\max.} =$ 11,50
Sollspalt	8,40		10,00
VERFORMUNG DER DICHTUNG in %			
$\delta_{\max} =$	25,75	$\delta_{\text{mittel}} =$	13,39
			$\delta_{\min.} =$ 2,42
VORDEHNUNG ε %	12,5	Reduzierte Höhe Dichtung h_m	11,79
Schnittl. geliefert	1.165	Schnittlänge Dicht. gerechnet	1.165

c)

w min	w max	$\delta_{\max} =$	$\delta_{\min} =$	$\delta_{\text{mittel}} =$	Dichtung	Dichtung	Dichtung	Paarungen
10,0	10,5	15,15	10,90	13,03	SBR 12,5 1	SBR-WS 12,5 1	SBR WS-CX12,5	12,5-er Schnur 3-5-6
9,5	10,8	19,39	8,78	14,09	1			4-16-35
10,0	10,5	15,15	10,90	13,03		1	1	3-5-6
10,0	10,5	15,15	10,90	13,03			1	3-5-6
10,0	10,5	15,15	10,90	13,03	1			7-26-45
10,0	11,0	15,15	6,66	10,90	1			8-12-64
9,8	10,8	17,27	8,78	13,03	1			9-15-32
10,0	11,0	15,15	6,66	10,90		1		8-12-64
10,0	10,8	15,15	8,78	11,97	1			14-27-28
9,8	10,8	17,27	8,78	13,03		1		9-15-32
9,5	10,8	19,39	8,78	14,09		1		4-16-35
9,8	10,5	17,27	10,90	14,09	1			17-18-20
9,8	10,5	17,27	10,90	14,09		1		17-18-20
9,8	10,5	17,27	10,90	14,09			1	17-18-20
9,8	11,0	17,27	6,66	11,97	1			24-31-34
10,0	10,5	15,15	10,90	13,03		1		7-26-45
10,0	10,8	15,15	8,78	11,97		1		14-27-28
10,0	10,8	15,15	8,78	11,97			1	14-27-28
9,8	11,0	17,27	6,66	11,97			1	24-31-34
9,8	10,8	17,27	8,78	13,03			1	9-15-32
9,8	11,0	17,27	6,66	11,97			1	24-31-34

9,5	10,8	19,39	8,78	14,09				1	4-16-35
9,8	10,5	17,27	10,90	14,09	1				40-43-57
9,8	10,5	17,27	10,90	14,09		1			40-43-57
10,0	10,5	15,15	10,90	13,03				1	7-26-45
10,0	10,5	15,15	10,90	13,03	1				49-62-68
9,5	10,8	19,39	8,78	14,09	1				52-53-56
9,0	11,0	23,63	6,66	15,15		1			52-53-56
9,8	11,0	17,27	6,66	11,97				1	52-53-56
9,8	10,5	17,27	10,90	14,09				1	40-43-57
9,8	10,5	17,27	10,90	14,09	1				58-59-60
9,8	10,5	17,27	10,90	14,09		1			58-59-60
9,8	10,5	17,27	10,90	14,09				1	58-59-60
10,0	10,5	15,15	10,90	13,03		1			49-62-68
10,0	11,0	15,15	6,66	10,90				1	8-12-64
10,0	10,5	15,15	10,90	13,03				1	49-62-68
0,0	0,0	100,00	100,00	100,00	12		12	12	
0,0	0,0	100,00	100,00	100,00				36	
0,0	0,0	100,00	100,00	100,00					
9,81	10,68	16,80	9,37			0		0	
	10,24		13,08					0	

MESSLISTE Nr. 2		ROHRVERBINDUNGEN MIT SPITZENDDICHTUNGEN				a)
BAUSTELLE / BETONWERK		Freising		DATUM: 29.11.2006		
NENNWEITE DER ROHRE DN		300		DICHTRINGHÖHE h_j		17
Messabstand Muffenende l_m		40		Messabstand vom Spitzende l_s		46,00
Soll Muffenspalt		10,00		+/-1,6		Stützkantenhöhe
Muffe		Sollmaß der Muffe $d_{so} =$		425		Sollmaß der Spitze $d_{sp} =$
Rohr-		MESSERGEBNISSE MUFFE		MESSERGEBNISSE SPITZE		Spitze
Numm.		Messung in der Achse: (0°, 45°, 90°, 135°)		Messung in der Achse: (0°, 45°, 90°, 135°)		Rohr- Numm.
		1	2	3	4	1
1		425,0	425,0	425,0	425,0	405,0
2		425,0	425,0	425,0	425,0	405,0
10		425,0	425,0	425,0	425,0	404,0
11		424,5	425,0	425,0	425,0	404,5
13		425,0	425,0	425,0	425,0	405,0
19		425,0	425,0	425,0	425,0	405,0
21		424,5	425,0	425,0	424,5	406,0
22		424,5	425,0	425,0	425,0	405,5
23		424,5	425,0	425,0	425,0	406,0
25		424,5	425,0	425,0	425,0	406,0
29		424,0	425,0	425,5	425,0	405,0
30		425,0	425,0	425,0	425,0	405,0
33		425,0	425,0	425,0	425,5	405,0

36	424,0	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	405,0	404,5	404,0	405,0	36
37	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	405,5	405,5	405,0	405,0	37
38	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	405,0	405,5	404,5	405,0	38
39	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	405,0	405,5	405,0	405,0	39
42	425,0	424,0	425,0	425,0	424,5	424,5	405,0	405,0	405,0	404,5	42
44	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	406,5	406,0	405,0	405,0	44
46	425,0	425,0	425,5	425,0	425,0	425,0	406,0	405,0	404,0	405,0	46
47	425,0	425,0	425,0	425,0	424,5	424,5	405,0	406,0	404,0	405,0	47
48	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	405,0	405,0	405,0	405,0	48
50	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	405,0	406,0	404,0	404,0	50
51	424,5	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	405,0	405,0	405,0	405,0	51
54	424,5	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	406,0	406,0	404,0	406,0	54
55	424,5	425,0	425,0	425,0	424,5	424,5	406,0	406,0	405,0	404,5	55
61	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	406,0	405,0	404,0	405,0	61
63	424,5	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	406,0	406,0	405,0	406,0	63
66	424,5	425,0	425,5	425,0	425,0	425,0	405,5	405,0	405,0	405,0	66
67	424,5	425,0	425,0	425,0	424,5	424,5	406,0	405,0	404,5	406,0	67
70	424,5	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	406,0	406,0	404,0	405,0	70
71	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	406,0	405,0	404,5	406,0	71
73	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	405,0	406,0	405,0	405,0	73
75	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	406,0	405,0	405,0	405,0	75
76	424,5	425,0	425,5	425,0	425,0	425,0	406,0	405,0	405,0	404,5	76
78	424,5	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	405,0	406,0	405,0	405,0	78

RESULTATE AUS DEN MESSERGEBNISSEN FÜR DIE MUFFE in mm			
Min.Wert=	424,0	Mittelwert	424,9 Max.Wert= 425,5
RESULTATE AUS DEN MESSERGEBNISSEN FÜR DIE SPITZE in mm			
Max.Wert=	406,5	Mittelwert	405,1 Min.Wert= 404,0
ZUGEHÖRIGER MUFFENSPALT w in mm GEMESSEN			
$w_{\min.} =$	8,75	$w_{\text{mittel}} =$	9,91 $w_{\max.} =$ 10,75
Sollspalt	8,40		10,00 11,60
VERFORMUNG DER DICHTUNG in %			
$\delta_{\max} =$	45,67 <input type="checkbox"/>	$\delta_{\text{mittel}} =$	38,44 $\delta_{\min.} =$ 33,26
VORDEHNUNG ε %	11,4	Reduzierte Höhe Dichtung h_m	16,11
Schnittl. geliefert	1.190	Schnittlänge Dicht. gerech- net	1.190

c)

w min	w max	$\delta_{\max} =$	$\delta_{\min} =$	$\delta_{\text{mittel}} =$	Dichtung	Dichtung	Dichtung	Paarungen
10,0	10,0	37,91	37,91	37,91	SBR 17	SBR-WS 17	SBR WS-CX17	17-er Schnur
9,8	10,3	39,47	36,36	37,91	1			1-30-48
9,5	10,5	41,02	34,81	37,91	1			2-11-38
9,8	10,3	39,47	36,36	37,91		1		10-19-25
9,5	10,0	41,02	37,91	39,47	1			2-11-38
9,5	10,5	41,02	34,81	37,91		1		13-73-75
9,3	10,5	42,57	34,81	38,69	1			10-19-25
9,3	10,5	42,57	34,81	38,69		1		21-22-23
9,3	10,5	42,57	34,81	38,69			1	21-22-23
9,5	10,5	41,02	34,81	37,91			1	10-19-25
9,5	10,5	41,02	34,81	37,91	1			29-33-36
10,0	10,0	37,91	37,91	37,91		1		1-30-48
9,5	10,5	41,02	34,81	37,91		1		29-33-36
9,5	10,5	41,02	34,81	37,91			1	29-33-36
9,8	10,0	39,47	37,91	38,69	1			37-39-51
9,8	10,3	39,47	36,36	37,91			1	2-11-38
9,8	10,0	39,47	37,91	38,69		1		37-39-51
9,5	10,3	41,02	36,36	38,69	1			42-47-50
9,3	10,0	42,57	37,91	40,24	1			44-63-78
9,5	10,8	41,02	33,26	37,14	1			46-66-71

9,3	10,5	42,57	34,81	38,69		1		42-47-50
10,0	10,0	37,91	37,91	37,91			1	1-30-48
9,5	10,5	41,02	34,81	37,91			1	42-47-50
9,8	10,0	39,47	37,91	38,69			1	37-39-51
9,3	10,5	42,57	34,81	38,69	1			54-70-76
9,3	10,3	42,57	36,36	39,47	1			55-61-67
9,5	10,5	41,02	34,81	37,91		1		55-61-67
9,3	10,0	42,57	37,91	40,24		1		44-63-78
9,5	10,3	41,02	36,36	38,69		1		46-66-71
9,3	10,3	42,57	36,36	39,47			1	55-61-67
9,3	10,5	42,57	34,81	38,69		1		54-70-76
9,5	10,3	41,02	36,36	38,69			1	46-66-71
9,5	10,0	41,02	37,91	39,47		1		13-73-75
9,5	10,0	41,02	37,91	39,47			1	13-73-75
9,3	10,5	42,57	34,81	38,69			1	54-70-76
9,3	10,0	42,57	37,91	40,24			1	44-63-78
0,0	0,0	100,00	100,00	100,00				
0,0	0,0	100,00	100,00	100,00				
0,0	0,0	100,00	100,00	100,00				
9,50	10,28	41,02	36,15		12		12	
	9,89		38,58				36	

NENNWEITE DER ROHRE		DN		300	SL=	1.190	mm	
10,0 +/- 1,6 mm		8,4 - 11,6 mm						
Sollspalt:		=		8,4 - 11,6 mm				
Vordehnung in %		11,4		Dichtringhöhe hj:		17		
Sollmaß Muffe d_{so} (d₂):		425,0		Sollmaß Spitze d_{sp} (d₃):				405,0
Verpressungen in Kombination Muffe zu Spitze (25 - 50 % i.O.!)								

Muffe	401	401,5	402	402,5	403	403,5	404	404,5	405	Spitzende	406	406,5	407	407,5	408
422,0	34,8	36,4	37,9	39,5	41,0	42,6	44,1	45,7	47,2	48,8	50,3	51,9	53,4	55,0	56,5
422,5	33,3	34,8	36,4	37,9	39,5	41,0	42,6	44,1	45,7	47,2	48,8	50,3	51,9	53,4	55,0
423,0	31,7	33,3	34,8	36,4	37,9	39,5	41,0	42,6	44,1	45,7	47,2	48,8	50,3	51,9	53,4
424,0	28,6	30,2	31,7	33,3	34,8	36,4	37,9	39,5	41,0	42,6	44,1	45,7	47,2	48,8	50,3
424,5	27,0	28,6	30,2	31,7	33,3	34,8	36,4	37,9	39,5	41,0	42,6	44,1	45,7	47,2	48,8
425,0	25,5	27,0	28,6	30,2	31,7	33,3	34,8	36,4	37,9	39,5	41,0	42,6	44,1	45,7	47,2
425,5	23,9	25,5	27,0	28,6	30,2	31,7	33,3	34,8	36,4	37,9	39,5	41,0	42,6	44,1	45,7
426,0	22,4	23,9	25,5	27,0	28,6	30,2	31,7	33,3	34,8	36,4	37,9	39,5	41,0	42,6	44,1
426,5	20,8	22,4	23,9	25,5	27,0	28,6	30,2	31,7	33,3	34,8	36,4	37,9	39,5	41,0	42,6
427,0	19,3	20,8	22,4	23,9	25,5	27,0	28,6	30,2	31,7	33,3	34,8	36,4	37,9	39,5	41,0
427,5	17,7	19,3	20,8	22,4	23,9	25,5	27,0	28,6	30,2	31,7	33,3	34,8	36,4	37,9	39,5
428,0	16,2	17,7	19,3	20,8	22,4	23,9	25,5	27,0	28,6	30,2	31,7	33,3	34,8	36,4	37,9
428,5	14,6	16,2	17,7	19,3	20,8	22,4	23,9	25,5	27,0	28,6	30,2	31,7	33,3	34,8	36,4
429,0	13,1	14,6	16,2	17,7	19,3	20,8	22,4	23,9	25,5	27,0	28,6	30,2	31,7	33,3	34,8

Spaltweiten (von 8,4 - 11,6 mm i.O.!)

Muffe	401	401,5	402	402,5	403	403,5	404	404,5	405	405,5	406	406,5	407	407,5	408
422,0	10,5	10,3	10,0	9,8	9,5	9,3	9,0	8,8	8,5	8,3	8,0	7,8	7,5	7,3	7,0
422,5	10,8	10,5	10,3	10,0	9,8	9,5	9,3	9,0	8,8	8,5	8,3	8,0	7,8	7,5	7,3
423,0	11,0	10,8	10,5	10,3	10,0	9,8	9,5	9,3	9,0	8,8	8,5	8,3	8,0	7,8	7,5
424,0	11,5	11,3	11,0	10,8	10,5	10,3	10,0	9,8	9,5	9,3	9,0	8,8	8,5	8,3	8,0
424,5	11,8	11,5	11,3	11,0	10,8	10,5	10,3	10,0	9,8	9,5	9,3	9,0	8,8	8,5	8,3
425,0	12,0	11,8	11,5	11,3	11,0	10,8	10,5	10,3	10,0	9,8	9,5	9,3	9,0	8,8	8,5
425,5	12,3	12,0	11,8	11,5	11,3	11,0	10,8	10,5	10,3	10,0	9,8	9,5	9,3	9,0	8,8
426,0	12,5	12,3	12,0	11,8	11,5	11,3	11,0	10,8	10,5	10,3	10,0	9,8	9,5	9,3	9,0
426,5	12,8	12,5	12,3	12,0	11,8	11,5	11,3	11,0	10,8	10,5	10,3	10,0	9,8	9,5	9,3
427,0	13,0	12,8	12,5	12,3	12,0	11,8	11,5	11,3	11,0	10,8	10,5	10,3	10,0	9,8	9,5
427,5	13,3	13,0	12,8	12,5	12,3	12,0	11,8	11,5	11,3	11,0	10,8	10,5	10,3	10,0	9,8
428,0	13,5	13,3	13,0	12,8	12,5	12,3	12,0	11,8	11,5	11,3	11,0	10,8	10,5	10,3	10,0
428,5	13,8	13,5	13,3	13,0	12,8	12,5	12,3	12,0	11,8	11,5	11,3	11,0	10,8	10,5	10,3
429,0	14,0	13,8	13,5	13,3	13,0	12,8	12,5	12,3	12,0	11,8	11,5	11,3	11,0	10,8	10,5

NENNWEITE DER ROHRE				DN		300		SL=		1.165	
Sollspalt:		10,0 +/- 1,6 mm		8,4 - 11,6 mm							
Vordehnung in %				12,5		Dichtringhöhe hj:		12,5			
Sollmaß Muffe d_{so} (d₂):				425,0		Sollmaß Spitze d_{sp} (d₃):				405,0	
Sollverpressungen in Kombination Muffe zu Spitze von ca. 10%											

Muffe	401	401,5	402	402,5	403	403,5	404	404,5	405	405,5	406	406,5	407	407,5	408
422,5	6,5	8,0	9,6	11,1	12,7	14,3	15,8	17,4	18,9	20,5	22,1	23,6	25,2	26,7	28,3
423,0	4,9	6,5	8,0	9,6	11,1	12,7	14,3	15,8	17,4	18,9	20,5	22,1	23,6	25,2	26,7
423,5	3,3	4,9	6,5	8,0	9,6	11,1	12,7	14,3	15,8	17,4	18,9	20,5	22,1	23,6	25,2
424,0	1,8	3,3	4,9	6,5	8,0	9,6	11,1	12,7	14,3	15,8	17,4	18,9	20,5	22,1	23,6
424,5	0,2	1,8	3,3	4,9	6,5	8,0	9,6	11,1	12,7	14,3	15,8	17,4	18,9	20,5	22,1
425,0	-1,3	0,2	1,8	3,3	4,9	6,5	8,0	9,6	11,1	12,7	14,3	15,8	17,4	18,9	20,5
425,5	-2,9	-1,3	0,2	1,8	3,3	4,9	6,5	8,0	9,6	11,1	12,7	14,3	15,8	17,4	18,9
426,0	-4,5	-2,9	-1,3	0,2	1,8	3,3	4,9	6,5	8,0	9,6	11,1	12,7	14,3	15,8	17,4
426,5	-6,0	-4,5	-2,9	-1,3	0,2	1,8	3,3	4,9	6,5	8,0	9,6	11,1	12,7	14,3	15,8
427,0	-7,6	-6,0	-4,5	-2,9	-1,3	0,2	1,8	3,3	4,9	6,5	8,0	9,6	11,1	12,7	14,3
427,5	-9,1	-7,6	-6,0	-4,5	-2,9	-1,3	0,2	1,8	3,3	4,9	6,5	8,0	9,6	11,1	12,7
428,0	-10,7	-9,1	-7,6	-6,0	-4,5	-2,9	-1,3	0,2	1,8	3,3	4,9	6,5	8,0	9,6	11,1

Spaltweiten

Muffe	401	401,5	402	402,5	403	403,5	404	404,5	405	405,5	406	406,5	407	407,5	408
422,0	10,5	10,3	10,0	9,8	9,5	9,3	9,0	8,8	8,5	8,3	8,0	7,8	7,5	7,3	7,0
422,5	10,8	10,5	10,3	10,0	9,8	9,5	9,3	9,0	8,8	8,5	8,3	8,0	7,8	7,5	7,3
423,0	11,0	10,8	10,5	10,3	10,0	9,8	9,5	9,3	9,0	8,8	8,5	8,3	8,0	7,8	7,5
424,0	11,5	11,3	11,0	10,8	10,5	10,3	10,0	9,8	9,5	9,3	9,0	8,8	8,5	8,3	8,0
424,5	11,8	11,5	11,3	11,0	10,8	10,5	10,3	10,0	9,8	9,5	9,3	9,0	8,8	8,5	8,3
425,0	12,0	11,8	11,5	11,3	11,0	10,8	10,5	10,3	10,0	9,8	9,5	9,3	9,0	8,8	8,5
425,5	12,3	12,0	11,8	11,5	11,3	11,0	10,8	10,5	10,3	10,0	9,8	9,5	9,3	9,0	8,8
426,0	12,5	12,3	12,0	11,8	11,5	11,3	11,0	10,8	10,5	10,3	10,0	9,8	9,5	9,3	9,0
426,5	12,8	12,5	12,3	12,0	11,8	11,5	11,3	11,0	10,8	10,5	10,3	10,0	9,8	9,5	9,3
427,0	13,0	12,8	12,5	12,3	12,0	11,8	11,5	11,3	11,0	10,8	10,5	10,3	10,0	9,8	9,5
427,5	13,3	13,0	12,8	12,5	12,3	12,0	11,8	11,5	11,3	11,0	10,8	10,5	10,3	10,0	9,8
428,0	13,5	13,3	13,0	12,8	12,5	12,3	12,0	11,8	11,5	11,3	11,0	10,8	10,5	10,3	10,0

6.2 Angaben zu den Substrateigenschaften

Tab. 10: Analysenwerte des verwendeten Substrats zu Versuchsbeginn

	pH (CaCl ₂) ---	Salz (H ₂ O) g/l	N (CaCl ₂) mg/l	P₂O₅ (CAL) mg/l	K₂O (CAL) mg/l
Analysenwert	6,6	0,69	6	17	30

Tab. 11. Ergebnisse des Keimpflanzentests mit Chinakohl nach VDLUFA
(Mittelwerte aus 4 Wiederholungen)

Substrat	Anzahl Pflanzen/Topf	Frischgewicht/Topf (g)
im Versuch verwendetes Substrat (70 Vol.-% Torf und 30 Vol.-% Perlite)	23,3	41,9
Kontrolle (Einheitserde P)	23,5	37,0

6.3 Erläuterungen zum Boxplot

Die für die Darstellung der statistisch aufbereiteten Daten verwendeten Boxplots bestehen in der Regel aus einem Rechteck (Box), welches den Interquartilbereich, begrenzt durch das Untere und Obere Quartil, anzeigt. Der Boxplot wird ergänzt durch zwei Linien, die die Box verlängern und das Minimum bzw. Maximum der Datenwerte angeben. Die Elemente innerhalb des Rechtecks (Querstrich bzw. Punkt) bezeichnen den Median bzw. den Mittelwert (Abb. 86, Tab. 12).

In besonderen Fällen erscheint das Boxplot nicht vollständig, da Kennwerte (z.B. Maximum und Oberes Quartil oder Minimum und Unteres Quartil) dieselben Datenwerte aufweisen können und sich daher in der Darstellung überlagern.

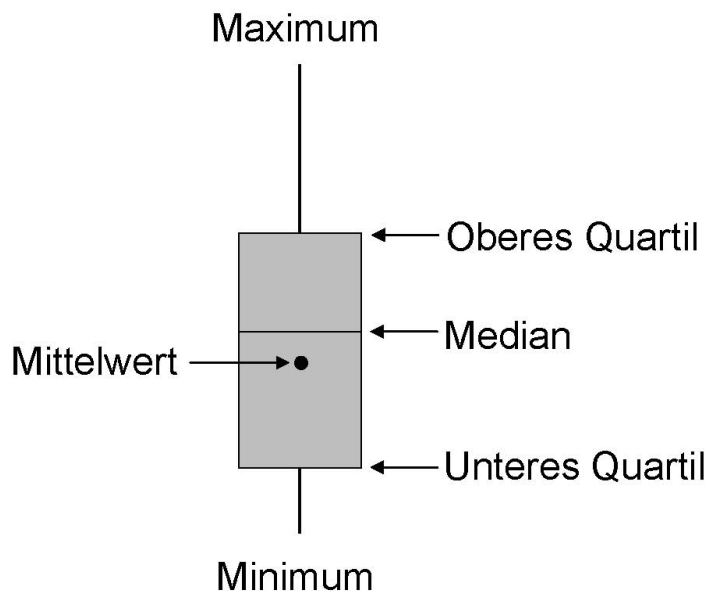


Abb. 86: Erläuterung zur Darstellung statistisch aufbereiteter Daten in Form eines Boxplots.

Tab. 12: Erläuterung der im Boxplot dargestellten Kennwerte

Kennwert	Beschreibung	Lage im Boxplot
Minimum	Kleinsten Datenwert des Datensatzes	unteres Ende der Linie
Unteres Quartil	25 % der Datenwerte sind kleiner oder gleich diesem Kennwert	unteres Ende der Box
Median	50 % der Datenwerte sind kleiner oder gleich diesem Kennwert	Querstrich innerhalb der Box
Mittelwert	arithmetisches Mittel der Datenwerte	Punkt innerhalb der Box
Oberes Quartil	75 % der Datenwerte sind kleiner oder gleich diesem Kennwert	oberes Ende der Box
Maximum	Größter Datenwert des Datensatzes	oberes Ende der Linie

6.4 Angaben zum Pflanzenwachstum

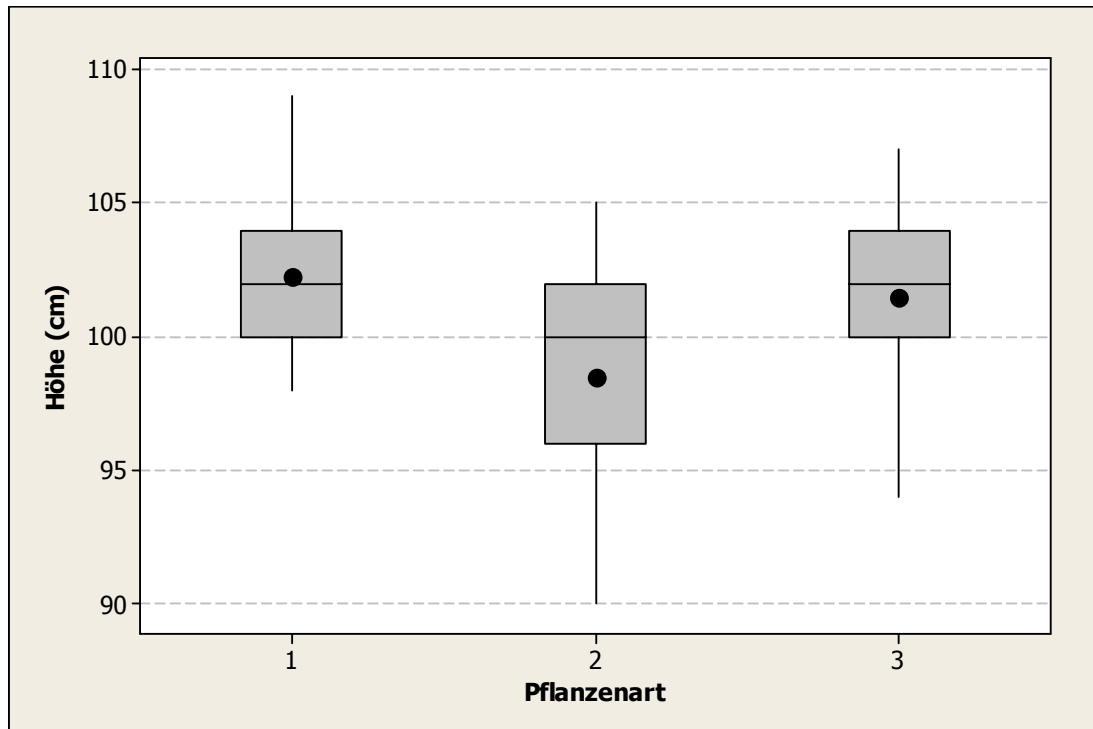


Abb. 87: Höhe der Pflanzen zu Versuchsbeginn (n = 256)
 Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*

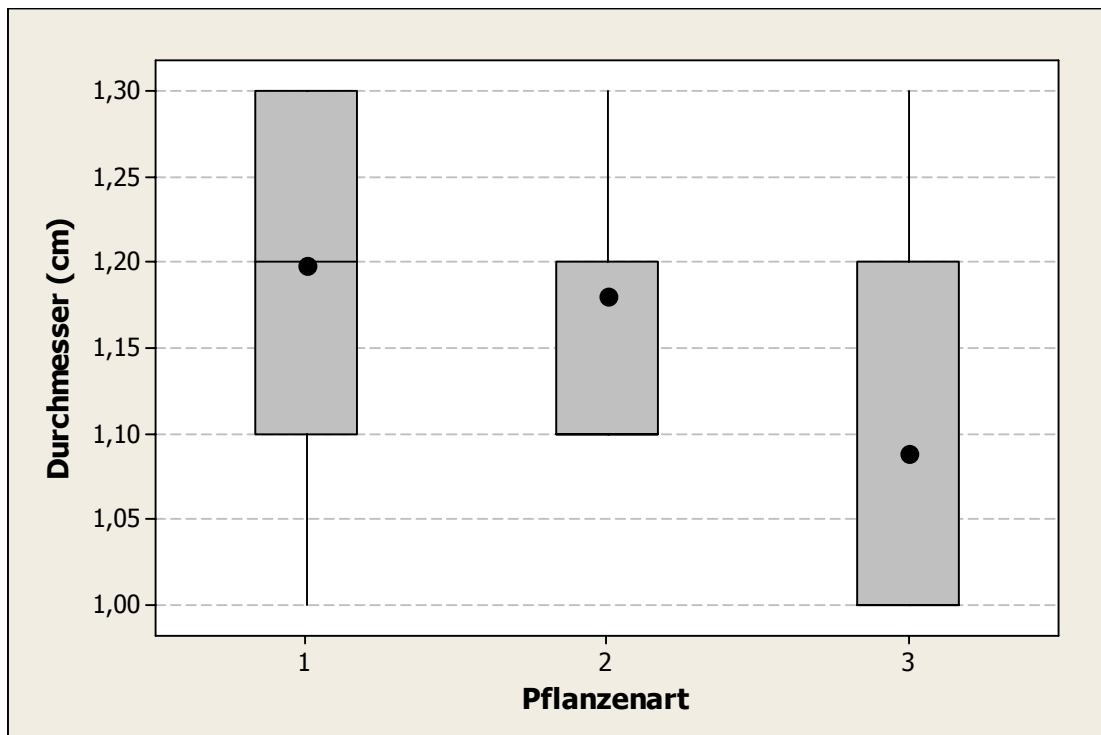


Abb. 88: Durchmesser der Pflanzen zu Versuchsbeginn (n = 256)
 Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*

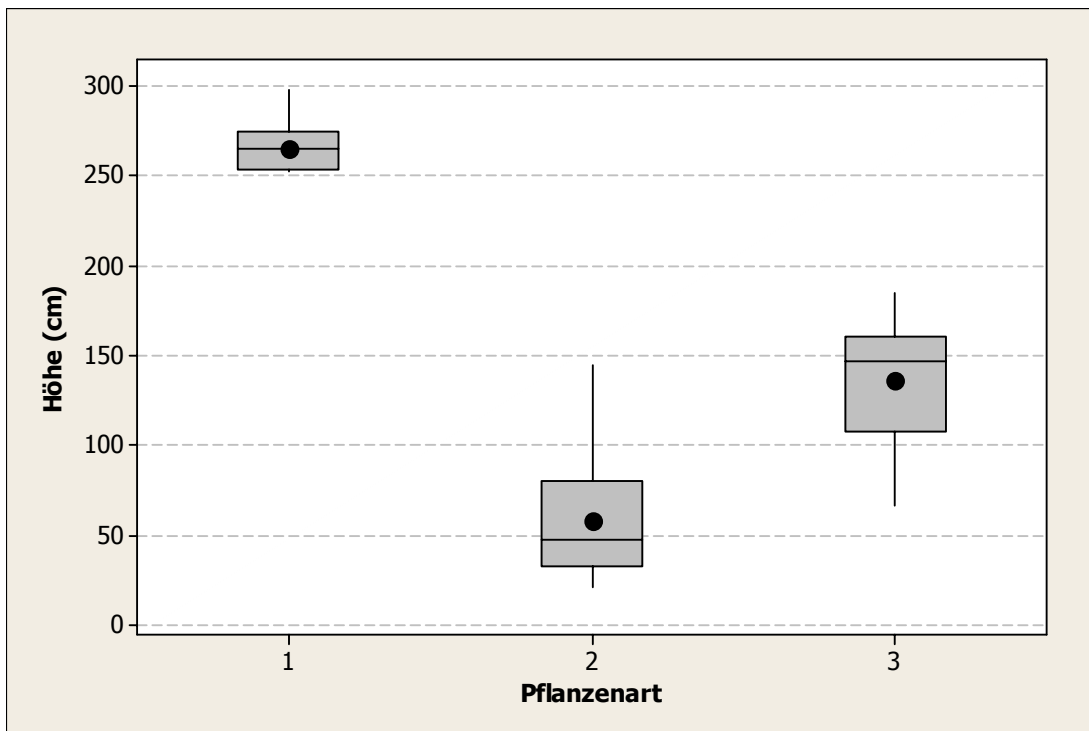


Abb. 89: Höhe der Pflanzen bei der ersten Zwischenauswertung der Rohrabschnitte mit Bitumenringen (n = 16)
 Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*

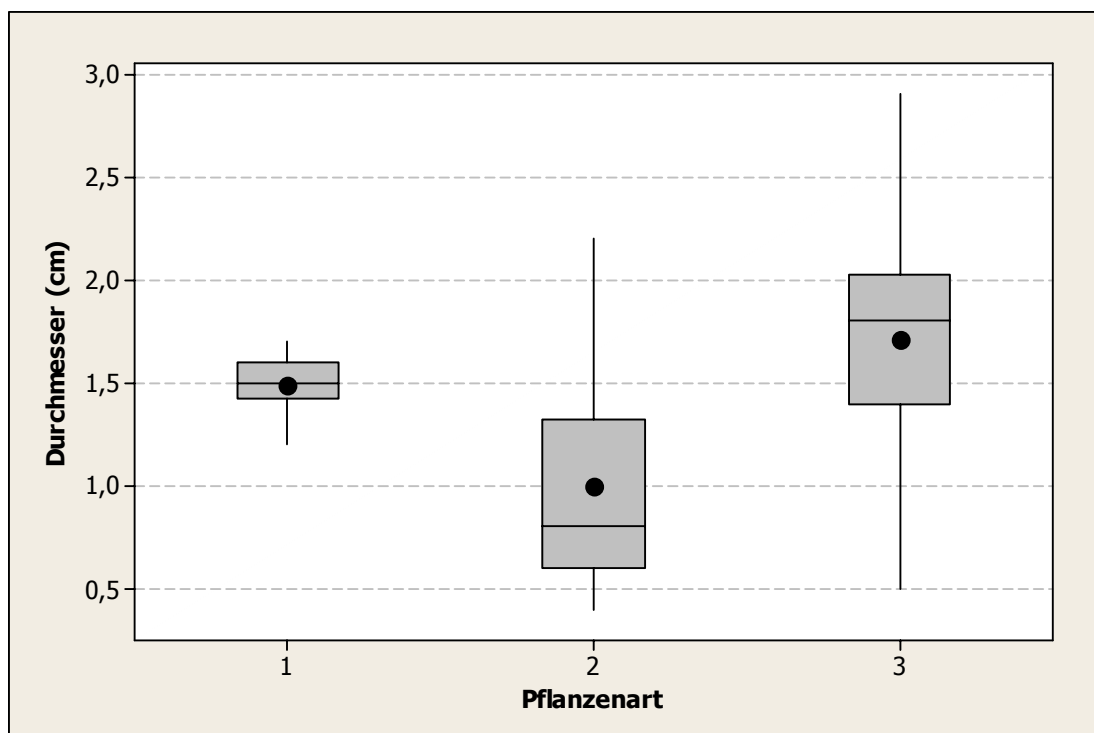


Abb. 90: Stammdurchmesser der Pflanzen bei der ersten Zwischenauswertung der Rohrabschnitte mit Bitumenringen (n = 16)
 Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*

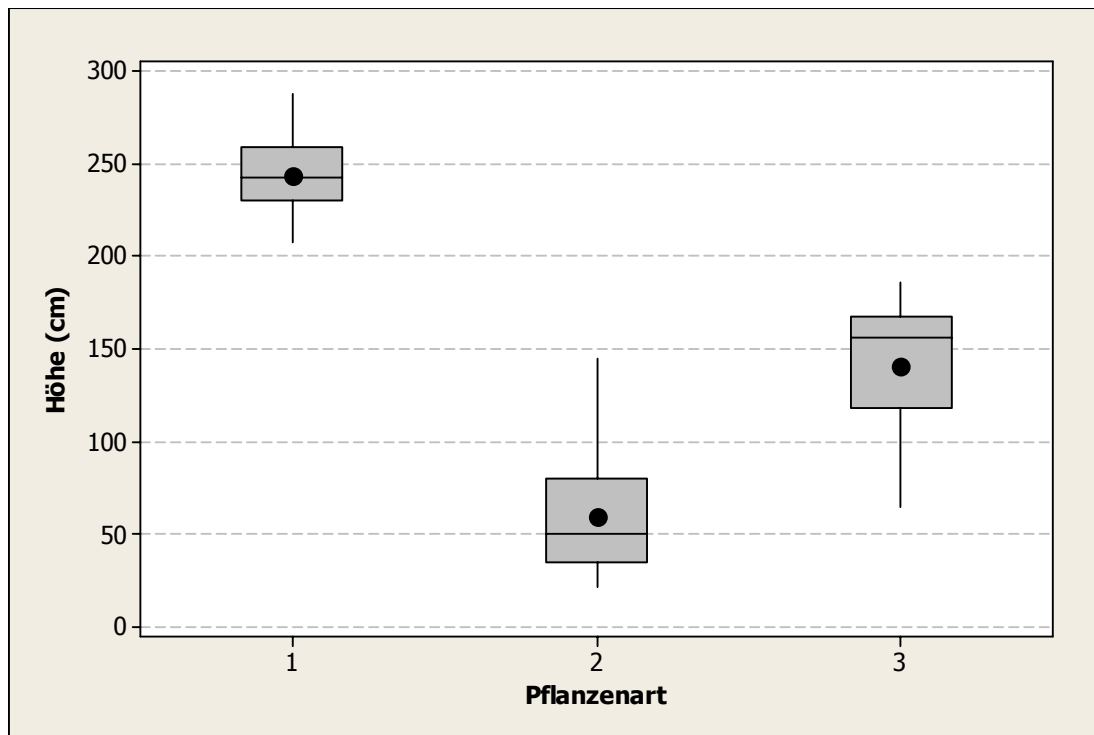


Abb. 91: Höhe der Pflanzen bei der ersten Zwischenauswertung der Plattenstapel mit Bitumenringen (n = 16)
 Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*

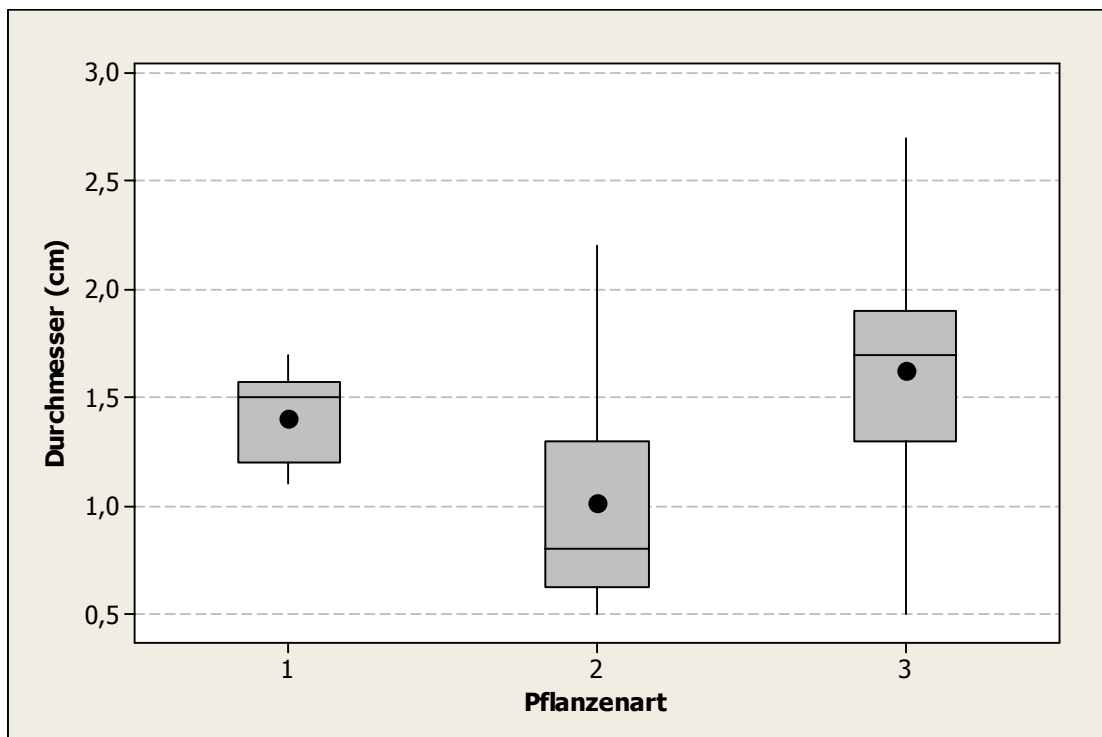


Abb. 92: Stammdurchmesser der Pflanzen bei der ersten Zwischenauswertung der Plattenstapel mit Bitumenringen (n = 16)
 Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*

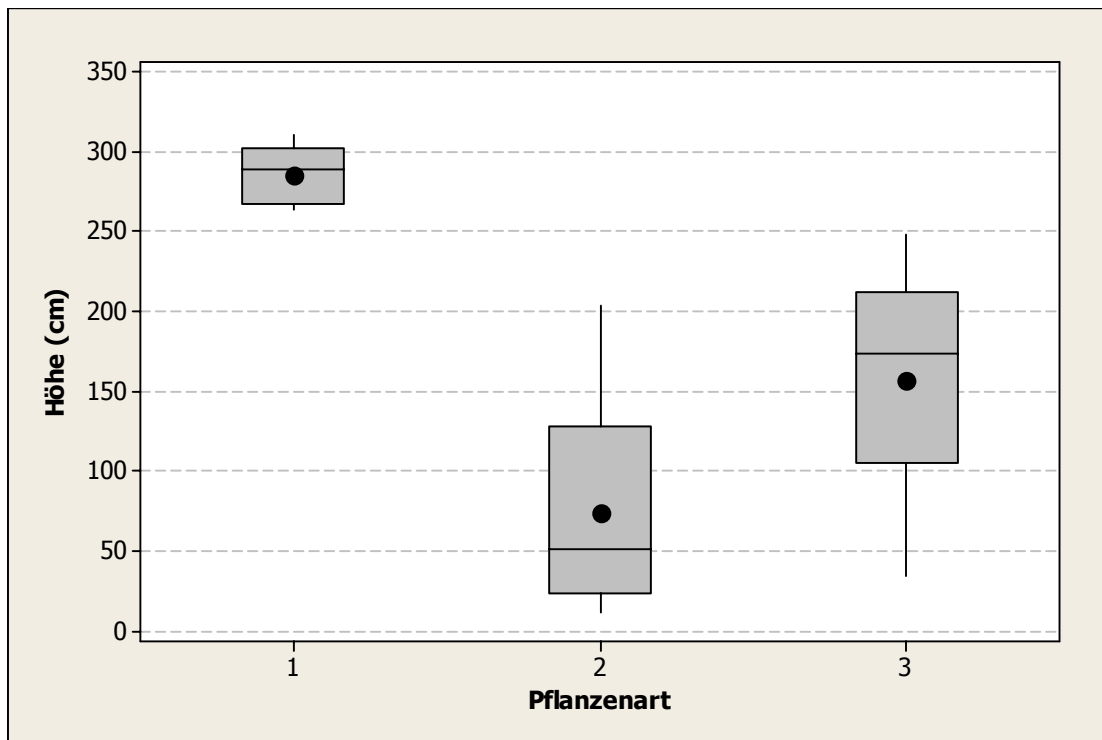


Abb. 93: Höhe der Pflanzen bei der zweiten Zwischenauswertung der Rohrabschnitte mit Bitumenringen (n = 16)

Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*

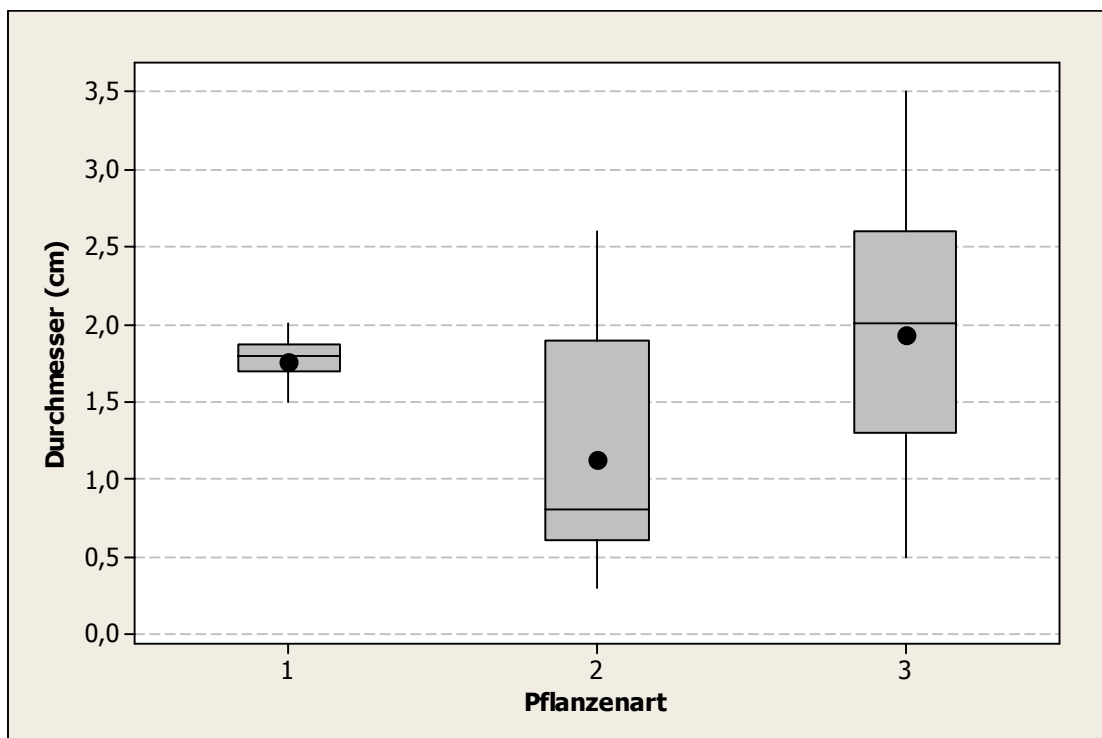


Abb. 94: Stammdurchmesser der Pflanzen bei der zweiten Zwischenauswertung der Rohrabschnitte mit Bitumenringen (n = 16)

Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*

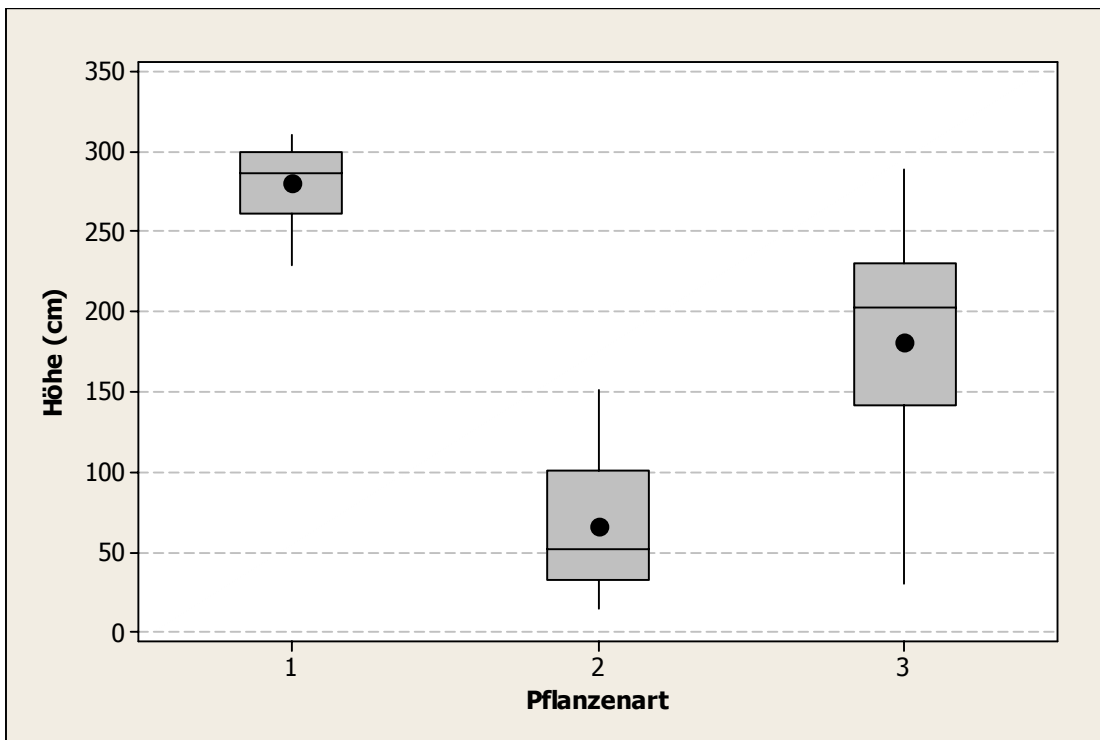


Abb. 95: Höhe der Pflanzen bei der zweiten Zwischenauswertung der Plattenstapel mit Bitumenringen (n = 16)
 Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*

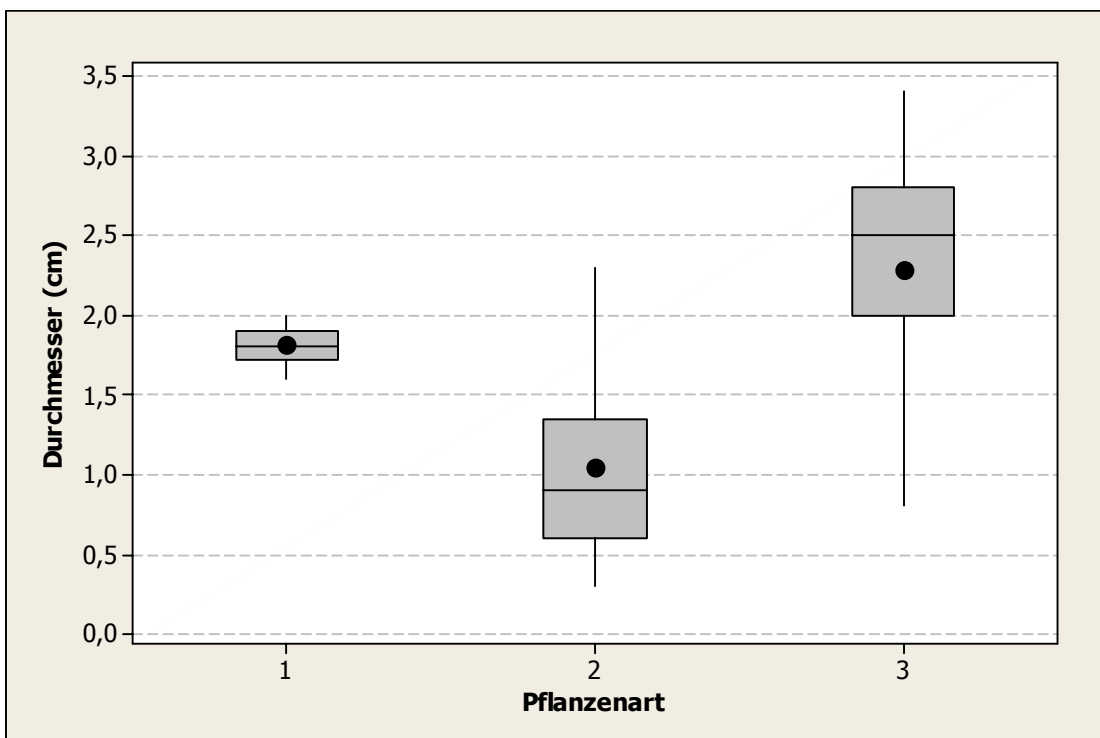


Abb. 96: Stammdurchmesser der Pflanzen bei der zweiten Zwischenauswertung der Plattenstapel mit Bitumenringen (n = 16)
 Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*

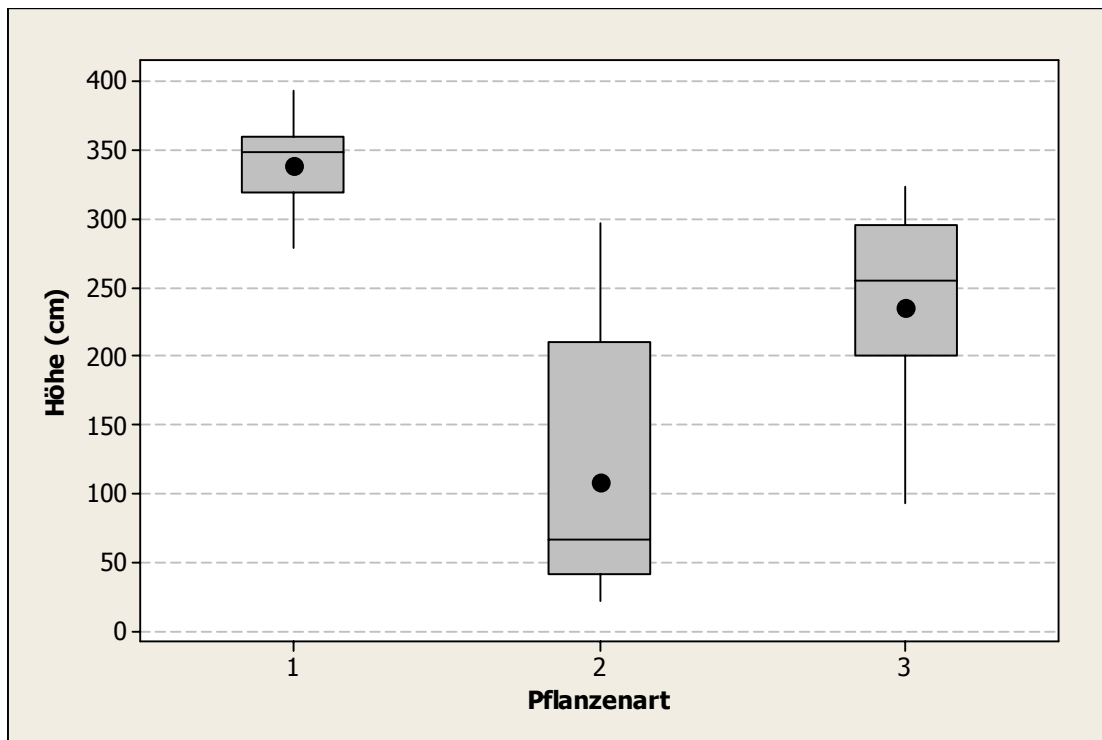


Abb. 97: Höhe der Pflanzen bei der dritten Zwischenauswertung der Rohrabschnitte mit Bitumenringen (n = 16)

Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*

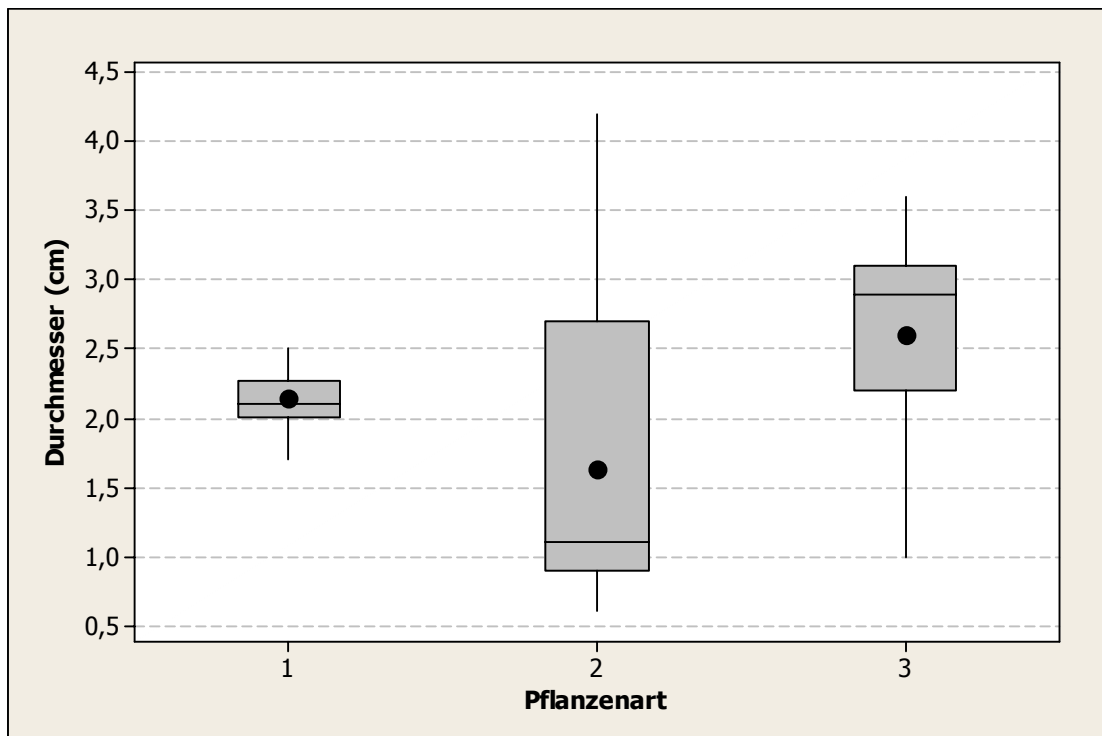


Abb. 98: Stammdurchmesser der Pflanzen bei der dritten Zwischenauswertung der Rohrabschnitte mit Bitumenringen (n = 16)

Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*

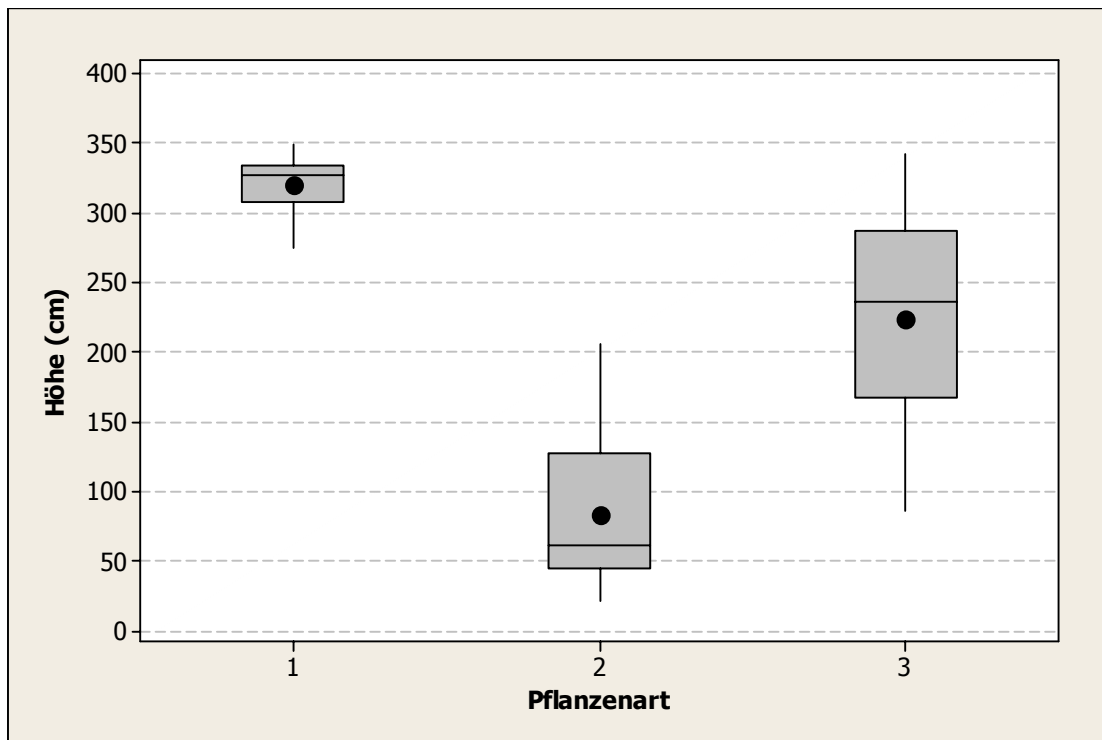


Abb. 99: Höhe der Pflanzen bei der dritten Zwischenauswertung der Plattenstapel mit Bitumenringen (n = 16)
 Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*

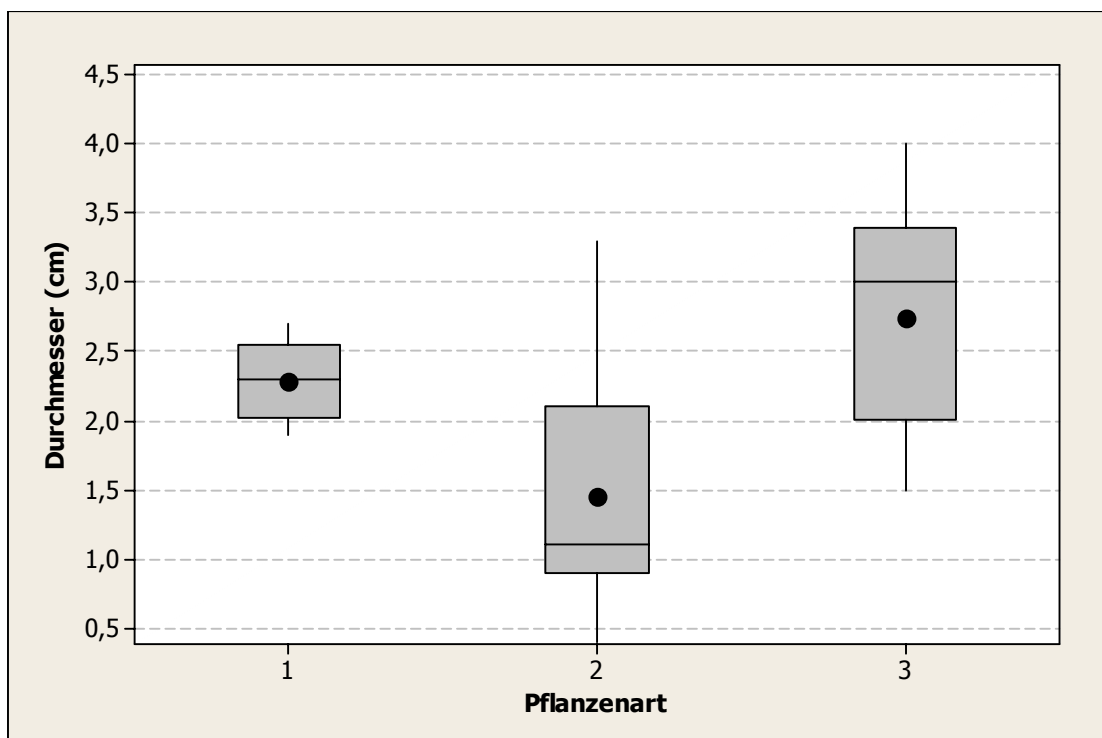


Abb. 100: Stammdurchmesser der Pflanzen bei der dritten Zwischenauswertung der Plattenstapel mit Bitumenringen (n = 16)
 Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*

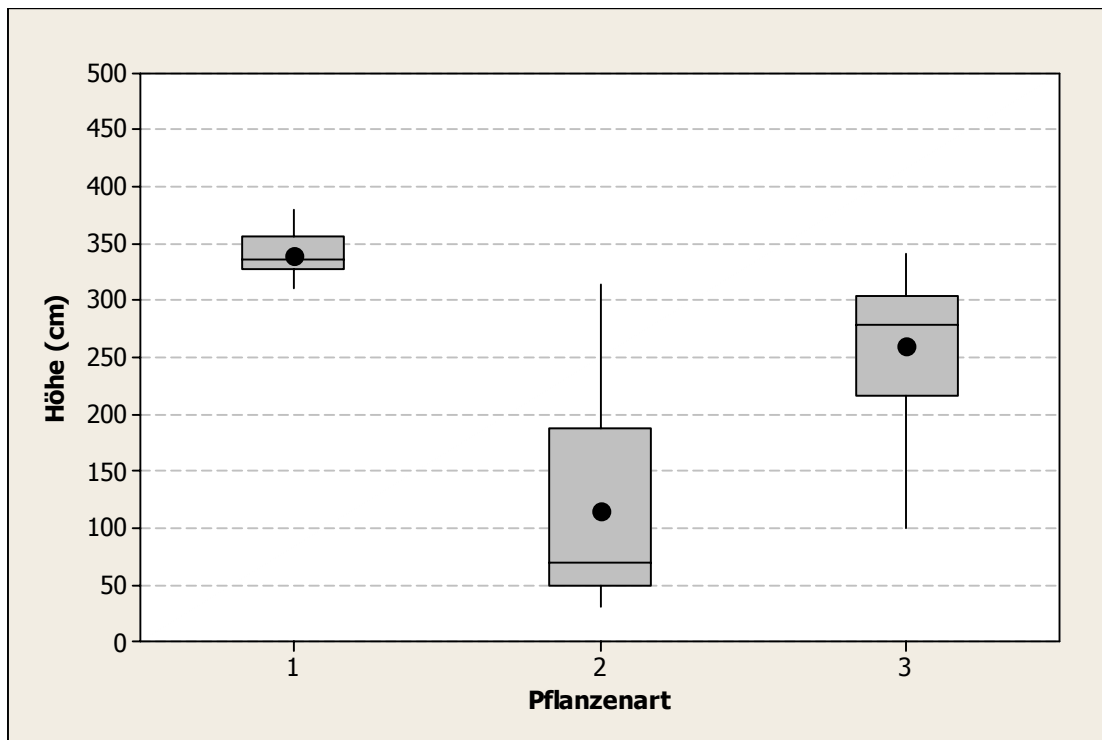


Abb. 101: Höhe der Pflanzen bei der Endauswertung der Rohrabschnitte mit Bitumenringen (n = 16)
 Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*

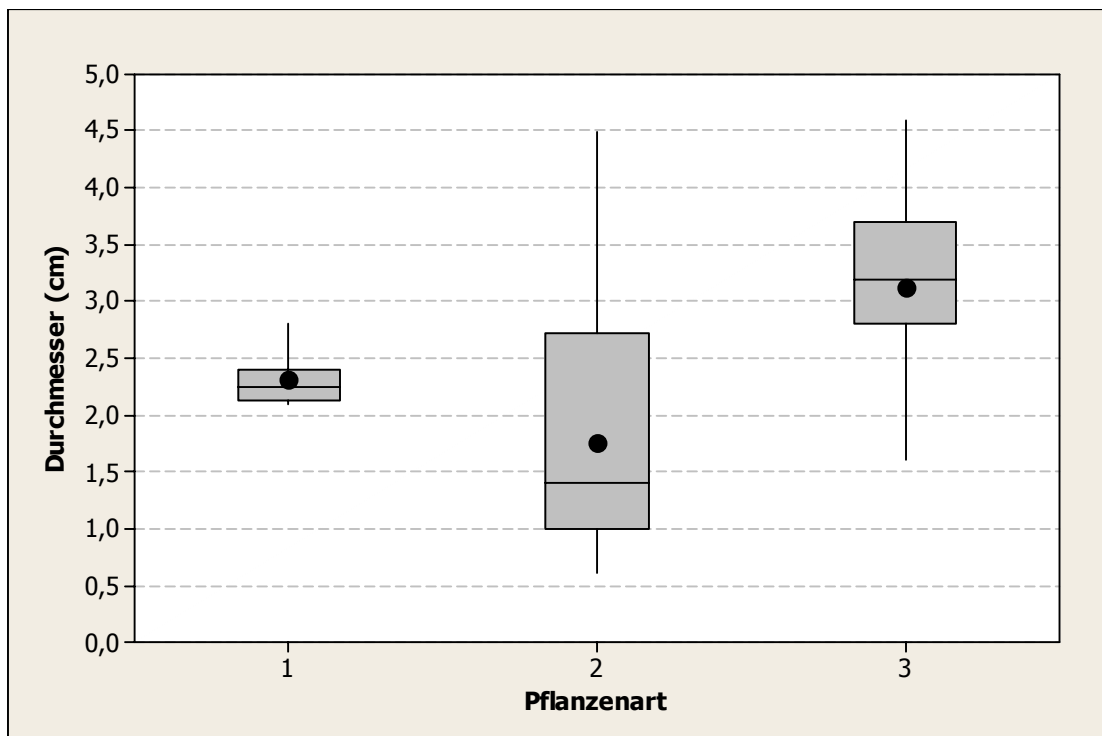


Abb. 102: Stammdurchmesser der Pflanzen bei der Endauswertung der Rohrabschnitte mit Bitumenringen (n = 16)
 Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*

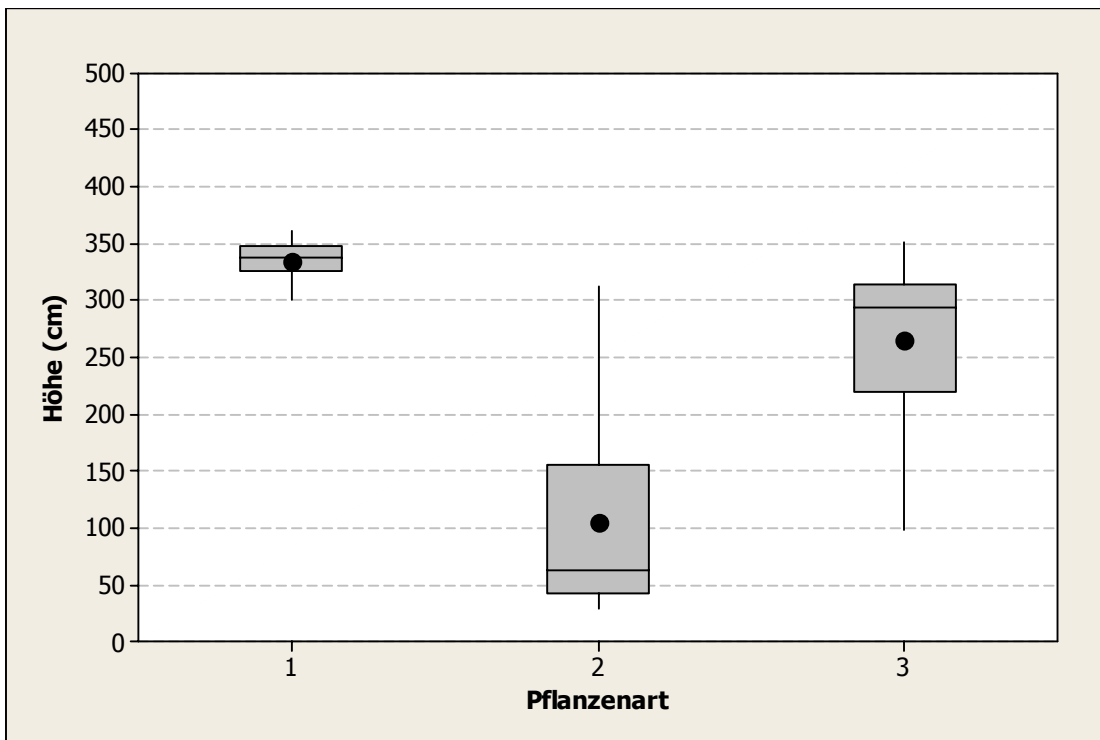


Abb. 103: Höhe der Pflanzen bei der Endauswertung der Plattenstapel mit Bitumenringen (n = 16)
 Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*

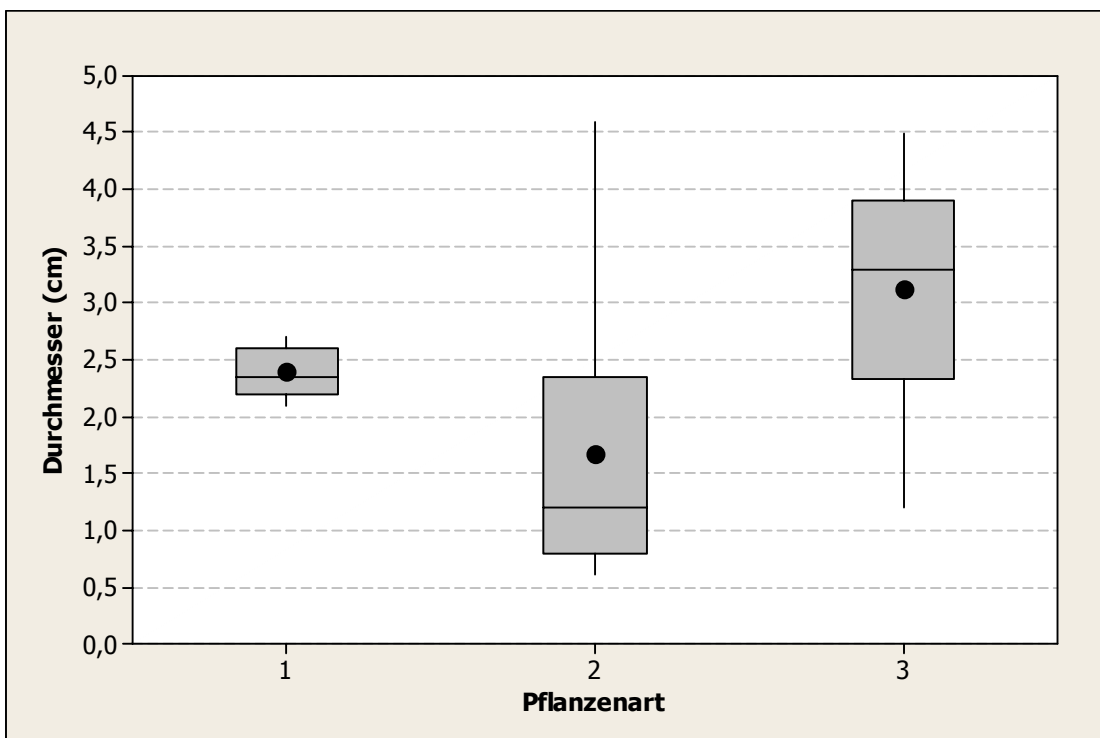


Abb. 104: Stammdurchmesser der Pflanzen bei der Endauswertung der Plattenstapel mit Bitumenringen (n = 16)
 Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*

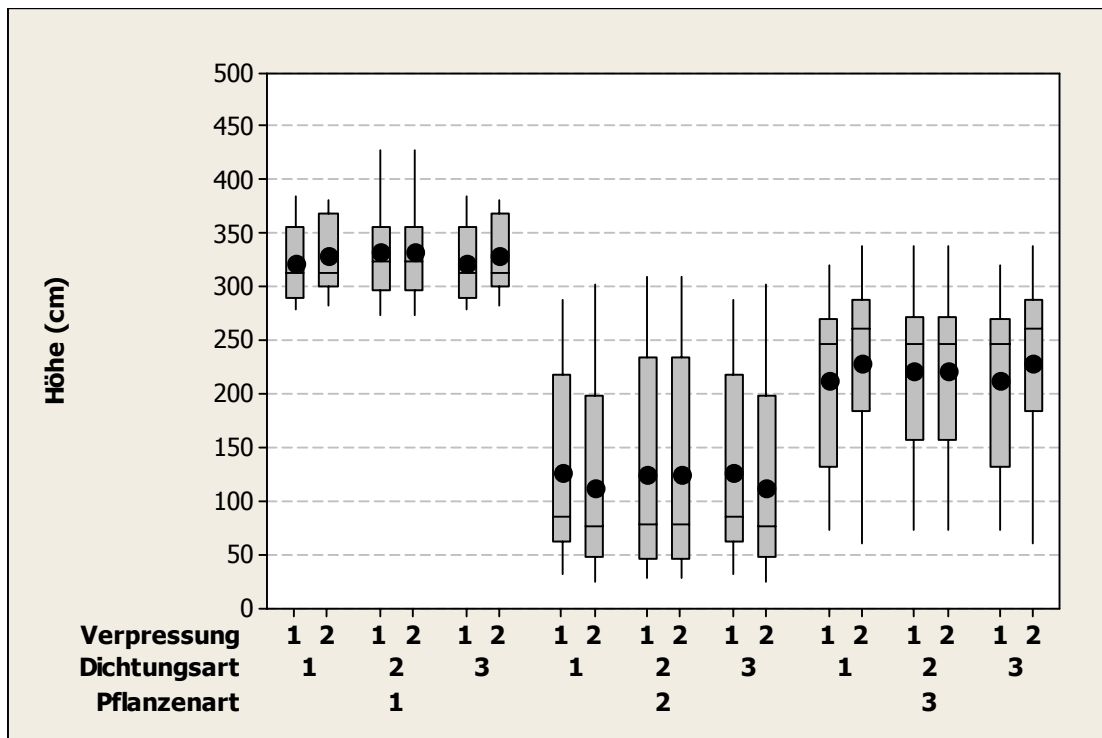


Abb. 105: Höhe der Pflanzen bei der Endauswertung der Rohrabschnitte mit SBR-Dichtungen (n = 16)

Verpressung 1 = 10 %, 2 = 35 %

Dichtung 1 = SBR, 2 = SBR WS, 3 = SBR WS-CX

Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus beniamina*

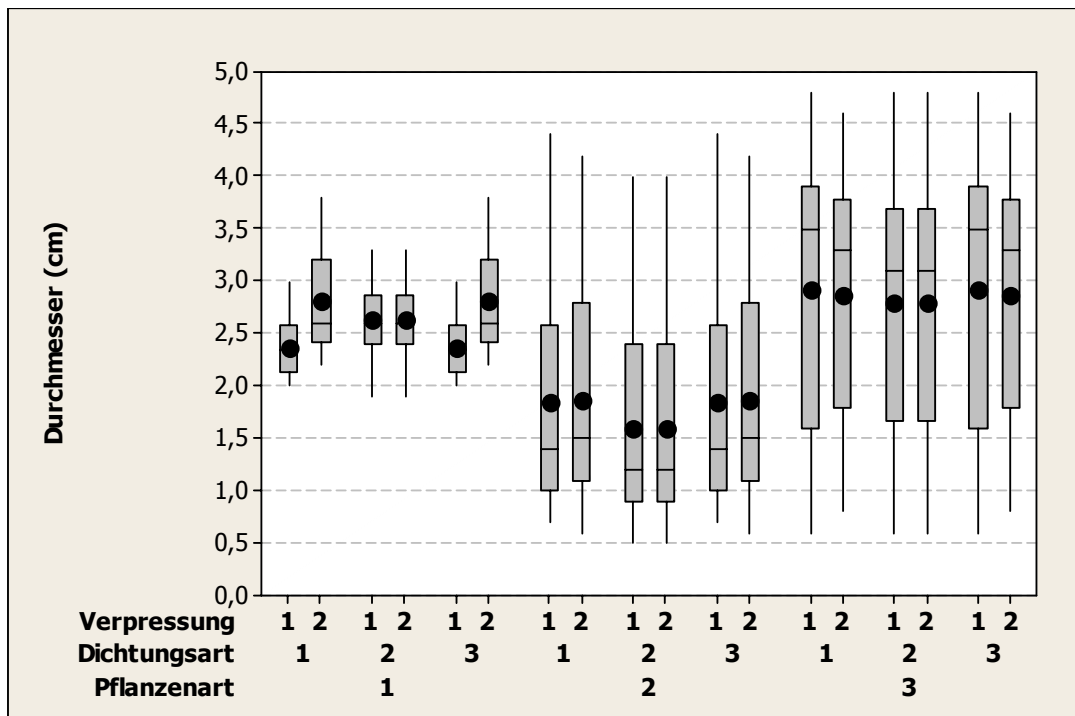


Abb. 106: Durchmesser der Pflanzen bei der Endauswertung der Rohrabschnitte mit SBR-Dichtungen (n = 16)

Verpressung 1 = 10 %, 2 = 35 %

Dichtung 1 = SBR, 2 = SBR WS, 3 = SBR WS-CX

Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus beniamina*

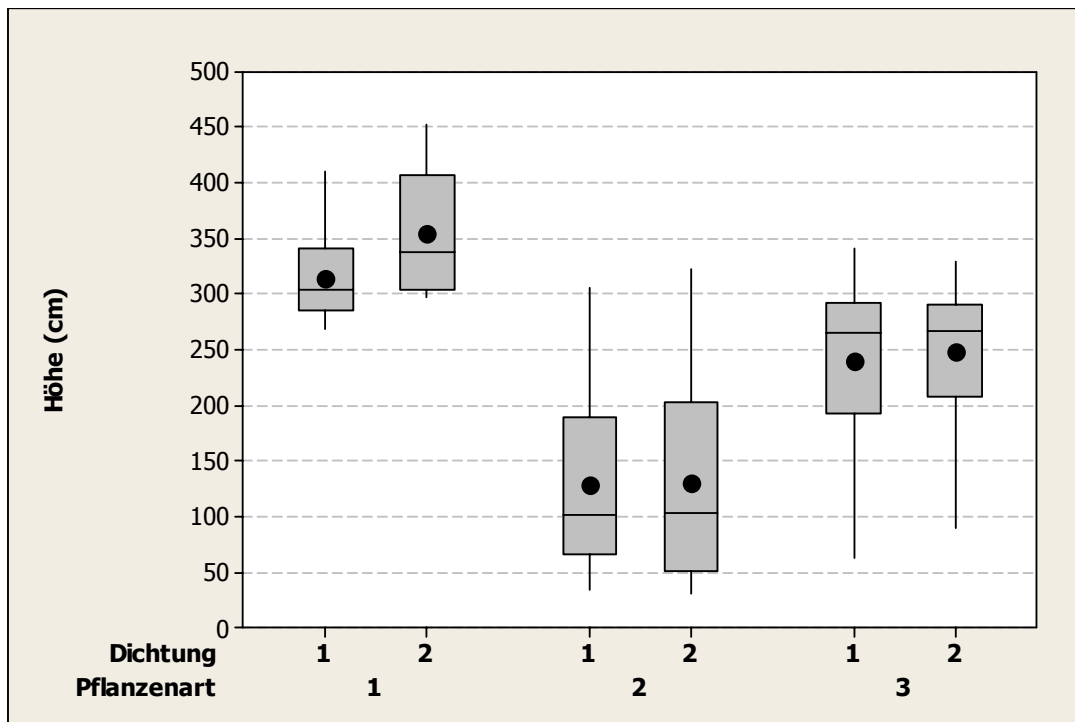


Abb. 107: Höhe der Pflanzen bei der Endauswertung der Plattenstapel mit SBR-Dichtungen (n = 16)
 Dichtung 1 = SBR, 2 = SBR WS
 Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*

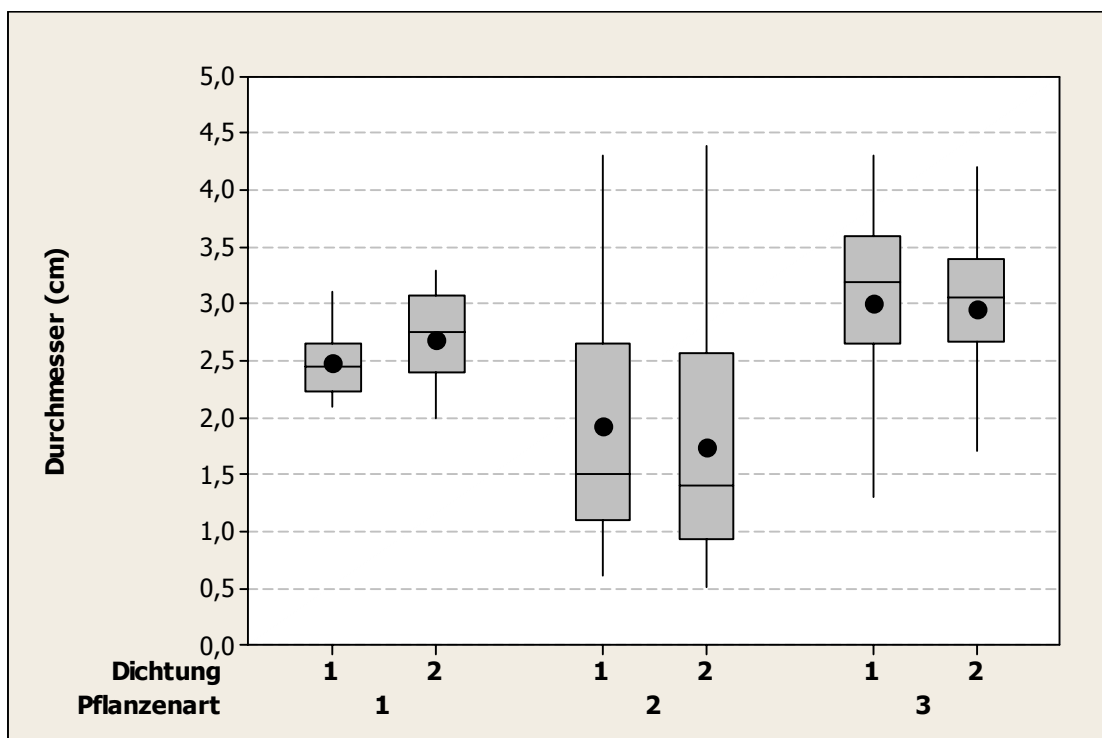


Abb. 108: Durchmesser der Pflanzen bei der Endauswertung der Plattenstapel mit SBR-Dichtungen (n = 16)
 Dichtung 1 = SBR, 2 = SBR WS
 Pflanzenart 1 = *Pyracantha coccinea*, 2 = *Ficus carica*, 3 = *Ficus benjamina*