

# Gehölzwurzeln als Schadensverursacher von asphaltierten Wegebelägen

Das Eindringen von Wurzeln in Wegebelägen mit Kantkorn  
unterschiedlicher Korngrößenverteilung

## Woody roots as cause of damages on paved paths

Penetration of riparian tree roots in matrix stone mixtures with different  
grain size distributions

### **MASTERARBEIT**

**eingereicht von:**

**Michael Müllner BSc**

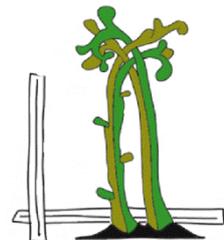
**Betreuung:**

**Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. Johann Peter Rauch**

**Dipl.-Ing. Clemens Weissteiner**



Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau  
Department für Bautechnik und Naturgefahren  
Universität für Bodenkultur Wien





# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>I</b>
<b>Danksagung .....</b>	<b>III</b>
<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>1</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>2</b>
<b>1. Einleitung und Problemstellung .....</b>	<b>3</b>
1.1 Stand der Forschung .....	4
1.2 Forschungsfragen.....	9
1.3 Ziele.....	10
<b>2. Grundlagen .....</b>	<b>11</b>
2.1 Wurzeln .....	11
2.1.1 Funktion der Wurzel .....	12
2.1.2 Anatomie und Wachstumsprozesse .....	12
2.1.3 Wurzelmorphologie.....	16
2.1.4 Genetik und Umwelteinfluss auf Wurzeln .....	17
2.2 Treppelwege an der Donau .....	21
2.2.1 Allgemeiner Schichtaufbau.....	21
<b>3. Methodik.....</b>	<b>28</b>
3.1 Standort Großenzersdorf.....	28
3.1.1 Klima.....	28
3.1.2 Boden .....	29
3.2 Feldversuche .....	30
3.2.1 Versuchsaufbau.....	33
3.2.2 Kalibrierung der Messsensoren.....	41
3.2.3 Lastplattenversuche .....	45
3.2.4 Erhebung der ober- und unterirdischen Biomasse .....	46
3.2.5 Wurzelscan.....	52
<b>4. Ergebnisse .....</b>	<b>54</b>
4.1 Kalibrierung der Bodenwassergehaltssensoren .....	54
4.2 Bodenwassergehaltsmessungen.....	56
4.3 Lastplattenversuche .....	57
4.4 Gehölzpflanzstreifen.....	60
4.5 Wegeaufbau-Versuche .....	65
4.6 Substratversuche.....	72

4.7	Wurzelscans .....	77
<b>5.</b>	<b>Diskussion und Ausblick.....</b>	<b>78</b>
<b>6.</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>82</b>
<b>7.</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>86</b>
<b>8.</b>	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>89</b>
<b>9.</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>90</b>
I	Wurzelmassenverteilung in Ebenen der Wegeaufbau-Versuchsboxen und deren Gehölzpflanzstreifen.....	90
II	Messdaten Lastplattenversuche .....	97

## Danksagung

An erster Stelle möchte ich meinen **Eltern** danken, weil sie mir das Studieren ermöglichten, mich dabei bedingungslos unterstützten und mir immer wieder zeigten, dass sie an mich glauben.

Aus fachlicher Sicht möchte ich mich bei meinen **Professor em. Dr. Florin Florineth** bedanken, der mein Interesse an der Ingenieurbiologie geweckt hat.

Meinen Betreuer und Arbeitgeber **Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. Hans Peter Rauch**, der mich als Diplomand betreute und mir die Möglichkeit gab, im Fachbereich der Ingenieurbiologie Erfahrungen zu sammeln. Danke für seine Offenheit, seine hilfreichen Ratschläge und dafür, dass seine Tür immer für mich offen stand.

Meinen Zweitbetreuer **Dipl.-Ing. Clemens Weissteiner** für seine kollegiale Aufnahme, der Betreuung der Masterarbeit und das Angebot diese zu schreiben. Danke für das offene Ohr und den fachlichen Diskussionen, die mir sehr weiterhalfen.

Danke an **Wolfgang Sokol**, für die Unterstützung bei der Kalibrierung der Messsensoren, **Fritz Zott** und **Hans Rutzenholzer** für das technische Fachwissen, den Gärtner-Lehrlingen **Charlotte Kieszling** und **Patricia Fischer** für die Unterstützung bei den Erhebungen, sowie bei **allen** meinen **Bürokollegen** am Institut für Ingenieurbiologie, die mir die Monate am Institut zu einer unvergesslichen Zeit machten.

Zuletzt möchte ich mich noch bei meinen **Freunden** bedanken, die mein Leben zu dem machen was es ist, mir während des gesamten Studiums und besonders beim Verfassen dieser Masterarbeit eine unersetzliche Stütze waren.

## Zusammenfassung

Untersuchungen der Wurzelwachstumseigenschaften an Standorten mit Asphalt Schäden zeigten, dass Gehölzwurzel in den Straßenaufbau meist zwischen der Tragschicht und dem Asphalt eindringen.

In dieser Masterarbeit wird der Einfluss von verschiedenen gestuften Korngrößenmischungen, als Tragschichten, auf das Wurzelwachstum von Pioniergehölzen untersucht. Dafür wurden sieben verschiedene Korngrößenmischungen in einem dreijährigen Versuchsaufbau mit und ohne Deckschicht getestet und an der Wurzel durchdringbaren Seite der Boxen Weiden- und Pappelsteckhölzer gepflanzt.

Fünf Monate nach dem Einsetzen der Steckhölzer wurde im ersten Teilfeld die ober- und unterirdische Biomasse der ersten Wegeaufbauversuchsboxen und der ersten Substratboxen erhoben. Es kommt zu einem erhöhten Anteil an Biomasse in der 3. Ebene, die Wurzelmasse nimmt mit zunehmendem Abstand zu den Steckhölzern ab und das Zement stabilisierte Substrat zeigt lediglich ein Wurzelwachstum im steckholznahen Bereich. Außerdem nimmt die unterirdische Biomasse der Gehölzpflanzstreifen mit dem volumetrischen Wassergehalt pro Gehölzpflanzstreifen zu. Die Lastplattenversuche ergaben, dass die Setzungen beim hydraulisch stabilisierten Substrat 8/32 durchschnittlich am Höchsten sind und sich die Tragfähigkeit bei zweimaligen Messungen der Substratversuche innerhalb von fünf Monate verdoppelt hat. Bei der Betrachtung der Wurzeldurchmesser ist die Erkenntnis, dass nach einer Vegetationsperiode der größte Gewichtsanteil im Wurzelbereich in der Durchmesserklasse 0-2 mm vorliegt. Die Wurzelscans zeigen dasselbe Ergebnis bei der Betrachtung der Wurzellänge je Durchmesserklasse.

Die Untersuchungen bestätigten außerdem die Theorie, dass skelettreiche Substrate mit möglichst geringem Feinkornanteil das Eindringen aufgrund ihres mechanischen Widerstandes und dem hohen Luft-Porenanteil verhindern. Zusätzlich fördert grober Schotter das Abfließen von Kondenswasser an der Unterseite der Asphaltsschicht.

Konkrete Aussagen der vorliegenden Masterarbeit sind Teil eines dreijährigen Feldversuches und können erst nach den Erhebungen und Auswertungen im Herbst 2016 und 2017 gewonnen werden.

## Abstract

Investigations of the root growth characteristics at sites with asphalt damages showed that tree roots mostly penetrated the road structure between the gravel sublayer and the asphalt.

In this master thesis root penetration is investigated with different granulated matrix stone mixtures, as sublayer material. Therefore seven different compositions of grain size mixtures were tested in a small scale experimental set-up as sublayer materials with and without a covering by a concrete layer for three years. Willow and poplar cuttings were planted laterally to the root penetrable side of the boxes.

Five months after planting the cuttings, above- and below-ground biomass was analysed for the first road-structure boxes and the first substrate boxes. There is an increased biomass in the 3rd level, the root mass decreases with increasing distance to the cuttings and the hydraulic bound mixture shows root growth just in the cutting-close area. In addition, the underground biomass of woody planting strips increase with the volumetric water content per woody planting strips. The plate load tests showed that the subsidences at the hydraulic bound mixture 8/32 are on average highest and the carrying capacity has doubled in measurements which are done twice of the substrate sets within five months. By looking at the root diameter there are the insights that after one growing season the largest weight proportion in the root zone exists in the diameter class 0-2 mm. The root scans show the same result when considering the root length each diameter class.

The studies also confirmed the theory, that matrix stone mixture with the smallest possible fine granular fraction may inhibit root growth due to the mechanical impedance and air pruning of roots. Furthermore coarse grain size mixtures influence the presence and permanence of soil water in the sublayer formed as a condensate at the underside of the asphalt layer. Concrete statements of the present thesis are part of a three-year field test and can be obtained after the surveys and evaluations in autumn 2016 and 2017.

## 1. Einleitung und Problemstellung

Fließgewässer weisen im Idealfall an ihren Ufern eine ausgewogene Vegetationsstruktur auf, die von Gräser und Kräuter bis zu Gehölzen reicht. Besonders die Verwendung von Gehölzstrukturen entlang von Fließgewässern ist ein kontrovers diskutiertes Thema, denn es stehen Nutzen und Schaden gegenüber. Der positive Effekt von Gehölzstrukturen entlang von Fließgewässern sind deren ästhetische, ökologische und technische Funktionen. Sie werten das Landschaftsbild auf, bieten Lebensraum für Tiere, spenden Schatten für Erholungssuchende, verbessern das Mikroklima und erhöhen dadurch die Lebensqualität der Nutzer und Nutzerinnen. Außerdem sichern sie durch ihr Wurzelsystem die Flussböschungen und schützen durch ihre oberirdische Biomasse diese bei Hochwassern.

Ein Wurzelsystem kann jedoch auch ein negativer Effekt für Gehölze sein. Historisch bedingt verlaufen an Fließgewässern oft unbefestigte Begleitwege, auch Treppelwege genannt. Diese haben noch heute für verschiedenste Zwecke, sei es für Anbindungs- oder Erholungszwecke in Form von asphaltierten Radwegen, Verwendung finden. Für die Entwicklung steht den Gehölzen im Regelfall ausreichend durchwurzelbarer Raum zu Verfügung. Durch die oft geringe räumliche Distanz zwischen Gehölzen und Begleitweg sowie der geschlossenen Asphaltdecke kommt es zu Konflikten zwischen den Wurzeln und dem Weg. Wenn im potenziellen Wurzelraum Infrastruktureinrichtungen vorhanden sind, kann es unter bestimmten Rahmenbedingungen, durch das Eindringen von oberflächennahen Wurzeln in die Wegebau-schichten, zu Schäden an Wegebelägen kommen. Dieses Phänomen ist sehr oft an den die Donau begleitenden Treppelwegen zu beobachten (WEISSTEINER, 2015).

Mit diesem Problem ist die via donau Österreichische Wasserstraßen Gesellschaft mbH konfrontiert. Sie ist als Erhalter und Verwalter verantwortlich für den Zustand eines rund 430 km langen asphaltierten Wegenetzes an Uferbegleit- bzw. Treppelwegen. Um die Verkehrssicherheit der Radwege zu gewährleisten, müssen die durch die oberflächennahen Wurzeln entstandenen Schäden laufend saniert werden. Dies ist mit hohen Kosten verbunden. (VIA DONAU, 2015)

Da bis jetzt noch keine genauen Erkenntnisse, sondern nur Annahmen vorliegen, wieso Wurzeln in die Wegebau-schichten der Treppelwege einwurzeln, wurde das Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau an der Universität für Bodenkultur für Forschungsarbeiten betraut. Damit sollen Grundlagen für nötige Sanierungsmaßnahmen der Donau- Treppelwegen möglichst gering zu halten erarbeitet werden. Übergeordnetes Ziel ist es die Kosten für die notwendigen Sanierungen der Treppelwege bei

Wurzelschäden durch vorbeugende Maßnahmen zu verringern. Dieses Ziel soll durch zwei Schritte erreicht werden. Zuerst werden die Ursachen und die Mechanismen der Ausbreitung von Gehölzwurzeln in belagsnahen Schichten und der zum Schaden führende Prozesse untersucht. In einem zweiten Schritt werden Ansätze getestet, welche zur Reduzierung und Vermeidung der Schäden an Wegebelaen führen sollen. Dabei wird ein besonderer Fokus auf die topographischen und hydrographischen Gegebenheiten der Standorte gelegt, die neben dem Vorhandensein der Wegeeinbauten die Ausbreitung der Wurzeln beeinflussen. (WEISSTEINER, 2015)

Aufbauend auf den Ergebnissen zu einer umfassenden Literaturrecherche zu den Standortbedingungen und der vorkommenden Vegetation, sowie Erhebungsarbeiten wurden im Rahmen eines drei jährigen Feldversuches im Versuchsgarten Großenzersdorf des Instituts für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau unterschiedliche Wegeaufbauten getestet. Bautechnische Machbarkeit, technische Anforderungen und finanzieller Aufwand der Aufbauten werden den Erfolgen in der Schadensverhinderung gegenübergestellt und sollen zu einer optimalen Problemlösung führen (WEISSTEINER, 2015).

Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit dem Aufbau des Feldversuches in Großenzersdorf, geotechnischen Messungen an der Versuchsfläche, der Kalibrierung der verwendeten Boden-Wassergehalts-Messsensoren und den Untersuchungen nach der ersten Vegetationsperiode.

## **1.1 Stand der Forschung**

Um ein Verständnis zur Problemstellung von Gehölzwurzeln mit Infrastruktureinrichtungen zu bekommen und in Folge Forschungsfragen ableiten zu können, wird in diesem Kapitel der Stand der internationalen Forschung und der aktuellen nationalen Forschung von WEISSTEINER (2015) durch die ersten Ergebnisse des erwähnten Forschungsprojektes dargelegt.

Die Erschließung von Wurzeln bedeutet nicht nur Schäden an Wegeaufbauten, sondern führt auch zu weiteren Problemen. Gerade im urbanen Bereich finden die Wurzeln der diversen Gehölze nur einen begrenzten durchwurzelbaren Raum im Boden (BALDER, 1998).

Auf Grund der Tatsache, dass viele Wegebau-schichten trotz Verdichtung eine geeignete Bodendichte bzw. das Vorhandensein von Grobporen aufweisen, entstehen ideale Bedingungen für ein verstärktes Wurzelwachstum, was konkret bedeutet, dass für das Gehölz eine zusätzliche Möglichkeit zur Durchwurzelung neben dem bereits vorhandenen Raum möglich ist. Idealtypische Orte dafür sind u.a. Pflasterbettungen, hohlraumreiche

Tragschichten, Fugen in Baukörpern, sowie Grenzzonen mit geringem Eindringwiderstand. (REICHWEIN, 2002)

Ähnliche Problemstellungen gelten für Bäume, die in ihrem Wurzelwachstum immens beeinträchtigt werden. Da sich das Wurzelwachstum nicht nur auf Pflanzstreifen, Pflanzgruben oder Böschungen beschränkt, sondern sich u.a. auch auf den Untergrund der angrenzenden Geh- und Radwege erstreckt, wird hier ein erheblicher Schaden verursacht, der die Unfallgefahr für Fußgänger wie auch Radfahrer erhöht. (REICHWEIN, 2002)

Asphaltschäden in ihrer herkömmlichsten Art beschreibt KOPINGA (1994) als eine aufgewölbte bzw. aufgebrochene Schadenstruktur, die in den meisten Fällen entweder vom Stamm ausgehend konzentrisch oder senkrecht zum Straßenverlauf verläuft. Sobald der Schaden in diesem sichtbaren Stadium ist, ist davon auszugehen, dass die auslösenden Wurzeln bereits eine gewisse Länge und einen Minimaldurchmesser von 2,5 cm erreicht haben. Direkt unter der Asphaltdecke bilden sich aus den Wurzeln nur sehr wenige Seitenwurzeln heraus, wenn sie jedoch die andere Seite des Wegebelauges erreichen, fächert sich die Wurzelstruktur wieder auf. (KOPINGA, 1994)

Von außen lässt sich das Wachstum der Wurzeln unterhalb des Wegebelauges erst nach dem Einsetzen des sekundären Dickenwachstums und einer damit verbundenen Zunahme des Wurzeldurchmessers erkennen. In diesem Fall wird die Asphaltdeckschicht nach oben geschoben, aufgewölbt oder auch aufgebrochen. Gerade Erhaltungsstraßen und die bereits genannten Geh- und Radwegen sind besonders anfällig für durch Gehölzwurzeln verursachte Asphaltschäden, da sie eine sehr dünne Asphaltdecke aufweisen. (KOPINGA, 1994)

Ein weiteres häufig vorkommendes Schadensbild wäre die punktuelle Anhebungen des Straßenbelages, was entweder auf Verletzungen bzw. externen Druck auf die Wurzel zurückzuführen ist oder auf Wurzelbrut bei frisch geschnittenen wurzelsprossausstiebsfähigen Gehölzen. Besonders häufig treten solch beschriebenen Schäden bei Pappeln und anderen Pioniergehölzen auf. (KOPINGA, 1994)

Bituminöse Decken sind relativ elastisch und daher im Hinblick auf Schadbilder bei Anhebungen durch Baumwurzeln anders zu bewerten als zum Beispiel Pflasterdecken. Eine Durchwurzelung der hohlraumarmen Deckschicht selber ist unwahrscheinlich. (REICHWEIN, 2002)

Die Folge der Verwendung einer zu geringen Mindestkorngröße, bedeutet in diesem Zusammenhang, dass trotz nicht vorhandener technischer Notwendigkeit die Tragschicht nach oben hin mit einer nicht durchwurzelbaren Trennschicht abschließt. Folglich breiten sich die Wurzeln im flacheren Teil zwischen Tragschicht und Deckschicht aus und die bereits oben beschriebenen Schäden entstehen. (STRECKENBACH et al. 2008)

Zwei weitere Faktoren, die eine Durchwurzelung begünstigen, sind die Aspekte, dass Wegeböden einerseits den Wurzeln als Schutz vor starken Temperaturschwankungen dienen und andererseits zur Bildung von Kondenswasser führen, was das Wachstum zusätzlich fördert (STRECKENBACH et al. 2008).

Folgend sollen nun eine Anzahl an Faktoren beschrieben werden, welche eine Schadensbildung verursachen können.

### **Alter und Größe der Bäume**

In der Literatur findet man keinen gemeinsamen Konsens in Bezug auf das Alter und der Größe von Bäumen und deren mögliche Schadenswirkung auf die Asphaltdecke. KOPINGA (1994) legt in seinen Untersuchungen dar, dass bei halbhohen Bäumen Schäden an Asphaltdecken entstehen. Es sind auch Ausnahmen gefunden worden so wie die Bastard-Schwarzpappel (*Populus x euramericana*), welche bereits nach 5-7 Jahren Schäden verursachte. BARKER (1983) stellt fest, dass die Schadenshäufigkeit sich mehr von der Wachstumsrate als vom Alter der Bäume ableitet. Hiergegen zu langsam wachsenden Baumarten einer Größe, führen schnell wachsende Baumarten derselben Größe früher und häufiger zu Asphalt Schäden (BARKER, 1983, DAY, 1991, MCPHERSON und PEPER, 1995). Die Erkenntnisse decken sich mit den Untersuchungen von WEISSTEINER (2015). WAGAR und BARKER (1983) erforschten, dass größere Bäume im Vergleich zu kleineren mehr Schäden verursachen. Im Gegensatz dazu, fand HAMILTON (1984) keinerlei Zusammenhang zwischen Baumalter, Größe und Schadenshäufigkeit.

### **Baumarten**

Die Untersuchungen von BARKER (1983) haben bei knapp der Hälfte der Asphalt Schäden einen Konnex zu bestimmen Baumarten verzeichnen können. MCPHERSON und PEPER (1995) konstatieren, dass obwohl Unterschiede zwischen verschiedenen Arten in der Baumwurzelarchitektur bestehen, die Endstruktur eines individuellen Baumwurzelwachstums mehr von den Umweltfaktoren als von genetischer Vererbung beeinflusst wird (RANDRUP et al 2003). Mit dem Wissen, dass schnell wachsende Baumarten eher Probleme verursachen als langsam wachsende, wurde festgestellt, dass Bäume derselben Art an manchen Stellen Schäden hervorgerufen haben und an anderen Stellen nicht (WAGAR und BARKER, 1983, WONG et al., 1983). Mögliche Ursachen dafür sind kleinräumige Unterschiede im Boden (MCPHERSON et al., 2000) sowie Unterschiede in der Genetik der Baumarten (BURGER und TAYLOR, 2000, COSTELLO et al. 2000). Vor allem Pioniergehölze haben nach KOPINGA (1994) und WEISSTEINER (2015) ein erhöhtes Schadenspotential. Erhöhtes Schadenspotential wird

in der Literatur neben Pappeln, auch Weiden, der Birke, der Robinie der Kiefer, dem Sanddorn sowie dem Ahorn zugesprochen (KOPINGA, 1994). Besonders zu erwähnen sind aufgrund des starken Vorkommens in den Untersuchungsgebieten an der Donau die Robinie und Hybridpappel, welche sich schnell und teils auch aggressiv ausbreitet und Schäden verursacht (WEISSTEINER, 2015).

#### ***Dauer bis zum Schadenseintritt***

Untersuchungen von KOPINGA (1994) zeigten, dass Wurzeln von einer 20 Jahre alten Pappelallee bereits nach 1-2 Jahren einen 2,2 m breiten Radweg unterwachsen haben. Bei 12 untersuchten Wurzelproben ergab das Alter der Wurzeln auf der Seite, an dem der Baum stand,  $5,8 \pm 1,8$  Jahre mit einem Durchmesser von  $32,0 \pm 7,8$  mm. Auf der anderen Seite des Wegebelages wiesen die Wurzeln ein durchschnittliches Alter von  $5,1 \pm 1,6$  und einen mittleren Durchmesser von  $29,7 \pm 10,0$  mm auf. 5 von den 12 Wurzeln hatten einen Altersunterschied zwischen den beiden Wegseiten von 0 bzw. 1 Jahr und die restlichen 2 Wurzeln wiesen einen Altersunterschied von 2 Jahren auf. (KOPINGA, 1994)

#### ***Distanz zu Wegen***

Die Distanz zwischen Gehölz zu Asphaltweg und der Schadensfrequenz hat nach KOPINGA (1994) keinen großen Zusammenhang. WEISSTEINER (2015) sieht ebenfalls keinen starke Zusammenhänge mit der Geländeform, der Distanz zum Wasserspiegel oder der wasser- bzw. landseitigen Standorte der Gehölze. Eine begrenzte Zahl an Publikationen weist jedoch darauf hin, dass mit abnehmender Distanz die Schadenswahrscheinlichkeit sinkt (RANDRUP et al., 2003).

#### ***Feuchtigkeit und Eindringwiderstand***

Wurzeln können, wie bereits erwähnt, aufgrund des auftretenden Kondensationswassers an der Unterseite der Asphaltsschicht angezogen werden. Die Untersuchungen von KOPINGA (1994) zeigen, dass der Feuchtigkeitsgehalt direkt unter der Asphaltsschicht konstant hoch ist. Weiter besagen sie, dass sich unterhalb der Asphaltsschicht der Wassergehalt im Bereich der Feldkapazität bewegt, und dass dementsprechend nicht ausreichend Wasser vorhanden ist, um den Bedarf eines Baumes zu decken. Investigationen zum Eindringwiderstand im Bankettbereich und in den Tragschichten demonstrieren, dass der Bankettbereich sehr leicht durchwurzelbar (Eindringwiderstand  $< 3$  Mpa) ist, die Tragschichten jedoch nicht ( $> 3$  Mpa). Bei standardmäßiger Verdichtung der Tragschichten bietet wie bereits erwähnt, der Schichtenübergang zwischen Tragschicht und Asphaltsschicht die einzige Eindringmöglichkeit für Gehölzwurzeln. (KOPINGA, 1994) WEISSTEINER (2015) hat in seinen Untersuchungen diese These belegt.

### **Wurzelwachstum**

Die Art und Struktur der Verteilung von Wurzeln hängt stark vom Bodengefüge ab. Mit zunehmender Bodentiefe nimmt die Durchwurzelung in der Regel ab (LEUSCHNER et al., 2004). Unter natürlichen Bedingungen sind 60-90% des gesamten Wurzelvolumens in den obersten 0,2 m von mineralischem Boden und beinahe alle großen Strukturwurzeln in den obersten 0,6 m des Bodens zu finden (RANDRUP et al. 2003). Da der Oberbau der Wegebeläge sich genau in diesem Bereich befindet, versuchen Wurzeln in diesem Bereich einzudringen (STRECKENBACH et al., 2008).

In der Literatur wird neben den Ursachen für eine mögliche Schadensbildung auch präventive Maßnahmen zur Schadensreduktion bzw. –vermeidung behandelt. COSTELLO und JONES (2003) unterteilen diese nach ihrem Anwendungsbereich in drei unterschiedliche Strategien:

- *Baum-basierte Strategien*
- *Infrastruktur-basierte Strategien und*
- *Wurzelraum-basierte Strategien.*

Diese werden in ihrer zeitlichen Anwendung als präventive oder sanierende Maßnahmen unterschieden. Baum-basierte Maßnahmen können bei Neupflanzungen die Auswahl von bestimmten Baumarten, welche weniger Schäden verursachen, bedeuten (präventiv). Eine andere Baum-basierende Maßnahme ist der Wurzelschnitt, der eine korrektive Maßnahme darstellt, die das Ziel hat künftige Schäden zu vermeiden oder zu verzögern. (COSTELLO und JONES, 2003)

Der Wurzelschnitt ist jedoch umstritten, da hinter dem gekappten Bereich ein verstärktes Feinwurzelnwachstum ausgelöst wird, welche wieder zu Schäden führen können. Starke Reaktionen im Wurzelwachstum ist auch beim „auf den Stock“ setzen von Pioniergehölzen (im Speziellen Pappeln) zu erwarten, da diese vermehrt mit Wurzelbrut reagieren. In diesem Fall sind Begleitmaßnahmen wie Wurzelstockfräsung, Mulchung und Entfernung von frischen Sprossen empfehlenswert. (WEISSTEINER, 2015)

Weitere Möglichkeiten wären die Anwendung von Wurzelschutzfräsen bzw. Wurzeltrennschneiden, wobei teilweise gleichzeitig eine Wurzelschutzfolie eingebaut wird, um eine spätere Bewurzelung des Bereichs unter der Straße zu verhindern. Die Maßnahme bedarf es noch an Forschungsarbeit und weist ein erhöhtes Risiko unterirdische Infrastruktur zu beschädigen auf. (WEISSTEINER, 2015)

Infrastruktur-basierte Maßnahmen sind vor allem im städtischen Raum von Interesse, wie die Größe des Pflanzloches, bzw. des zu Verfügung stehenden Wurzelraums, Überbrückungen von Wurzeln etc. (COSTELLO und JONES, 2003). Eine wesentliche

Maßnahme die neben COSTELLO und JONES (2003) auch KOPINGA (1994) und STRECKENBACH et al. (2008) als erfolgreich erwähnen ist ein modifizierter Tragschichtenaufbau des Weges. KOPINGA (1994) benutzt in seinen Versuchen eine 30 cm dicke Tragschicht aus grobkörnigem Ziegelbruch, der im Vergleich mit sandigen Aufbauten nach fünf Jahren fast kein Wurzelwachstum aufwies. An Stellen wo Sand eingetreten ist, wurde eine leichte Wurzelentwicklung wahrgenommen (KOPINGA, 1994). KOPINGA (1994) empfiehlt den Einbau von grobem Schotter anstatt von Sand als oberste Tragschicht (WEISSTEINER, 2015). Eine Schadensbildung wurde verhindert, da in zehn Jahren in diesen Tragschichtbereichen keine oder fast keine Wurzelentwicklung vorzufinden war. Gründe dafür sind das Abfließen des Kondenswassers, die erhöhte mechanische Resistenz des Substrats sowie einen zu groß zu überbrückenden Abstand zwischen den Einzelkörnern. (KOPINGA, 1994)

STRECKENBACH et al. (2008) vertritt nach seinen Untersuchungen ebenfalls die Meinung, dass das Ersetzen des Sandbettes mit einem grobkörnigeren Substrat eine Minderung der Wurzelaktivität direkt unter der Deckschicht auslöst.

Die auf dem Wurzelraum basierten Maßnahmen inkludieren den Einbau von Wurzelschutzfolien, Wurzelführungen, den Einsatz von Polyurethan-Schaum zum Schutz von existierenden Wurzeln und den Einsatz von speziellen Baumsubstraten im städtischen Raum (WEISSTEINER, 2015).

## 1.2 Forschungsfragen

Die aus dem Stand der internationalen Forschung und den ersten Ergebnissen aus dem Forschungsprojekt erhaltenen Erkenntnissen sind die Basis für den Bau der dreijährigen Versuchsfläche, den geotechnischen Messungen an der Versuchsfläche, der Kalibrierung verwendeter Boden-Wassergehalts-Messsensoren und den Untersuchungen und Annahmen nach der ersten Vegetationsperiode. Daraus ergeben sich folgende relevante Forschungsfragen:

- *Welchen Einfluss haben unterschiedliche Korngrößenverteilungen aus Kantkorn auf das Eindringen von Wurzeln?*
- *Welche Erkenntnisse erhält man durch die ober- und unterirdische Biomasse?*
- *Wie verhält sich das Wasser über die pflanzenverfügbare Vegetationsperiode?*
- *Welche Erkenntnisse erhält man aus dem Bau der Versuchsfläche?*
- *Wie viel Gehölzwurzelmasse bildet sich nach einer Vegetationsperiode bei unterschiedlichen Korngrößenzusammensetzungen?*

Es ist nicht nur die Gehölzwurzelmasse allgemein interessant, sondern auch wie sich diese im bewurzelbaren Bereich verteilt. Deswegen wird die Frage gestellt:

- *Wie verhält sich die horizontale und vertikale räumliche Verteilung der Gehölzwurzeln in den Feldversuchen?*

### **1.3 Ziele**

Die Masterarbeit beschäftigt sich mit Prozessen und Faktoren, welche beim seitlichen Einwurzeln und Wachstum der Gehölzwurzeln in Wegeaufbauten mit Kantkornsubstraten verschiedener Korngrößenmischungen maßgeblich sind. Dafür wird ein dreijähriger Feldversuch angelegt, durch den die Auswirkungen des Einwurzeln von Wurzeln in verschieden gestuften Korngrößenmischungen auf das Substrat untersucht werden soll. Im Zuge dieser Arbeit wird der erste Teil des Feldversuches nach einer Vegetationsperiode erhoben und analysiert. Durch die gewonnenen Informationen über die oberirdische und unterirdische Biomasse soll festgestellt werden, welche Korngrößen das Einwurzeln von Gehölzen (als minimale Produktion von Wurzelmasse) verringern und wie sich die Wurzeln in dem Milieu verhalten. Wurzelscans sollen zusätzliche Erkenntnisse bringen. Um Informationen über die Kondenswasserbildung, die mögliche Speicherung und den Abfluss von Wasser in den Feldversuchen zu erhalten, werden zur Bestimmung des Boden-Wassergehalts Sensoren eingebaut. Diese Bodenwassergehaltssensoren müssen im Labor und am Versuchsssetup kalibriert werden. Diese erhaltenen Informationen ermöglichen Rückschlüsse auf mögliche Faktoren, die das Wurzelwachstum bedingen. Durch Lastplattenversuche sollen geotechnische Randbedingungen erhoben werden, um mögliche Unterschiede zwischen den Versuchsboxen zu erhalten.

## 2. Grundlagen

Die Problemstellung von Schäden an asphaltierten Wegebelägen, im speziellen Treppelwege, durch Gehölzwurzeln erfordert einen interdisziplinären Ansatz. Zum Verständnis der Arbeit sollen im folgenden Kapitel Grundkenntnisse zu beiden Themenbereichen (Kapitel 2.1 und Kapitel 2.2) dargestellt werden.

### 2.1 Wurzeln

Für das Verständnis von Schäden an Verkehrsflächen sind Grundkenntnisse über das Wachstum von Wurzeln von besonderer Bedeutung.

Wurzeln sind in der Regel unterirdische Organe der Pflanzen und dienen der Aufnahme von Wasser und Nährsalzen, der Verankerung des Pflanzenkörpers im Boden, zur Speicherung von Reservestoffen und als Ort für Synthesen (LÜTTGE und KLUGE, 2012).

Die Wurzel differenziert sich vom Spross dadurch, dass sie keine Blätter trägt und es keine Gliederung in Knoten und Internodien gibt. Sie weisen unterschiedliche Funktionen für Vitalität, Wachstum und Standsicherheit der Pflanze auf und sind mit besonderen anatomischen, morphologischen und physiologischen Eigenschaften versehen. Damit diese Funktionen erfolgreich erfüllt werden können, müssen Wurzeln in der Lage sein, den anstehenden Boden bzw. das umgebende Substrat zu erkunden. Außerdem haben sie die Fähigkeit, sich die jeweiligen Standortbedingungen unterzuordnen und sich an Veränderungen anzupassen. (BALDER, 1998)

Die Standortbedingungen können das Erscheinungsbild der Wurzeln stark charakterisieren (KUTSCHERA und LICHTENEGGER, 2002). Die wichtigsten Faktoren sind dabei Bodentemperatur, Bodenfeuchte, Bodenluft, Nährstoffverhältnisse, Schadstoffeinträge sowie Poren- und Skelettanteile. Durch endogene und exogene Faktoren (Wind, Schnee, Erosion) wird das Wurzelwachstum beeinflusst, so dass sich unterschiedliche Wurzelsysteme bilden. (BALDER, 1998)

Als Reaktion auf die Eigenschaften des anstehenden Bodens können sich Wurzeln unterschiedlich ausrichten, sich bestimmten Bereichen zu- bzw. abwenden oder ihre Wachstumsgeschwindigkeit anpassen (DOUSSAN et al. 2003).

Im Folgenden soll kurz ein Überblick über Funktion, Anatomie und Wachstumsprozesse der Wurzeln, der Wurzelarchitektur, der Genetik und des Umwelteinflusses der Wurzelformen sowie über die Interaktion von Wurzeln mit dem umgebenden Substrat gegeben werden.

### 2.1.1 Funktion der Wurzel

Die primäre Funktion der Wurzel ist die Speicherung der zeitweise im Überschuss gebildeten Assimilate vom Spross. Alle weiteren Aufgaben sind aufgrund der Bedeutung der primären Funktion deren Folgeerscheinung. (KUTSCHERA und LICHTENEGGER, 2002)

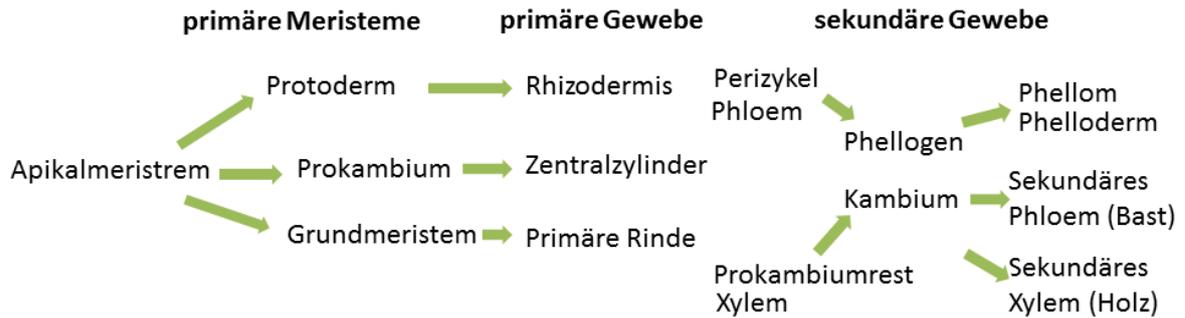
Weitere Aufgaben sind die

- *„Verankerung der Pflanzen im Boden,*
- *die Ausscheidung von Stoffen zur Erschließung von Nährstoffen im Boden,*
- *die Aufnahme, Speicherung und Weiterleitung von Wasser und den darin gelösten Nährstoffen,*
- *die Rückführung von Assimilaten in den Spross,*
- *der Austausch von Luft mit den Spross,*
- *die gelegentliche Assimilation,*
- *die Symbiose mit Pilzen zur besseren Bereitstellung von Stoffen aus dem Abfall der Pflanzen,*
- *die Symbiose mit Bakterien zur Bindung von Luftstickstoff,*
- *die Bildung von Wurzelknospen zur Erhaltung und Vermehrung der Pflanzen und die Erschließung des Bodens durch das Richtungswachstum der Wurzelspitzen“* (KUTSCHERA und LICHTENEGGER, 2002).

### 2.1.2 Anatomie und Wachstumsprozesse

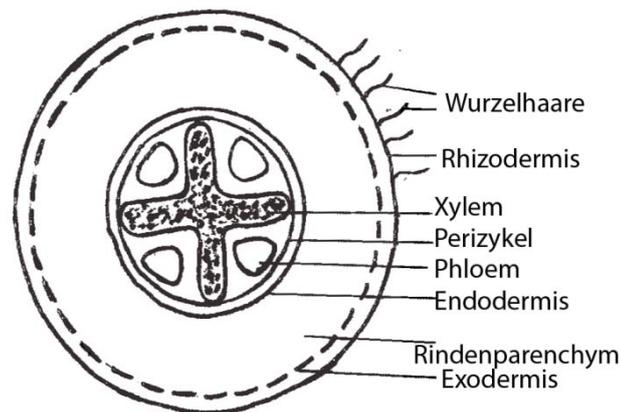
Die Wurzel der Samenpflanzen entsteht aus dem Wurzelpol des Embryos, aus dem sich das Apikalmeristem der Wurzel entwickelt und folgend durch Zellteilung, Zellstreckung und Zelldifferenzierung die Wurzel selbst (HIETZ et al., 2009).

Als Meristem bezeichnet man teilungswillige Zellen, die je nach Lage zwischen Apikal- und Lateralmeristem unterschieden werden. Das Apikalmeristem befindet sich an den Spitzen von Sprossen und Wurzeln, das Lateralmeristem verläuft parallel zu den Seiten des Pflanzenorgans. Protoderm, Prokambium und das Grundmeristem zählen zu den Meristemen, die am Wurzelaufbau beteiligt sind. Diese differenzieren sich zu den primären Geweben: Rhizodermis, Zentralzylinder und primäre Rinde. (HIETZ et al., 2009) Abbildung 1 zeigt die Entwicklung der Wurzel.



**Abbildung 1: Entwicklung der Wurzel (eigene Bearbeitung nach HIETZ et al., 2009)**

Die Rhizodermis bildet das primäre Hautgewebe der Wurzel. Das durch das Dickenwachstum sekundäre Hautgewebe besteht aus Phellogen (Korkkambium), einem Meristem, das nach außen Phellom und nach innen Phelloderm produziert. (HIETZ et al., 2009)



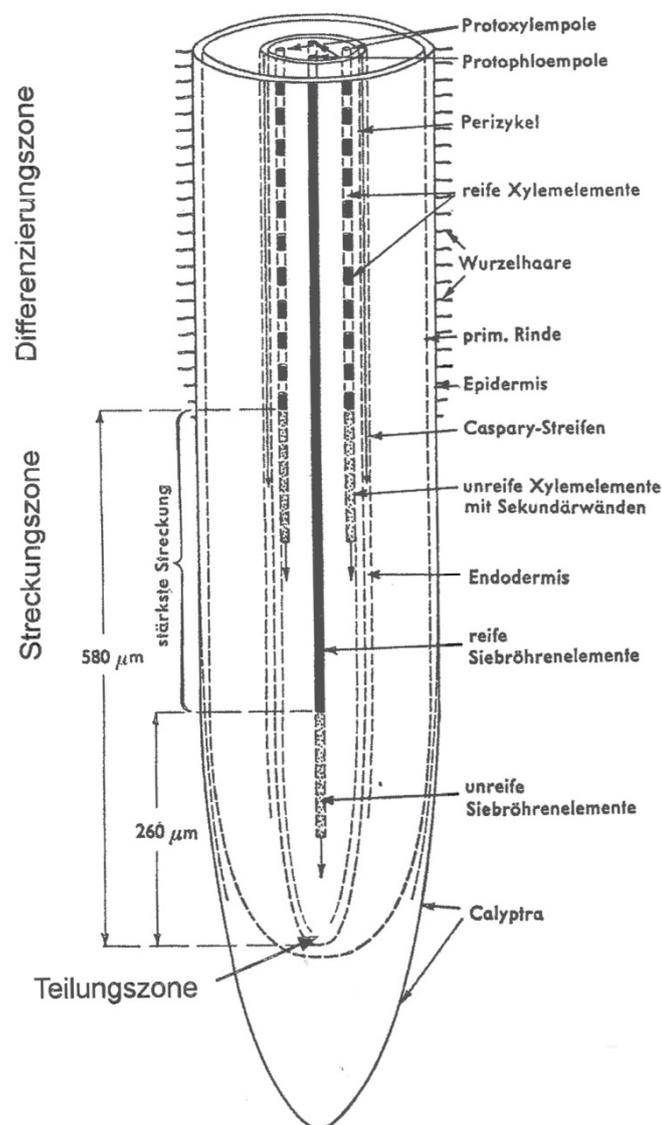
**Abbildung 2: Wurzelbau im Querschnitt (HIETZ et al., 2009; eigene Überarbeitung)**

Abbildung 2 zeigt die primären Gewebe der Wurzel im Querschnitt.

Die äußerste Schicht bildet die Rhizodermis, die keine Abschlussfunktion übernimmt, sondern die Aufnahme von Substanzen aus dem Boden ermöglicht. Sie ist ein schleimiges Gewebe, das die Durchdringung des Bodens beim Wachstum der Wurzel erleichtert. Aus ihr gehen die Wurzelhaare hervor. (BALDER, 1998)

Diese dienen zur Oberflächenvergrößerung und somit zur besseren Aufnahme von Wasser und Nährstoffen. Die Lebensdauer der Wurzelhaare beträgt nur wenige Tage. Unter dieser liegt die primäre Rinde (Rindenparenchym). Sie wird von außen hin von der Exodermis und nach innen von der Endodermis umgeben. Wasser und gelöste Stoffe können bis zur Endodermis eindringen, die ab dort eine Sperre für den Stofftransport belastenden Substanzen darstellt. (HIETZ et al., 2009)

Das Xylem bildet den Kern der Wurzel. Es wird aus verholzten hohlen Fasern aufgebaut, welche sich durch den gesamten verholzten Teil der Pflanze ziehen und dem Wassertransport dienen. Zwischen den Leitbahnen befindet sich das Phloem. Dieses dient zum Transport von Kohlenhydraten vom Ort der Synthese zu den Orten des Verbrauchs oder der Speicherung. Xylem und Phloem werden zusammen als Leitbündel bezeichnet und im Fall der Wurzel als Zentralzylinder. Dieser wird vom Perizykel umgeben, der bei der Entstehung von Seitenwurzeln, der Anlage von Peridermen, dem tertiären Abschlussgewebe der Wurzel und beim sekundären Dickenwachstum von Bedeutung ist. (HIETZ et al., 2009)



**Abbildung 3: Differenzierung der Wurzelspitze (HIETZ et al., 2009; eigene Überarbeitung)**

Das Alter und der Differenzierungsgrad der Wurzel nimmt von der Spitze her Richtung Basis zu, da sich die Wurzel von der Spitze her durch neu gebildetes Gewebe verlängert (HIETZ et al., 2009). Abbildung 3 zeigt den Wurzelbau der Wurzelspitze und die drei

Wurzelzonen. Die Wurzel bildet bereits im Vegetationspunkt durch die Anordnung ihrer Initialzellen eine radiär symmetrische Anordnung. An der Wurzelspitze befindet sich die Wurzelhaube, die Kalyptra welche als Schutz wie eine Kappe den Vegetationspunkt umgibt. Die Kalyptra sondert an den randständigen Zellen durch natürliche Mazeration Schleim ab und wirkt somit beim Vorschub in den Boden wie ein Gleitmittel. Der von der Wurzelhaube umschlossene Vegetationspunkt sorgt für das Spitzenwachstum der Wurzel. Dieser Bereich wird als Teilungszone bezeichnet. In der Teilungszone werden Zellen durch intensive Teilungsaktivität vermehrt, in der Streckungszone finden das Streckenwachstum statt und in der Differenzierungszone beginnt die Differenzierung, Spezialisierung und Übernahme bestimmter Funktionen. Das dadurch stattfindende Längenwachstum wird primäres Wachstum genannt. (LÜTTGE und KLUGE, 2012)

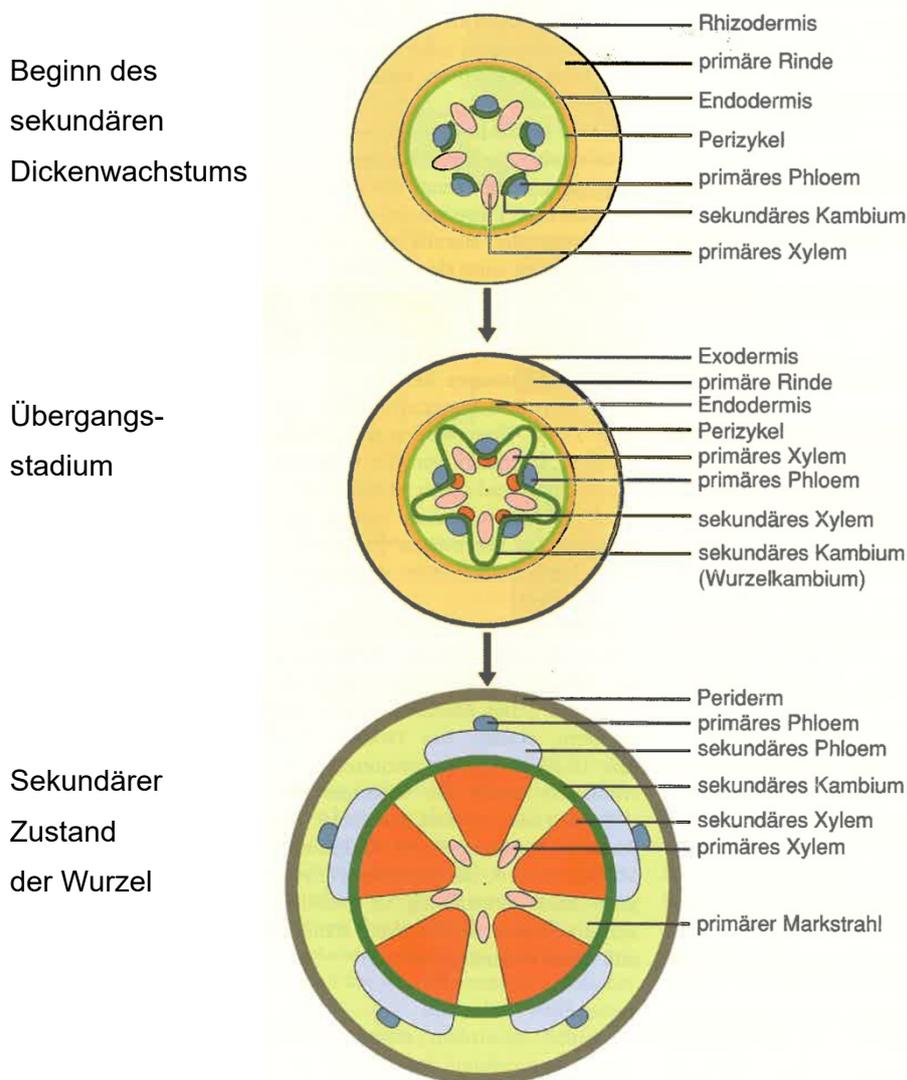


Abbildung 4: Verlauf des sekundären Dickenwachstums einer Wurzel (LÜTTGE & KLUGE, 2012; eigene Überarbeitung)

Um eine sichere Verankerung und Wasserversorgung bei vor allem mehrjährigen Pflanzen zu garantieren, muss auch die Wurzel mit dem Spross mitwachsen. Dabei erfolgt nicht nur Längenwachstum, sondern durch Neubildung von Geweben auch Dickenwachstum, welche man als sekundäres Dickenwachstum bezeichnet. (BALDER, 1998)

Hierbei kommt es, wie in Abbildung 4 ersichtlich, zum Zuwachs im Zentralzylinder. Die zwischen Xylem und Phloem gelegenen Parenchymzellen beginnen sich zu teilen. Es entstehen Kambiumzellen, die nach außen Bastzellen (sekundäres Phloem) und nach innen Holzzellen (sekundäres Xylem) bilden. Die Perizykelzellen über dem Xylempolen teilen sich und schließen sich mit den kambialen Streifen zu einem vollständigen Kambiummantel, dem sekundären Kambium, zusammen. Das ursprüngliche Abschlussgewebe und die primäre Wurzelrinde reißen auf und werden durch ein neues Abschlussgewebe, das Wurzelperiderm, ersetzt. Dieses entsteht aus dem Phellogen, welches nach außen Phellomzellen und nach innen Phelloderm abgibt. (LÜTTGE und KLUGE, 2012)

Seitenwurzeln entstehen ebenfalls aus dem Perizykel. Die Perizykelzellen teilen sich und durchdringen die primäre Rinde. Schließlich bilden sich durch Zelldifferenzierung und -teilung Apikalmeristem, primäres Gewebe und die Wurzelhaube der Seitenwurzel. (HIETZ et al., 2009)

### **2.1.3 Wurzelmorphologie**

BALDER (1998) unterscheidet die Wurzeln nach ihrer Funktion in Skelett- oder Strukturwurzeln, Faserwurzeln und Wurzelhaare. Zu den Skelettwurzeln zählen alle sekundär verdickten, meist langlebigen Wurzeln ohne Sorptionsfähigkeit (Wasseraufnahmefähigkeit). Faserwurzeln sind junge Wurzeln die zur Aufnahme von Wasser, Nährstoffen und Sauerstoff dienen, sie werden dabei von kurzlebigen Wurzelhaaren unterstützt. Im späteren Verlauf entwickeln sich Faserwurzeln zu Strukturwurzeln. Des Weiteren ist eine Einteilung nach ihrem Durchmesser möglich. (BALDER, 1998)

In dieser Arbeit wird die Klassifizierung nach KÖSTLER u.a. (1968) verwendet. Dabei werden die Wurzeln nach ihren Durchmesser wie in Tabelle 1 unterschieden:

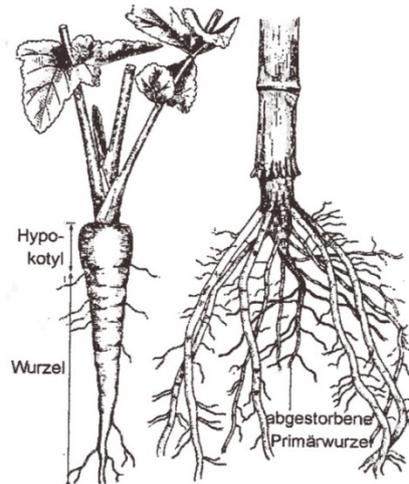
Wurzeltyp	Durchmesser
Feinwurzel	1-2 mm
Schwach(Mittel)wurzel	2-5 mm
Grobwurzel	5- 20 mm

**Tabelle 1: Einteilung der Wurzeln nach ihrem Durchmesser (KÖSTLER u.a., 1968)**

#### **2.1.4 Genetik und Umwelteinfluss auf Wurzeln**

Die genetische Anlage bestimmt die Wurzelform einer Pflanze. Dieser erbliche Bauplan ist im Wesentlichen das Ergebnis einer genetisch fixierten Anpassung an bestimmte Umweltbedingungen. Außerdem beeinflussen auch aktuelle Umweltfaktoren die Ausprägung bestimmter Formen innerhalb der Wandelbarkeit des anlagebedingten Bauplans. Samenpflanzen haben genetisch bedingt eine polbürtige Bewurzelung (Allorhizie) oder eine endogene sprossbürtige Bewurzelung (sekundäre Homorrhizie). (KUTSCHERA und LICHTENEGGER, 2002)

Beim allorhizen Wurzelsystem, wie es bei den meisten Zweikeimblättrigen (Dikotylen) und Nacktsamigen (Gymnospermen) vorkommt, wächst der Wurzelpol direkt zu einer Hauptwurzel aus. Beim homorhizen Wurzelsystem gibt es nur morphologisch gleichwertige, sprossbürtige Wurzeln. Während bei der primären Homorhizie keine Hauptwurzel identifizierbar ist, stirbt sie bei der sekundären Homorhizie frühzeitig ab. (KUTSCHERA und LICHTENEGGER, 2002) Veranschaulicht wird dies in Abbildung 5.



**Abbildung 5: Allorhizie bei Dikotylen (links) und sekundäre Homorhizie bei Monokotylen (rechts) (HIETZ et al., 2009)**

Grundsätzlich strebt jede Pflanze danach, ihre anlagebedingte Bewurzelung zu entfalten. Deswegen sind die typischen Wurzelformen (Herzwurzel-, Pfahlwurzel- und Senkerwurzelsystem) auch besonders gut an jungen Pflanzen zu sehen. (BALDER, 1998) Ändern sich jedoch die Umweltbedingungen, beispielsweise weil die Pflanze sich nicht ihrem optimalen Standortbereich befindet, kommt es zu Abwandlungen der arteigenen Wurzelform. Das Vorkommen von Licht, Wärme, Wasser, Luft und Nährstoffen beeinflusst die Art der Ausbildung der anlagebedingten Wurzelform maßgeblich. (KUTSCHERA und LICHTENEGGER, 2002)

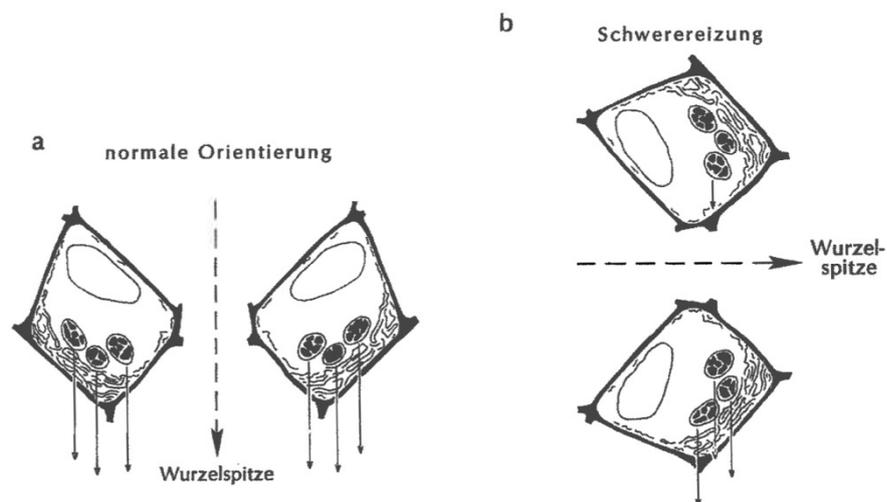
Die Wurzeln wachsen sozusagen der Luft, dem Wasser und den Mineralstoffen des Bodens hinterher und werden so zu den noch unerschlossenen Bodenregionen gelenkt. Diese gerichteten Wachstumsbewegungen nennt man Tropismen. Sie werden durch ungleiche Streckung in verschiedenen Bereichen des Organs bewirkt. Dies passiert durch differenzielles Wachstum oder differentielle elastische Dehnung. Die Tropismen werden durch Umweltfaktoren ausgelöst und ausgerichtet (SCHOPFER und BRENNICKE; 2010).

SCHOPFER & BRENNICKE (2010) unterscheiden bei Wurzeln folgende Tropismustypen, wobei der Gravitropismus für diese Arbeit im besonderen Interesse steht:

- Gravitropismus: Die Wachstumsbewegungen werden durch die Schwerkraft ausgelöst und orientieren sich folglich an der Erdanziehung.
- Thigmotropismus: Die Wachstumsbewegungen werden durch Berührung, wie beispielsweise dem mechanischen Widerstand des Bodensubstrates, gelenkt.
- Thermotropismus: Die Wachstumsbewegungen richten sich nach Wärmegradienten.
- Hydrotropismus: Die Wachstumsbewegungen orientieren sich an Feuchtegradienten.
- Phototropismus: Bei Wurzeln eine negative, vom Licht weg orientierte Wachstumsbewegung.

Beim Gravitropismus erfolgen die Aufnahme des Schwerereizes und die Änderung des Wachstums in der vordersten Zellspitze. Die sensorischen Prozesse finden in den zentralen Columellazellen der Kalyptra statt. In diesen befinden sich Amyloplasten, welche aufgrund ihrer Funktion als Schwerkraftsensoren Statolithen bezeichnet werden. (SCHOPFER und BRENNICKE, 2010)

Wird nun die Wurzel in eine horizontale Position gebracht, sedimentieren die Statolithen auf die untere Zellflanke. Es kommt zu einer Umorientierung des Auxinstroms. Das Auxin fließt nach unten und bewirkt eine Hemmung der Zellstreckung auf der Wurzelunterseite. Durch das ungleiche Wachstum entsteht folglich eine Krümmung nach unten. (SCHOPFER und BRENNICKE, 2010)



**Abbildung 6: Sedimentation der Statolithen (SCHOPFER & BRENNICKE, 2010)**

Abbildung 6 zeigt die Sedimentation der Statolithen in der Wurzelspitze. Bild a) stellt die normale Orientierung der Wurzel nach unten dar, Bild b) die Umorientierung durch den Schwerereiz.

Da in der Natur die oben genannten Einflussgrößen immer im gegenseitigen Zusammenspiel vorkommen, ist eine isolierte Betrachtung schwierig. KUTSCHERA und LICHTENEGGER (2002) gehen davon aus, dass bei Lichteinfluss gleichzeitig auch ein Wärmeeinfluss wirksam ist. Außerdem bildet die Pflanze bei erhöhtem Lichtgenuss durch die gesteigerte Photosynthesewirkung mehr Wurzelmasse, was sich ebenfalls auf das Wachstum auswirkt (KUTSCHERA und LICHTENEGGER, 2002).

Vorwiegend durch das Klima beeinflusste Wurzelformen sind beispielsweise die flachen oder tellerförmigen Wurzelsysteme in hohen Lagen, in nördlichen Breiten oder in Mooren. In höheren Lagen oder bei anstehendem Grundwasser wurzeln aufgrund der klimatischen Bedingungen, dem fehlenden Platz und dem Wasserüberschuss, auch tiefwurzelnde Arten weniger tief. In wärmeren, trockenen Lagen streben die Wurzeln mehr nach unten, sodass hier häufig zylinderförmige Wurzelkörper zu finden sind. (KUTSCHERA und LICHTENEGGER, 2002)

Auch die Textur und Struktur des Bodens beeinflussen das Wurzelwachstum sehr stark. Einerseits durch die bessere oder schlechtere Verfügbarkeit von Wasser und Nährstoffen, andererseits durch die Hemmung des Wurzelverlaufs, wenn eine zu hohe Verdichtung oder ein zu hoher Grundwasserstand das Tiefenstreben der Wurzel verhindert. (KUTSCHERA und LICHTENEGGER, 2002)

Im Fels oder Blockschutt ergibt sich die Verteilung der Wurzeln hauptsächlich aus dem Angebot von Rissen. Manchmal kommt es bei Humusanreicherung in größeren Hohlräumen auch zur Entstehung von Wurzelnestern. (KUTSCHERA und LICHTENEGGER, 2002)

## 2.2 Treppelwege an der Donau

Nach § 2 Abs. 26 des Schifffahrtsgesetzes sind Treppelwege an den Ufern oder neben den Dämmen von Wasserstraßen entlangführende Wege und dienen nicht dem öffentlichen Verkehr (RIS, 2016). Sie wurden angelegt, damit Menschen und Zugtiere hölzerne Frachtschiffe flussaufwärts ziehen können. Diesen Vorgang nannte man treideln. Die Schiffe wurden mit Pferden die über ein Tauwerk mit dem Schiff verbunden waren gezogen. Die Ära der Treidelschifffahrt endete erst nach dem Erscheinen von maschinengetriebenen Schiffen. Bis in die 1980er Jahre war das Betreten dieser Pfade nur auf eigene Gefahr gestattet. (KÖBLER, 1997)

Nach § 36 Abs. 1 des Schifffahrtsgesetzes sind Treppelwege für den Zwecke der Schifffahrt, insbesondere der Hilfeleistung bei Havarien, der Versorgung von Fahrzeugen, der Zu- und Abfahrt für Einsatzkräften, Schiffsbesatzungen, der Schifffahrtsaufsicht, der Gewässeraufsicht, der via donau- Wasserstraßen Gesellschaft mbH, als Versorgungsstraßen für Baustellen in Flussbereichen und zum Zwecke der Kraftwerksunternehmen bestimmt (RIS, 2016).

Die Treppelwege werden heutzutage auch zu touristischen Zwecken genutzt und dienen als Fuß- und Radwege, die vor allem eine Erholungsfunktion übernehmen. Sie bilden einen Teil des rund 430 km langen österreichischen Abschnittes des internationalen Radweges EuroVelo 6 vom Atlantik zum Schwarzen Meer. Der Radweg welcher in Österreich zwischen Passau und Bratislava verläuft, wird jährlich von rund 1,8 Millionen Radfahrer und Radfahrerinnen befahren. Die via donau- Österreichische Wasserstraßen Gesellschaft mbH ist als Erhalter und Verwalter für den Zustand dieses asphaltierten Wegenetzes an Uferbegleit- und Treppelwegen entlang der Donau verantwortlich. (VIADONAU, 2015)

Der Aufbau von Treppelwegen entlang der Donau ist aufgrund ihres langen Bestehens und der ursprünglichen Nutzungsform an kein Regelwerk gebunden. Da sie bis in den 1980er Jahren für die Öffentlichkeit nicht offen waren, sah man auch keinen Grund für eine Standardisierung. Zum Bau und zur Reparatur wurden verschiedenste Materialien aus der Umgebung und verschiedenste Techniken verwendet und angewendet. Meist wurde der bestehende Flussschotter herangezogen. Deswegen kann jeder Abschnitt einen anderen Aufbau vorweisen.

### 2.2.1 Allgemeiner Schichtaufbau

Um trotz der fehlenden Normen ein Verständnis über den Aufbau der Feldversuche zu haben, werden in diesem Kapitel verschiedenste Definitionen von klassischen Schichtaufbauten verglichen und für diese Arbeit und den Versuch adaptiert.

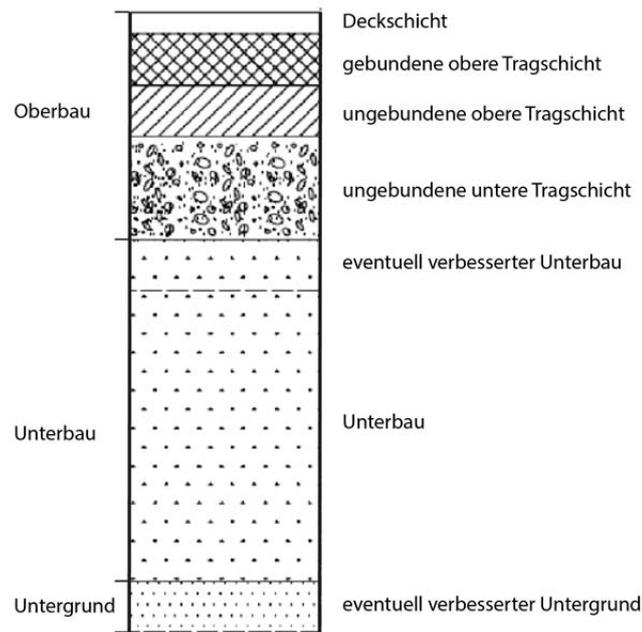
Zur Planung Straßen wird in Österreich die RVS- Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen hinzugezogen. Insbesondere die RVS 03.08.63, für die Oberbaubemessung von Straßenneubauten ohne Zwischenausbau im Erdbereich. Dazu zählen die Ermittlungen der maßgebenden Verkehrsbelastung, grundlegende Annahmen und Baugrundsätze für Konstruktion und Ausführung sowie standardisierte Oberbauausführungen der Straßen. (RVS, 2009)

Die Ermittlung der maßgebenden Verkehrsbelastung ist ausschlaggebend für die notwendigen Mindeststärken der einzelnen Schichten des Straßenoberbaues. Je nach Stärke der Verkehrsbelastung werden daher sieben Lastklassen (S bis VI) unterschieden. Die Bandbreite geht von S für Schwerverkehr mit der höchsten Belastung bis zu den Lastklassen IV für Sammelstraßen, etc., V für Siedlungsstraßen, etc., und VI bei schwachbelasteten Straßen. (RVS, 2009)

Bei den Donautreppelwegen würde es sich um gering belastete Straßen handeln, welche vorwiegend von Radfahrern und Radfahrerinnen und Fußgängern und Fußgängerinnen genutzt werden und nur selten Benützung von Lastkraftwägen aufweisen (RVS, 2009). Für die Donautreppelwege würden sich aufgrund dieser geringen Belastung, die schwächste Lastklasse VI: *Verkehrsflächen mit PKW- und gelegentlichem LKW-Verkehr, ständig benutzte Parkflächen für PKW-Verkehr und gelegentlichem LKW- und Busverkehr* eignen (RVS, 2009).

Um die auftretenden Lasten und Beanspruchungen aufzunehmen, müssen die Verkehrsschichten in mehrere Schichten gebaut werden. Diese Schichten ermöglichen es eine den Beanspruchungen entsprechende, zeitlich und örtlich ausreichende Tragfähigkeit und Standfestigkeit der Straßen und Wege zu erzielen. (STRAUBE und BECKEDAHL, 2000)

Folgend werden Bedeutungen und Notwendigkeiten der unterschiedlichen Schichten eines standardisierten Schichtaufbaus, wie in Abbildung 7, behandelt, als auch deren möglichen verwendbaren Materialien erläutert.



**Abbildung 7: Straßenaufbau angelehnt an RVS 03.08.63 (eigene Bearbeitung)**

Die Stärke der einzelnen Schichten ist abhängig von der ausgelegten Belastung der Straße, der Trag- und Standfestigkeit des Untergrundes und vom verwendeten Material. Die Auswahl des Materials erfolgt in der Regel nach Richtlinien, finanziellen Mitteln, örtlichen Materialangebot, gestalterischen Gesichtspunkten, Belastbarkeit und dem Pflegeaufwand. (SEIPEL, 2011)

Nach den in Österreich geltenden Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (RVS, 2009), nach SEIPEL (2011), STRAUBE und BECKEDAHL (2000) und RICHTER und HEINDEL (2011) wird der Aufbau einer Straße in Untergrund, Unterbau und Oberbau eingeteilt.

### ***Untergrund***

Der Untergrund stellt die Basis des Straßenaufbaus dar und wird auch als Baugrund oder natürlich anstehender Boden/Fels bezeichnet (STRAUBE und BECKEDAHL, 2000). Seine Beschaffenheit beeinflusst wesentlich den darüber liegenden Ober- und Unterbau. Maßnahmen wie Bodenverbesserung und Bodenauswechslung durch grobkörnige Materialien wie Kies oder Sand, können die Tragfähigkeit des Untergrundes verbessern (SEIPEL, 2011).

### **Unterbau**

Der Unterbau wird durch das Auftragen von tragfähigem Füllboden und anschließenden lageweisen Verdichten als ein künstlich hergestellter Erdkörper zwischen Untergrund und Oberbau aufgebaut. Dieser Unterbau ist dann erforderlich, wenn die vorgesehene Höhenlage des Planums mit dem angrenzenden Untergrund nicht zu erreichen ist. (STRAUBE und BECKEDAHL, 2000)

Als das Planum wird der Abschluss des Unterbaus bezeichnet, welcher die Aufgabe hat, das durchsickernde Wasser abzuleiten und den Straßenbau vom Erdbau trennt (SEIPEL, 2011).

### **Oberbau**

Als Oberbau wird der Teil des Straßenaufbaus oberhalb des Planums bezeichnet, welcher aus bis zu drei Tragschichten und einer Deckschicht bestehen kann (STRAUBE und BECKEDAHL, 2000).

### **Tragschichten**

Die Hauptaufgabe der Tragschichten, besteht in ihren lastverteilenden Wirkungen und Übertragungen der auftretenden Lasten und auch der Eigenlast auf den Untergrund (STRAUBE und BECKEDAHL, 2000). Sie liegen zwischen der Deckschicht und dem Unterbau. Unterschieden werden die Tragschichten je nach ihrer Ausführung in gebundenen und ungebundenen Tragschichten (RICHTER und HEINDEL, 2011).

### **Ungebundene Tragschichten**

Nach der RVS (2009) müssen ungebundene Tragschichten den Anforderungen gemäß der RVS 08.15.01 entsprechen. Hierbei ist der geforderte Verformungsmodul, ein entsprechendes Verdichtungsverhältnis, als auch der geforderte Verdichtungsgrad einzuhalten (RVS, 2009).

Um die notwendigen Lastverteilung der Tragschicht zu erreichen, sind die Verspannungen zwischen den Einzelkörnern sowie der Reibung des Korngerüstes entscheidend. Daher müssen Hohlräume in den Tragschichten ohne Bindemittel weitgehend vermieden werden, was durch gut abgestufte und homogene Korngrößen zu erreichen ist. (STRAUBE und BECKEDAHL, 2000)

Als Material für die Tragschichten dienen natürliche Gesteinskörnungen wie Sand, Kies und Schotter, oder auch Recyclingmaterialien wie Schlacke und Betonabbrüchen in unterschiedlichen Größen (RVS, 2009). Die Dicke der Schichten ist abhängig vom

verwendeten Material, der Verkehrsbelastung (Bauklasse) sowie dem vorhandenen Untergrund und dessen Einteilung in Frostempfindlichkeitsklassen. Die Verdichtung der Schichten erfolgt mechanisch durch Walzen oder Rüttler (SEIPEL, 2011).

### ***Ungebunden untere Tragschichten (Frostschuttschicht)***

Nach SEIPEL (2011) und STRAUBE und BECKEDAHN (2000) dient die unterste Tragschicht als Frostschuttschicht. Neben der Lastverteilung müssen je nach Klima, Tragschichten zum Schutz gegen Frost- und Tauschäden eingeplant werden. Gefriert das Wasser, entstehen Eislinsen, welche durch ihr höheres Volumen als Wasser ausdehnen und so die Gesteine im Oberbau verdrängen. Durch die entstehenden Senkungen und Hebungen der Gesteine sowie den Belastungen durch den KFZ-Verkehr, werden die Frostschäden in Form von Schlaglöchern und Rissen in der Fahrbahndecke sichtbar. Um diese Schäden zu vermeiden, werden Frostschuttschichten in 60- 80 cm Frostschutttiefe eingebaut. Diese verhindern das Aufsteigen des Kapillarwassers und leiten durchsickerndes Wasser weiter (Dränschicht). Hierfür werden ausgewählte Gesteinskörnungen verwendet, welche frost- und witterungsbeständig sind. Ideal sind zu diesem Zweck Mineralstoffgemische mit einem hohen Feinkornanteil. Durch dieses feine Material, werden zum einen größere Hohlräume vermieden und zum anderen, erlauben sie es gefrierendem Wasser sich ungehindert auszudehnen, ohne dass es zu größeren Bewegungen und infolgedessen zu Bauschäden kommen kann. (SEIPEL, 2011)

### ***Ungebundene obere Tragschichten***

Ungebundene obere Tragschichten können aus Kies, Schotter oder recyceltem Material bestehen und haben in Österreich den Anforderungen gemäß RVS 08.15.01 zu entsprechen. Sie unterscheiden sich zu Frostschuttschichten hauptsächlich durch die Sieblinienbänder, welche nur geringe Schwankungen in den Korngrößenverteilungen zulassen. Ungebundene obere Tragschichten werden meist auf die Frostschuttschicht eingebaut. (STRAUBE und BECKEDAHN, 2000)

### ***Gebundene Tragschichten***

Durch die Bodenverfestigung wird der Boden dauerhaft gegen mechanische und klimatische Einflüsse verstärkt. Um eine tragfähigere und frostbeständigere Tragschicht zu erhalten, werden hydraulische Bindemittel (z.B. Zement und Kalk) beim Bau der Schicht eingemischt. Diese reduzieren den Wassergehalt in der Tragschicht, verbessern die vorhandene Struktur des Materials und erleichtern die Ausführung von Bauarbeiten. (RICHTER und HEINDEL, 2011)

Unterschieden werden bei den Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln, hydraulisch gebundene Tragschichten und Betontragschichten. Dabei ist die Wahl des Bindemittels

abhängig von der Korngrößenverteilung des Bodens, müssen jedoch in Österreich den Anforderungen der RVS 08.17.01 entsprechen. (RVS, 2009)

Die für diese Masterarbeit interessanten gebundenen Tragschichten sind hydraulisch gebundene Tragschichten (HGT). Sie werden insbesondere bei höher belasteten Verkehrsflächen eingesetzt, sind jedoch auch bei Geh- und Radwegen vorzufinden. Hydraulisch gebundene Tragschichten werden aus kornabgestuften Mineralstoffgemischen, hydraulischem Bindemittel und Wasser hergestellt. Als Bindemittel können Tragschichtbinder, hydraulischer Kalk und Zement verwendet werden, welche in Mischanlagen gemischt, mit LKW zum Einbauort transportiert, und mit Hilfe von Fertigmern schichtweise verteilt werden. (STRAUBE und BECKEDAHL, 2000)

Abschließend erfolgt eine Verdichtung mit dynamisch oder statisch wirkenden Geräten. Wichtig bei der Herstellung einer HGT ist, dass die Temperaturen nicht im frostgefährdeten Bereich liegen. Nach dem Einbau erfolgt die Nachbehandlungszeit, in der die Fläche mindestens drei Tage feucht gehalten werden muss. Dazu stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung: Nassbehandlung, Ansprühen mit Bitumenemulsion, Aufbringen einer wasserhaltenden Abdeckung oder Abdecken der Fläche mit einer Folie. Wird unmittelbar nach der Herstellung einer Schicht, eine weitere überbaut, ist eine Nachbehandlung nicht notwendig. (STRAUBE und BECKEDAHL, 2000)

### **Deckschicht**

Die Deckschicht bildet die oberste Schicht des Straßenaufbaus (SEIPEL, 2011). Ihre Aufgabe ist es eine gut befahrbare Oberfläche zu schaffen sowie einen wasserdichten Abschluss des Oberbaus zu bilden. Durch die Neigung der Deckschicht soll das seitliche Abfließen des Niederschlagswassers gewährleistet werden. Man unterscheidet Deckschichten ohne Bindemittel, bituminöse Decken oder Asphaltdeckschichten, Betondecken und Pflasterdecken. (STRAUBE und BECKEDAHL, 2000)

In Hinblick auf die Verwendung bei Treppelwegen werden nur die Asphalt-, Beton- und wassergebundene Decken behandelt.

### **Asphaltdecken**

Asphalt ist ein natürlich vorkommendes, meist aber künstlich hergestelltes Gemisch aus Bitumen (Bindemittel), Mineralstoffen und Zusätzen. Asphaltdecken oder Bituminöse Decken werden bevorzugt für Straßen für den Kfz-Verkehr eingesetzt, finden sich aber auch auf Geh- und Radwegen oder auf Parkplätzen. (RICHTER und HEINDEL, 2011)

Asphaltbeton oder Splittasphaltemastix werden als kombinierte Tragdeckschicht oder als Deckschicht eingebaut. Da sie verdichtet werden, bezeichnet man sie auch als

Walzasphalt. Gussasphalt wird in der Regel nicht verdichtet und ausschließlich als Deckschicht eingesetzt. (REICHWEIN, 2002)

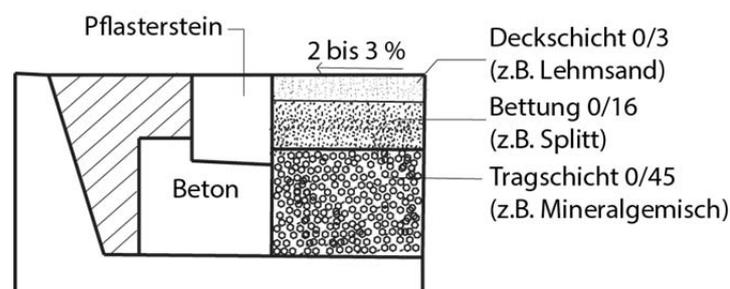
### **Betondecke**

Betondecken werden aus einem Gemisch aus Zement, Wasser, mineralischen Zuschlagstoffen und, wenn notwendig Zusatzstoffen hergestellt. Sie sind starre Oberflächenbefestigungen, welche besonders dauerhaft und formstabil sind und werden insbesondere bei Straßen und Radwegen im ländlichen Raum eingebaut. Aufgrund ihrer Einbaudicke und Festigkeit, weisen sie eine hohe lastverteilende Wirkung auf. So übernehmen sie die Aufgaben der Deckschicht und teilweise der Tragschicht. Durch die praktisch fehlende Relaxationsfähigkeit des Betons, muss die Fahrbahn in Platten mit begrenzten Abmessungen aufgeteilt werden um Rissbildungen zu vermeiden. (STRAUBE und BECKEDAHN, 2000) Eine Durchwurzelbarkeit ist nicht gegeben (REICHWEIN, 2002).

### **Deckschichten ohne Bindemittel**

Deckschichten ohne Bindemittel werden aus Kies-Sand- und Splitt-Sand-Gemischen auf Tragschichten ohne Bindemittel eingebaut (siehe Abbildung 8). Sie finden oft Anwendung im ländlichen Wegebau, wie zum Beispiel bei land- und forstwirtschaftlichen Wegen sowie Geh- und Radwegen und sind eine der ältesten Belagsarten. (SEIPEL, 2011)

Sie erreichen ihren Zusammenhalt durch einen Anteil an Feinstoffen und Feuchtigkeit und werden deshalb auch als wassergebundene Wegedecken bezeichnet. Wassergebundene Decken werden korngestuft aufgebaut, das heißt eine Abnahme des Größtkorns von unten nach oben, um ihre Standfestigkeit dauerhaft zu gewährleisten. Sie können tendenziell durchwurzelt werden, sind im Hinblick auf Schäden durch Baumwurzeln aufgrund des begrenzten Einsatzbereiches und der Anpassungsfähigkeit des Materials jedoch als wenig problematisch einzuschätzen. Bei Anhebungen entstehen keine Stolperkanten. (REICHWEIN, 2002)



**Abbildung 8: Schichtaufbau einer wassergebundenen Deckschicht (eigene Bearbeitung nach SEIPEL, 2011)**

## 3. Methodik

### 3.1 Standort Großenzersdorf

Großenzersdorf liegt im Osten von Wien. Der Feldversuch wurde in der Versuchswirtschaft der Universität für Bodenkultur Wien in Großenzersdorf angelegt.

#### 3.1.1 Klima

Die Versuchswirtschaft liegt im pannonischen Klimagebiet und ist durch heiße, trockene Sommer und kalte, schneearme Winter geprägt. Die mittlere Jahrestemperatur beträgt 9,8 °C, die mittlere Niederschlagssumme 545 mm und die durchschnittliche relative Luftfeuchte 75%. Die Versuchswirtschaft liegt in offener, windiger Lage. (DNW BOKU, 2016a)

Abbildung 9 zeigt den durchschnittlichen Niederschlag und Temperatur von Großenzersdorf über ein Jahr verteilt. Die Balken der Niederschläge lassen erkennen, dass es in den Sommermonaten Juni und Juli mit jeweils 75 mm zu den höchsten und im Jänner mit 35 mm zu den niedrigsten Niederschlägen kommt. Bei den Temperaturen verhält es sich ähnlich. Die heißesten Monate sind Juli und August mit durchschnittlich 20,1 °C und 19,6 °C. Der kälteste Monat ist der Jänner mit durchschnittlich -0,7 °C.

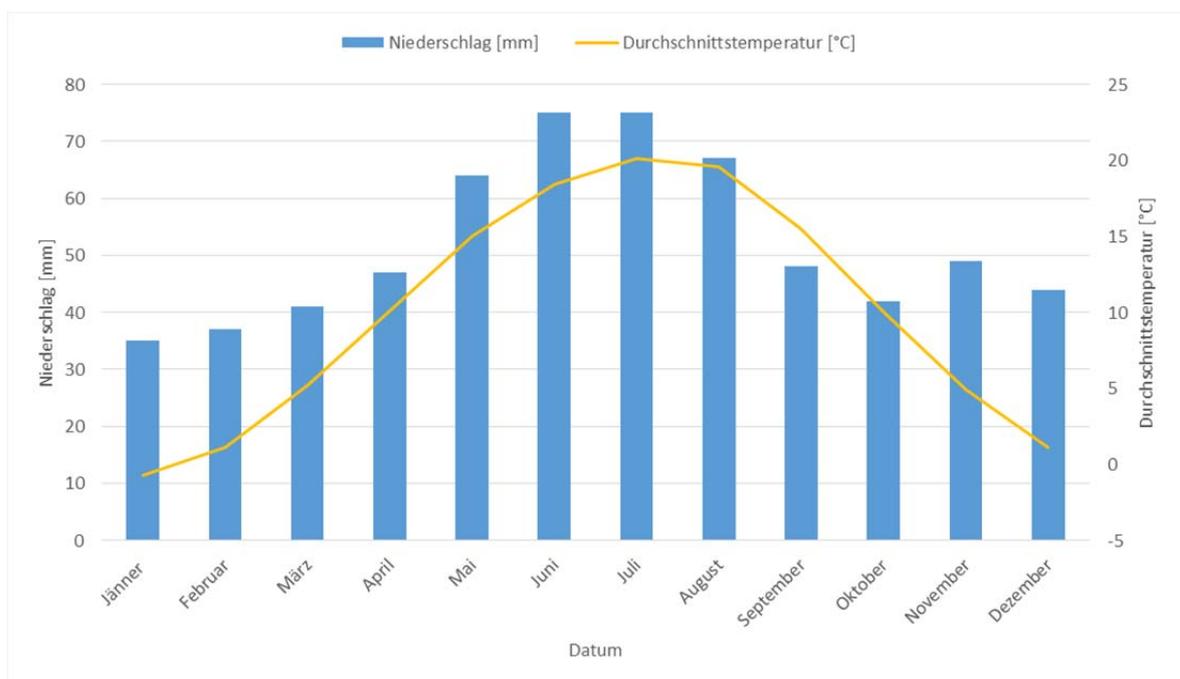
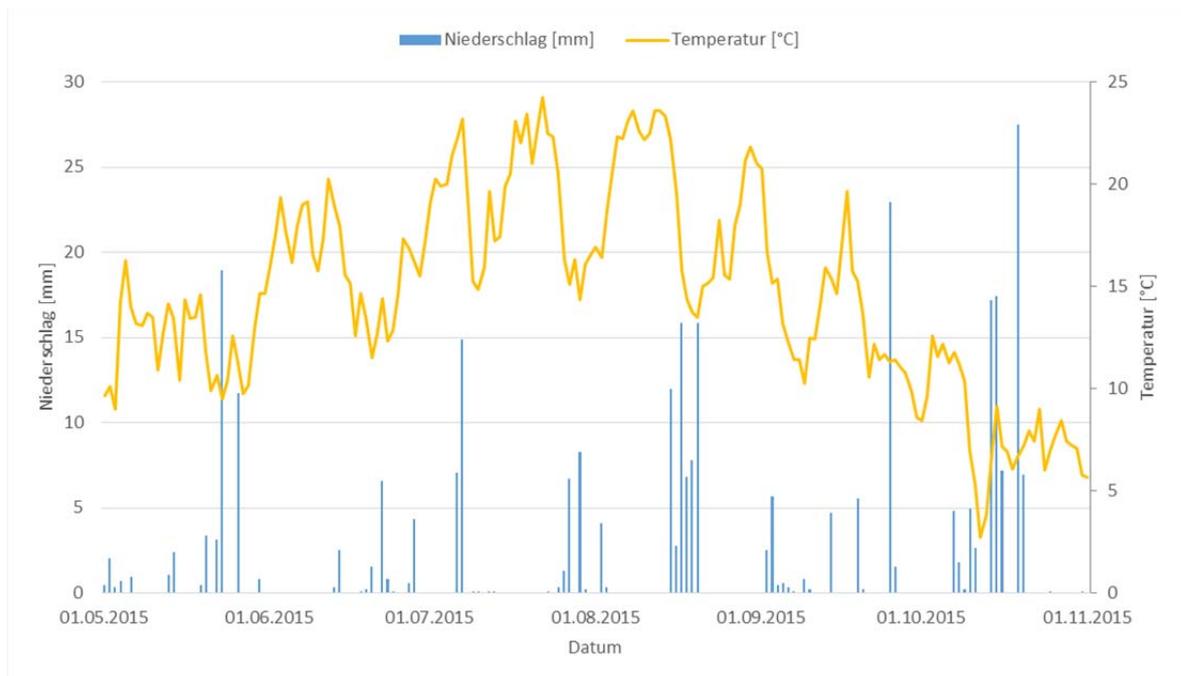


Abbildung 9: Klimadiagramm für Großenzersdorf (CLIMATE-DATA.ORG, 2016)

Im Gegensatz dazu zeigt Abbildung 10 den Niederschlags- und den Temperaturverlauf der Wetterstation Raasdorf, welche neben der Versuchswirtschaft liegt für den Untersuchungszeitraum. Im Vergleich zum einjährigen Durchschnitt, gab es in den niederschlagsreichen Monaten Juni und Juli weniger Niederschlag mit nur 14,4 mm und 32,9 mm/m<sup>2</sup> als in den anderen Monaten von Mai bis November. Überhaupt waren alle Monate von Mai bis September überdurchschnittlich trocken. Nur im Oktober gab es aufgrund einiger Starkniederschläge mit 75,9 mm überdurchschnittlich mehr Niederschlag als in anderen Jahren mit 42 mm.

Die durchschnittlichen Temperaturen zeigten in den Monaten Juni, Juli, August und September auch höhere Werte als der übliche Jahresdurchschnitt. Juli und August waren in Großenzersdorf mit 23,3 °C und 23 °C sogar 3 °C wärmer als sonst.



**Abbildung 10: Niederschlag und Temperatur der Wetterstation Raasdorf von Mai bis November 2015 (DNW BOKU, 2016b)**

### 3.1.2 Boden

Der Boden in der Versuchswirtschaft Großenzersdorf ist ein Tschernosem der Praterterrasse und besteht aus schluffigen Lehm, wobei der Schluffgehalt im Unterboden stark zunimmt. Er ist tiefgründig und mittelschwer. Der Oberboden ist humos und stark lehmig. (DNW BOKU, 2016a)

### 3.2 Feldversuche

Das Ziel der Feldversuche ist es, die Auswirkungen von Kantkornsubstraten mit verschiedenen Korngrößenmischungen auf das Einwurzeln bzw. auf das Wurzelwachstum von Gehölzen zu untersuchen, sowie Erkenntnisse aus dem Aufbau der Versuchsfläche zu erlangen. Durch die gewonnenen Informationen über die oberirdische und unterirdische Biomasse soll festgestellt werden, welche Korngrößen das Einwurzeln von Gehölzen (als minimale Produktion von Wurzelmasse) verringern und wie sich die Wurzeln in dem Milieu verhalten.

Die Versuchsanordnung ist so geplant, dass die Wurzeluntersuchungen in verschiedenen Zeitabständen an denselben Kantkornsubstraten durchgeführt werden können. Damit ist eine kontinuierliche Überprüfung des Zustandes über drei Vegetationsperioden hinweg gewährleistet. Das Wurzelwachstum kann in den verschiedenen Substraten durch unterschiedliche Faktoren beeinflusst werden. Zu den maßgebenden Faktoren gehören die Körnung der Substrate und damit verbunden der Boden-Wasserhaushalt, sowie die Durchlüftung des Bodens. Zur Quantifizierung des Bodenwasserhaushaltes wurden sechs Versuchsboxen mit Boden-Wassergehaltssensoren ausgestattet, um Informationen über die eventuelle Entstehung von Kondenswasser und deren Speicherung, bzw. Abfluss im Substrat nachvollziehen zu können.

Die Feldversuche unterscheiden sich in zwei unterschiedlichen Untersuchungsmethoden, welche in Folge als Wegeaufbau-Versuche und Substrat-Versuche bezeichnet werden. Die Wegeaufbau-Versuche simulieren einen systemischen Aufbau einer Weganlage (bestehender Untergrund, Oberbau- untere Tragschicht und obere Tragschicht- und Deckschicht). In diesen Versuchsanordnungen sind die oberen Tragschichten mit fünf verschiedenen Korngrößenmischungen sowie einer hydraulisch stabilisierten Tragschicht ausgebildet und mit einer Deckschicht aus Beton verschlossen. Die Wegeaufbauversuche dienen dazu, den Einfluss der Korngrößenmischungen und den damit verbundenen Einfluss des Boden-Wasser Haushalts (Bildung von Kondenswasser zwischen Deck- und oberer Tragschicht) auf das Wurzelwachstum zu bestimmen. Die Substrat-Versuche liefern Informationen zur generellen Auswirkung von Kantkornsubstraten mit unterschiedlichen Korngrößen auf das Wurzelwachstum unter Vernachlässigung des Einflusses von einer möglichen Kondenswasserbildung (keine Deckschicht). Beide Versuchsaufbauten liefern Informationen über den Einfluss der verschiedenen Faktoren auf das Wurzelwachstum in den unterschiedlichen Kantkornsubstraten.

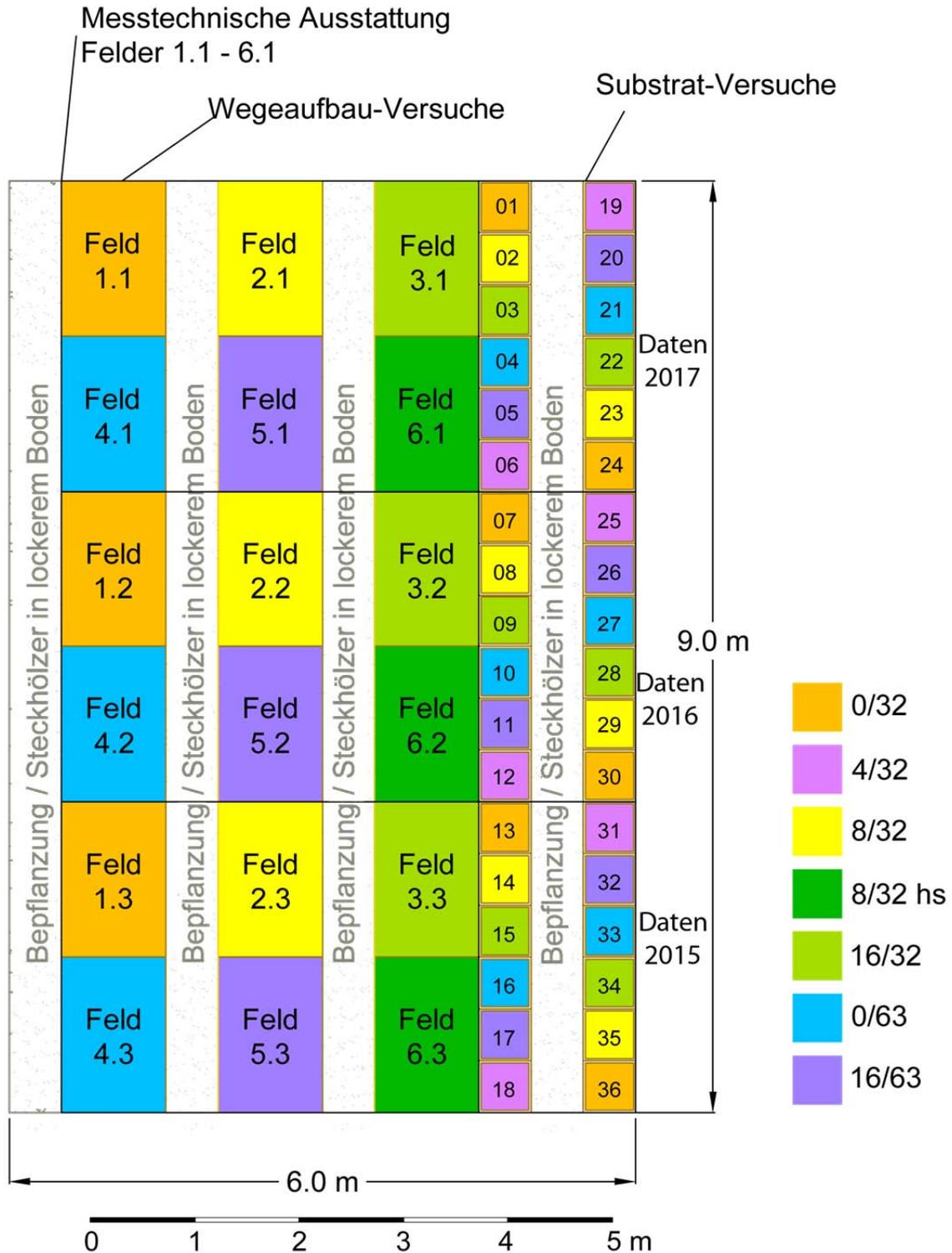


Abbildung 11: Übersichtsplan der Versuchsanlage (WEISSTEINER, 2015; eigene Überarbeitung)

Die Versuchsfläche hat eine Dimension von 6 x 9 m (Abbildung 11). Damit die kleinklimatischen Verhältnisse möglichst ähnlich zu denen in Natura sind, wurden die Versuchsboxen in den Boden gesetzt. Dafür wurde eine 0,8 m tiefe Baugrube

ausgehoben. Die untersten 25 cm wurden mit 0/63 Kantkorn befüllt und mit einer Rüttelplatte verdichtet. Die obersten 5 cm wurden dabei als 0/32 ausgeführt um einen möglichst planen Untergrund zu erhalten und Unebenheiten zu vermeiden. Diese untere Tragschicht soll vor allem als Dränschicht dienen. Ein Vlies (200g/m<sup>2</sup>) trennt die untere und obere Tragschicht, welches die Durchmischung der beiden Schichten verhindern soll (Abbildung 12).



**Abbildung 12: Arbeitsschritte zur Herstellung der unteren Tragschicht der Versuchsfläche mit 25 cm 0/63 KK und 5 cm 0/32 KK und Ausbringung des Dränvlieses (Großenzersdorf, 27.-30.4.2015)**

### **3.2.1 Versuchsaufbau**

Im Rahmen der Wegeaufbau-Versuche wurden 1,5 x 1 m und 0,5 x 0,5 m große Boxen bei den Substratversuchen mit einer Tiefe von 0,5 m angefertigt. Die Boxen bestanden wie in Abbildung 13 und Abbildung 11 ersichtlich, an drei Seiten aus Schalungstafeln. Auf der zur Gehölzpflanzung zugewandten Seite wurde die Box mit einer Baustahlmatte (Stärke 8 mm, Maschenweite 10 x 10 cm), einem Drahtgitter (Stärke 0,7 mm, Maschenweite 13 x 13 mm) und einer verstärkten Kokosmatte mit Hilfe von U-Hacken und Draht befestigt. Die Teile der Boxen wurden mit Hilfe von Holzbohlen zusammengeschaubt. Die Baustahlmatte fungiert hier als stabilisierendes Element. Das Drahtgitter dient vor allem zur Verkleinerung der Maschenweite, die Kokosmatte hingegen erfüllt eine Trennfunktion zwischen Wegebau-Substrat und Pflanz-Substrat. Die flächige Kokosmatte stellt kein Hindernis für die Durchwurzelbarkeit der Gehölzwurzel dar.

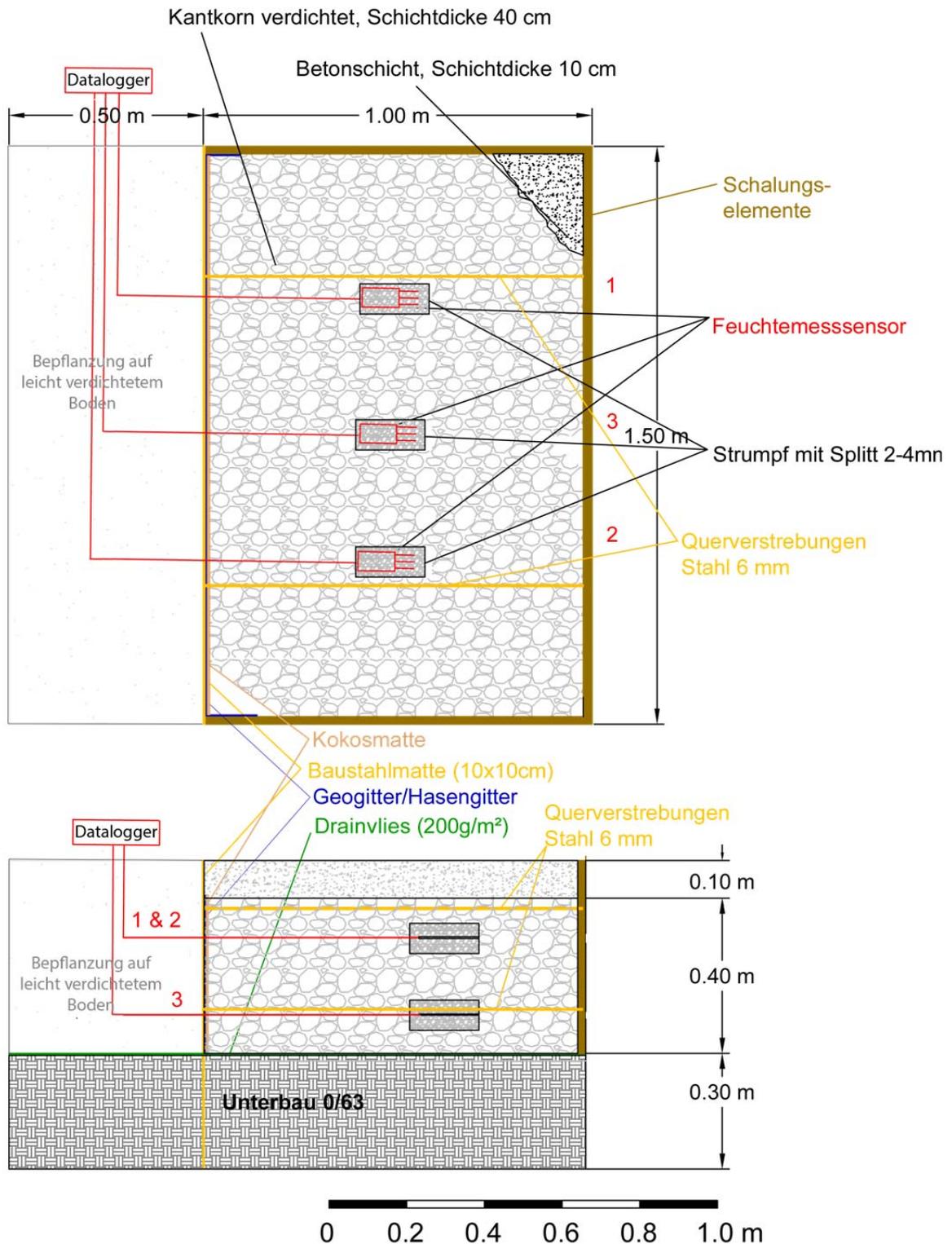
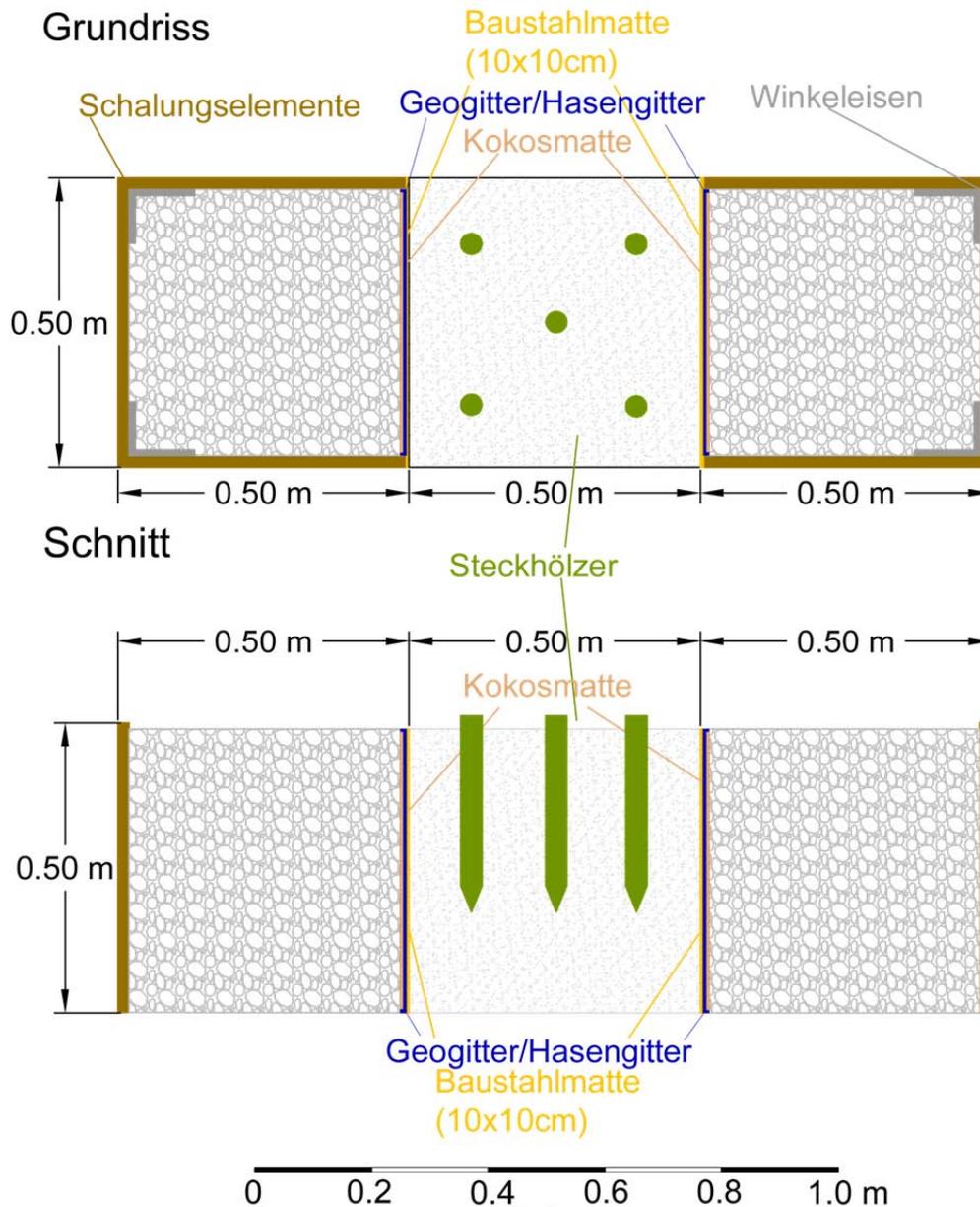


Abbildung 13: Grundriss und Schnitt der Wegeaufbau-Versuchsboxen mit unterer Tragschicht, Bodenwassergehaltssensoren nur in Boxen 1.1.-6.1. (WEISSTEINER, 2015; eigene Überarbeitung)



**Abbildung 14: Grundriss und Schnitt der Substratversuchsboxen ohne unterer Tragschicht (WEISSTEINER, 2015; eigene Überarbeitung)**

Bei den Wegeaufbau-Versuchsboxen wurde die Baustahlmatte und die gegenüberliegende Schalungstafel wurden mit Bewehrungsstahl (BST 550) in 6 mm Stärke an vier Stellen zusammengespannt. Hierfür wurden Löcher in die Längswand gebohrt, das Bewehrungsstahl durch die Box geführt und auf beiden Außenseiten im rechten Winkel gebogen und dadurch fixiert. Die fertigen Boxen wurden wie in Abbildung 15 ersichtlich, geradlinig in Reihen mit 0,5 m Abstand für die Gehölzpflanzstreifen, direkt auf das Vlies gestellt und miteinander verschraubt. Die Substratversuchsboxen wurden „zueinander schauend“ angeordnet, wobei sich der

gemeinsame Gehölzstreifen in der Mitte der beiden Boxenreihen befindet. Die einzelnen Schalungsteile wurden hier mit Winkeleisen aneinandergeschraubt. Außerdem wurde kein Bewehrungsstahl zur Stabilisierung der Boxen verwendet.



**Abbildung 15: Bau von Wegeaufbau-Versuchsboxen mit Baustahlmatte, Drahtgitter, Kokosmatte und Bewehrungsseisen in Reihen (Großenzersdorf, 27.-30.4.2015)**

Die Wegeaufbau- Versuchsfelder wurden wie in Abbildung 16 und Abbildung 17 zu sehen in drei Wiederholungen mit fünf Kantkornsubstraten unterschiedlicher Korngrößenmischungen (0/32, 8/32, 16/32, 0/63, 16/63) sowie einem hydraulisch stabilisierten Kantkornsubstrat (8/32) befüllt und verdichtet. Das hydraulisch stabilisierte Substrat (8/32) wurde mit 3% Zementzugabe stabilisiert. Die Schichtstärke der oberen Tragschicht beträgt 40 cm und wurde in zwei Lagen zu jeweils 20 cm mit einer Rüttelplatte leicht verdichtet. Zeitgleich wurden die Gehölzpflanzstreifen befüllt und leicht verdichtet, damit wurde ein Ausbuchten der Boxen verhindert. Die zweite Ebene des Bewehrungsstahls wurde erst nach dem Verdichten der ersten Lage eingebaut.

Die Substratversuchsboxen wurden in sechs Wiederholungen mit sechs Substraten angelegt (36 Boxen) und anstatt eines hydraulisch stabilisierendem Substrates wurde ein Substrat mit der Korngrößenzusammensetzung von 4/32 angewendet. Aufgrund der

geringen Größe der Boxen wurde anstatt einer Rüttelplatte ein Handverdichter bestehend aus zwei Schlägel verwendet.



**Abbildung 16: Lagenweise Befüllung und Verdichtung der Wegeaufbau-Versuchsboxen (Großenzersdorf, 27.-30.4.2015)**



**Abbildung 17: Einbau und lagenweise Befüllung der Substratversuchsboxen (Großenzersdorf, 27.-30.4.2015)**



**Abbildung 18: Fertig befüllte Versuchsanlage mit allen Tragschichten und Gehölzpflanzstreifen (Großenzersdorf, 27.-30.4.2015)**

In Abbildung 18 ist die fertig befüllte Versuchsanlage zu sehen. Die Verdichtungsergebnisse der unteren Tragschicht, sowie der oberen Tragschicht wurden mit einer dynamischen Lastplatte ermittelt, sie wurde in Kapitel 3.2.3. erläutert.

Aufbauend auf die obere Tragschicht wurde bei den Wegeaufbau-Versuchen eine 10 cm starke Deckschicht aufgebracht. Dafür wurde die Betonmischung C25/30 XC1 GK 16 F45 CEM II 42,5N verwendet. Hierfür wurden pflanzseitig Schalbretter angebracht, um ein Ausrinnen zu verhindern und die Boxen mit Fertigbeton gefüllt und glattgestrichen (Abbildung 19). Als Deckschicht wurde Beton an Stelle von Asphalt gewählt, weil er im Vergleich zu Asphalt sich kleinräumig besser verarbeiten lässt. Die Betonschicht wirkt wie die Asphalttschicht als Kapillarsperre, hat jedoch eine höhere Wärmeleitfähigkeit (leichteres Aufheizen), welche bei der Bildung von Kondenswasser zu berücksichtigen ist. Entgegenwirkend zur höheren Wärmeleitfähigkeit fungiert die hellere Farbe des Betons, welche Strahlung stärker reflektiert und die Temperatur des Materials weniger steigen lässt.

Anstatt einer Deckschicht wurde bei den Substratversuchsboxen eine 50 cm dicke obere Tragschicht eingebaut.



**Abbildung 19: Einbringung der Beton Deckschicht (Großenzersdorf, 27.-30.4.2015)**

Die Gehölzpflanzstreifen wurden mit Weiden- und Pappelsteckhölzern bepflanzt (Abbildung 20). Als Mutterbäume wurden Exemplare von Energieholzplantagen ausgewählt, um ein möglichst schnelles Wachstum zu ermöglichen. Bei den Wegeaufbau-Versuchsboxen wurden im Durchschnitt acht Stück Steckhölzer pro Laufmeter eingebracht, bei den Substrat-Versuchsboxen im Durchschnitt 14 Steckhölzer pro Laufmeter. Diese hatten eine mittlere Länge von 40 cm und Durchmesser von 1,5 cm bis 5 cm. Die Ernte der Steckhölzer erfolgte in der Vegetationsruhe, Ende Februar. Diese wurden bis zum Pflanzzeitpunkt in einer Kühlkammer, lichtgeschützt und feucht gelagert. Eine Anfangsbewässerung in den ersten fünf Monaten sollte einen schnellen Wuchserfolg gewährleisten und war aufgrund des trockenen und heißen Sommers notwendig.



**Abbildung 20: Einschlagen der Steckhölzer (Großenzersdorf, 27.-30.4.2015)**

Die Versuchsfelder werden nach je einer Vegetationsperiode (Oktober 2015, Oktober 2016 und Oktober 2017) abgetragen und deren Wurzelwachstum (Biomasse, räumliche Verteilung) untersucht. Jene sechs Wegeaufbau- Versuchsfelder deren Abbau im Oktober 2017 geplant sind wurden jeweils mit drei Boden-Wassergehaltssensoren (Hydraprobe II, Stevens) ausgestattet, welche versetzt in zwei verschiedenen Höhen eingebracht wurden (Abbildung 21). Zwei wurden jeweils 5 cm unter der Deckschicht und einer 5 cm über dem Boxenboden eingebaut. In die Box der hydraulisch stabilisierten oberen Tragschicht kamen nur zwei Sensoren zum Einsatz. Zusätzlich wurde je ein Sensor in das Pflanzsubstrat eingebaut. Insgesamt wurden somit 20 Boden-Wassergehaltssensoren eingebaut. Sie sollen Auskunft über den Zusammenhang der verschiedenen Substrate, des Bodenwasserhaushalts und des Wurzelwachstums geben.

Da die verwendeten Korngrößen für eine direkte Messung der Bodenwassergehaltssensoren zu grob waren, wurde Splitt (2/4) in einem 8 cm starken Mullstrumpf eingefüllt und der Sensor darin eingebettet. Diese Konstruktion wurde dann in die oberen Tragschichten der Boxen in die entsprechenden Tiefen eingebaut.



**Abbildung 21: Einbau der Wassergehaltssensoren in 45 cm und 15 cm Tiefe (Großenzersdorf, 27.-30.4.2015)**

Der Bau der Versuche fand in der Kalenderwoche 18 (27.04.2015-30.04.2015) im Rahmen einer Lehrveranstaltung der Universität für Bodenkultur statt. Vorarbeiten wie die Herstellung des Aushubs und den Einbau des Unterbaus wurden bereits vorher durchgeführt.

Erste Untersuchungen der ersten zwölf Substratversuchsboxen und sechs Wegeaufbau-Versuchsboxen durch Öffnen erfolgten im Oktober und November 2015 im Zuge dieser Masterarbeit.

### **3.2.2 Kalibrierung der Messsensoren**

Um Informationen über die Kondenswasserbildung, die mögliche Speicherung und dem Abfluss von Wasser in den Wegeaufbau-Versuchen zu erhalten, wurden zur Bestimmung des Boden-Wassergehalts die Sensoren Hydra-Probe II der Firma Stevens in verschiedenen Tiefen in die Tragschichten der Wegeaufbau-Versuchsboxen und in den Bodenkörper der Gehölzpflanzstreifen eingebaut. Die Sensoren sollen Aufschluss über den Bodenwasserhaushalt in verschiedenen Höhen im Verlauf der Zeit liefern. Dies ermöglicht Rückschlüsse auf mögliche Faktoren die das Wurzelwachstum bedingen.

Die Sensoren funktionieren dabei ähnlich dem Prinzip der TDR- Technologie (Time Domain Reflectometry), bei der die Laufzeit von hochfrequenten, elektromagnetischen Wellen zwischen zwei oder mehreren Elektroden gemessen wird. Die Geschwindigkeit, mit der sich der elektromagnetische Puls in einem Medium ausbreitet, ist abhängig von dessen dielektrischer Leitfähigkeit (Durchlässigkeit für elektrische Felder). Die Dielektrizitätskonstante von Wasser liegt beispielsweise bei einem Wert um 80 und ist erheblich größer als die Leitfähigkeit der Luft mit ca. 1 und der Bodenbestandteile (<3-5). Somit wirkt sich der Wasseranteil stark auf die Dielektrizitätskonstante des Bodens aus. Die durch die Laufzeit indirekt bestimmte Dielektrizitätskonstante ist deshalb ein Maß für den Wassergehalt des Bodens. (SOKOPP, 2012)

Das Messprinzip der HydraProbes unterscheidet sich von TDR-, Kapazitäts- und Frequenz- Bodensensoren durch die Berücksichtigung der Energiespeicherung und des Energieverlustes über die Bodenfläche in Verwendung einer 50 MHz-Funkfrequenzwelle. Im Gegensatz zu anderen Bodensensoren trennt der Sensor die Energiespeicherung (reale Dielektrizitätskonstante) von den Energieverlusten (imaginäre Dielektrizitätskonstante). Das genaue Analyseverfahren des dielektrischen Spektrums der HydraProbe hilft etwaige Fehler in der Bodenfeuchtemessung wie Temperatureffekte, Fehler aufgrund der Salinität und der Bodenart zu vermindern. (STEVENS, 2016)

Das Verhältnis zwischen dem aktuellen volumetrischen Wassergehalt ( $\theta_v$ ) zum elektrischen Output der Probe (Dielektrizitätskonstante), kann sich wesentlich durch

Schwankungen der Parameter wie der Bodentextur, des Gehalts an organischen Stoffen, des Bodenfeuchtebereichs, der elektrischen Leitfähigkeit und der Temperatur verändern. Daher ist eine vom Hersteller bereitgestellte Kalibrierungsfunktion oft unzureichend und zwingt somit den Benutzer eine anwendungsspezifische Kalibrierung durchzuführen. (LOISKANDL et al., 2010)

### **Methodik der Kalibrierung**

Die Kalibrierung der HydraProbes wurde am Institut für Hydraulik und landeskultureller Wasserwirtschaft (IHLW) durchgeführt und ist an YOUNG et al. (1997) angelehnt. Hierfür wurde eine Substratprobe, die auf Gewichtskonstante bei 105°C getrocknet wurde, in einem Zylinder (9,2 cm Innendurchmesser und 15 cm Höhe) auf 6,2 cm, der Elektrodenlänge, eingefüllt und verdichtet (Abbildung 22). Die Höhe der Substratprobe und die Sensorlänge sollte gleich sein um eine gleichmäßige Durchschnittsberechnung gewährleisten zu können.



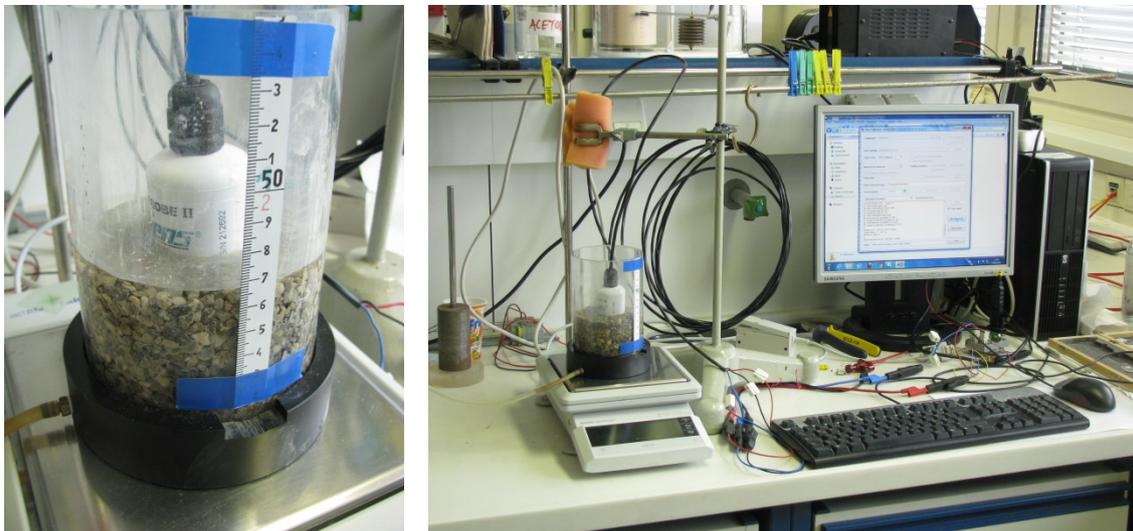
**Abbildung 22: Befüllung des Zylinders mit der Substratprobe (Wien, 15.05.2015)**

Kalibriert wurde das Substrat mit der Korngrößenverteilung 0/32, wobei auch dieses auf eine Größtkorndurchmesser von 10 mm gesiebt wurde. Grund dafür ist der Messbereich der Sensoren (zwischen den Metallstäben) der eine Obergrenze für das Größtkorn darstellt. Neben diesem Substrat wurde auch der Granit- Splitt (2/4), der für den Einbau der Sensoren in den Wegeaufbau-Versuchsboxen verwendet wurde und der Erde der Gehölzpflanzstreifen kalibriert. Der HydraProbe-Sensor wurde senkrecht in das Substrat eingeführt, auf eine Waage platziert und Wasser wurde durch dynamische aufwärts Infiltration mit einer einstellbaren Pumpe durch den Boden des Zylinders zugeführt (Abbildung 23). Das Gewicht und die Sensorwerte wurden gleichzeitig von einem

Programm aufgezeichnet, das gepaarte Werte des durchschnittlichen volumetrischen Wassergehalts (gravimetrisch bestimmt) und Sensormessungen bereitstellt. Das Wasser wurde so lange hineingepumpt bis das Substrat und die Elektroden vollständig unter Wasser standen (Abbildung 24). Danach wurde es kontinuierlich wieder abgelassen. Dieser Vorgang wurde pro Substrat mehrere Male wiederholt.



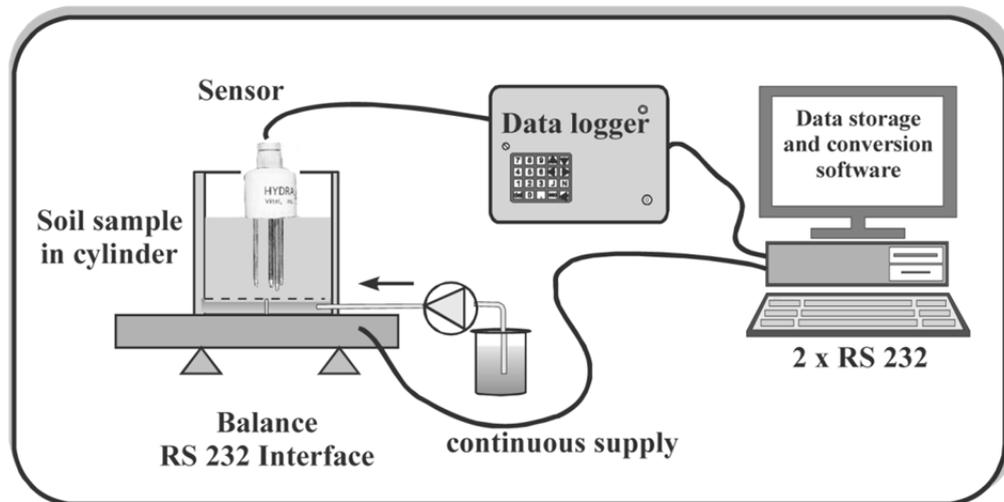
**Abbildung 23: Einbau des Messensors und Befüllung mit Wasser (Wien, 15.05.2015)**



**Abbildung 24: Überstautes Substrat und gesamter Versuchsaufbau (Wien, 15.05.2015)**

Da das Kalibrierungsverfahren einen axialen Feuchtigkeitsgradienten entlang des Sensors annimmt, funktioniert die Kalibrierung nur für Proben, die einen linearen Bezug zwischen dem Output Signal und dem aktuellen volumetrischen Wassergehalt aufweisen, über die Spanne des volumetrischen Wassergehalts, der in der Probe auftritt. Ein einfacher Test zur Linearität ist einen Sensorstab nur bis zur Hälfte in Wasser

einzutauchen. Das sollte dann einen volumetrischen Wassergehalt von 50% ergeben. (LOISKANDL et al., 2010) In Abbildung 25 ist der Versuchsaufbau kurz zusammengefasst dargestellt.



**Abbildung 25: Versuchsaufbau für Kalibrierung (LOISKANDL, 2010)**

Die erhaltenen Daten wurden mit dem Programm GNU Octave interpoliert um pro Messreihe eine einheitliche Anzahl an Datenpunkten zu erhalten. Mit diesen wurde in dem Programm TableCurve 2D ein „Curvefitting“ durchgeführt und mit Hilfe vom Bestimmtheitsmaß  $R^2$  und der Standardabweichung eine passende Funktion erstellt, die einem Polynom 3. Ordnung entspricht, welche sich tabellarisch gut auflösen lässt.

TOPP et al. (1980) haben diesbezüglich empirisch eine Funktion ermittelt, die einem klassischen Polynom 3. Ordnung entspricht, bei dem nur die Koeffizienten für das eigene Material angepasst werden müssen. Auch die in den Sensoren gespeicherten Default Funktionen sind TOPP-Equations (Polynome 3. Ordnung) mit Koeffizienten die an die Böden „Sand“, „Silt“ und „Clay“ angepasst sind und an das vorhandene Substrat angepasst werden können. Diese Funktion ist sehr effektiv und beschreibt die Daten nur geringfügig schlechter als die selbst kalibrierten Funktionen. Um einen Vergleich zu haben, ob und wieviel die mit selbst erstellten Koeffizienten bestückte Funktion besser ist, wurden diese mit der jeweils am besten passende default-Sensor Funktionen von „Sand“, „Silt“ und „Clay“ und mit der TOPP-Equation für anorganische Böden verglichen.

### 3.2.3 Lastplattenversuche

Im Zuge des Einbaus wurden dynamische Lastplattendruckversuche durchgeführt. Diese dienen zur Bestimmung der Verformbarkeit und Tragfähigkeit des Bodens sowie zur Verdichtungskontrolle der Substrate (IGEWA, o.J.).

Hierbei fällt ein genormtes Fallgewicht aus einer bestimmten Höhe auf eine Druckplatte. Ein Computer errechnet aus den Setzungswerten die maximale Belastung in MN pro m<sup>2</sup> (SEIPEL, 2011). Diese wird als dynamisches Verformungsmodul  $E_{vd}$  bezeichnet, welchen man mittels eines Umrechnungsfaktors (in der Regel der Faktor 2) in den  $E_{v1}$ - Wert umrechnen kann (IGEWA, o.J.).

Vor dem Einbau der Boxen wurden auf der unteren Tragschicht fünf Punkte, die gleichmäßig verteilt waren, ausgewählt und vier Messungen durchgeführt. Beim Einbau selbst im April wurden bei den Wegeaufbau-Versuchsboxen jeweils auf den oberen Tragschichten an zwei Messpunkte je vier Wiederholungen gemessen (Abbildung 26). Dies wurde ebenfalls mit nur einem Messpunkt bei den Substratversuchsboxen durchgeführt. Anfang Oktober wurden diese Messungen an den Substratversuchsboxen wiederholt.

Die Messungen wurden durchgeführt, um Rückschlüsse auf die geotechnischen Randbedingungen der einzelnen Kisten und einen relativen Vergleich der Setzungen zwischen den Versuchsboxen zu erhalten.



**Abbildung 26: Dynamische Lastplattenversuche auf der unteren und oberen Tragschicht (Großenzersdorf, 27.-30.4.2015)**

### 3.2.4 Erhebung der ober- und unterirdischen Biomasse

Das Wurzelwachstum wurde nach der ersten Vegetationsperiode, im Oktober 2015, untersucht. Die ersten sechs Wegeaufbau-Versuchsboxen (1.3, 2.3, 3.3, 4.3, 5.3 und 6.3) und zwölf Substratversuchsboxen (13, 14, 15, 16, 17, 18, 31, 32, 33, 34, 35 und 36) wurden dabei bearbeitet und die oberirdischen und unterirdische Biomasse erhoben.

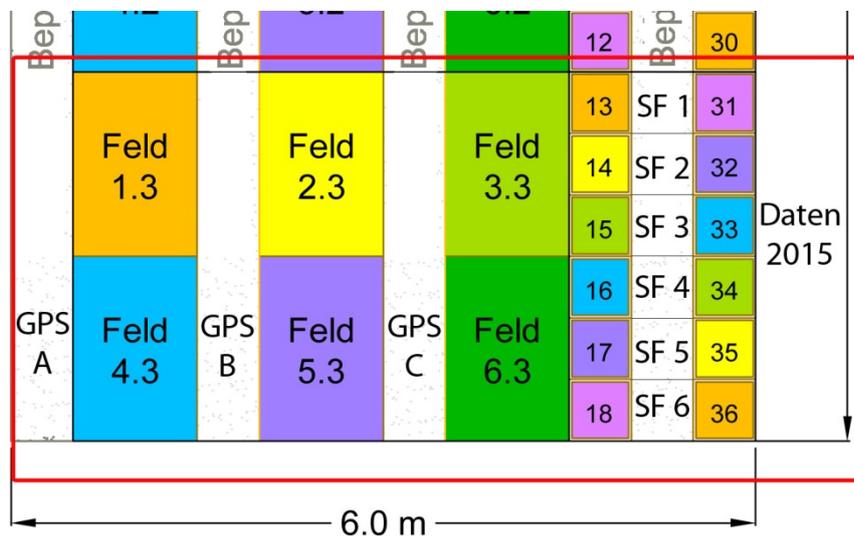
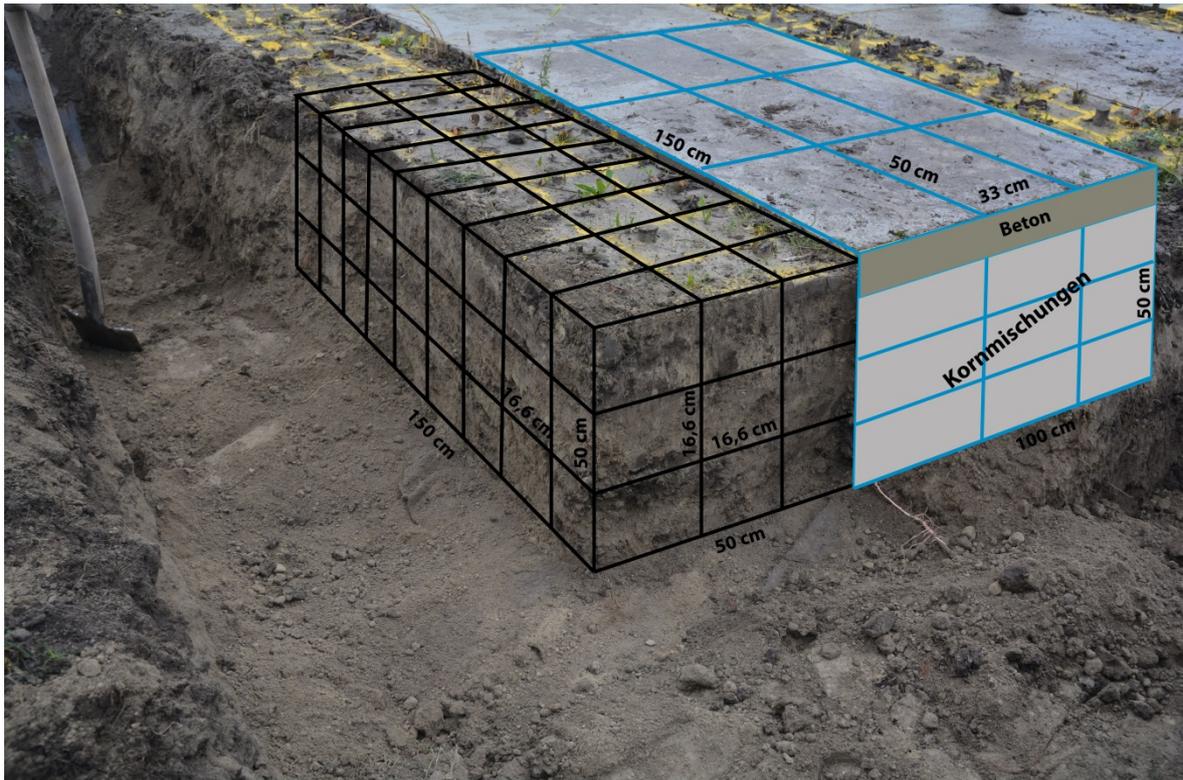


Abbildung 27: Versuchsfläche der ersten Erhebungen 2015 (WEISSTEINER, 2015; eigene Überarbeitung)

Die aufzunehmenden Versuchsfelder wurden dabei in Gehölzpflanzstreifen und Versuchsbox geteilt und getrennt erhoben. Die Gehölzpflanzstreifen der Wegeaufbau-Versuche wurden wie in Abbildung 28 ersichtlich in drei Ebenen mit je 16,6 cm gegliedert und horizontal in ein 16,6 x 16,6 cm großes Raster geteilt. Die Versuchsboxen der Wegeaufbau-Versuche sind ebenfalls in drei Ebenen gegliedert. Aufgrund der 10 cm dicken Betonschicht sind diese nur 13,3 cm dick. Flächig wurden diese in größere Einheiten zu je 33,3 x 50 cm aufgeteilt, denn durch die teils lockeren und groben Substrate sind bei einer kleineren Einteilung die Aufnahmen schwer durchführbar. Die daraus entstandenen Felder wurden als Plots bezeichnet und einzeln codiert. Aufgrund der kleinen Größe der Substratversuchsboxen von 50 x 50 x 50 cm wurden diese nicht in Ebenen unterteilt. Der zu je zwei gegenüberliegenden Substrat-Boxen gehörende Gehölzpflanzstreifen wurde in 25 x 25 cm großen Feldern geteilt, die ebenfalls als Plots bezeichnet und codiert wurden.



**Abbildung 28: Boxfelder und Gehölzpflanzstreifen der Wegeaufbau-Versuche mit einem 33,3 x 50 cm und 16,6 x 16,6 cm großen Raster (Großenzersdorf, Oktober 2015; WEISSTEINER, 2015)**

Da aufgrund von Umwelteinflüssen und Vitalität nicht jedes Steckholz ausgetrieben ist und zwei unterschiedliche Gehölzarten verwendet wurden, wurden diese in dem Raster verortet (Abbildung 29).



**Abbildung 29: Einteilung der Gehölzpflanzstreifen in Raster von 16,6 und 25 x 25 cm (Großenzersdorf, 2.10.2015)**

Im Zuge der oberirdischen Biomasseentnahme wurden folgende Parameter aufgenommen:

- Durchmesser der Steckhölzer [cm] (1 cm unterhalb der Schnittstelle)
- Sprossanzahl [-]
- Basaler Durchmesser der Sprosse [cm]
- Länge der Sprosse [cm] (Haupt- und Seitentriebe getrennt)
- Feuchtgewicht, getrennt in Blattmasse und Sprossmasse [g]
- Trockengewicht, getrennt in Blattmasse und Sprossmasse [g]

Jeder Spross wurde dabei wie in Abbildung 30 ersichtlich, in Haupt- und Seitentriebe unterteilt, die Blätter von den Zweigen getrennt, vermessen, feucht abgewogen und gesondert in codierten Papiersäckchen verpackt. Diese wurden bei 80 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und danach wieder gewogen (Trockengewicht).

Um die unterirdische Biomasse der Gehölzpflanzstreifen freilegen zu können, wurde wie in Abbildung 31 zu sehen, ein 60 cm breiter Graben mit 60 cm Tiefe, bis zu 30 cm vor der Versuchsfläche ausgehoben. Die restliche „Pufferzone“ zu den Gehölzpflanzstreifen wurden per Handschaufel abgetragen und 16,6 x 16,6 x 16,6 cm große Plots bei den Wegeaufbau- Versuchen und 25 x 25 cm bei den Substrat-Versuchen bis zu unteren Tragschicht abgestochen. Diese wurden je nach Bodenfeuchte getrocknet, gesiebt und die Wurzelmasse in codierten Papiersäckchen verpackt. Nach Bedarf wurden die Wurzeln über einem Sieb sauber gewaschen und bei 80°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet (STEUBING und FANGMEIER, 1992). Die Wurzelmasse wurde in Feinwurzeln (< 2 mm), Mittelwurzeln (2-4 mm) und Grobwurzeln (> 5 mm) unterteilt. Folgende Parameter wurden erhoben:

- Durchmesser und Länge von Mittel- und Grobwurzeln [cm]
- Trockengewicht, getrennt in Fein-, Mittel- und Grobwurzeln [g]
- Wurzelscans



Abbildung 30: Ernten und Aufnahme der oberirdischen Biomasse (Großenzersdorf, Oktober 2015)



**Abbildung 31: Ernte und Aufnahme der unterirdischen Biomasse (Großenzersdorf, Oktober–November 2015)**



**Abbildung 32: Bearbeitung der Wegeaufbau-Versuchsboxen und Aufnahme der unterirdischen Biomasse in 3 Ebenen (Großenzersdorf, Oktober– November 2015)**

Für die Wurzeln in den Wegeaufbau-Versuchsboxen musste die Betondeckschicht wie in Abbildung 32 mit einer Asphaltsäge in den vorgegeben Raster von 33,3 x 33,3 cm aufgeschnitten und vorsichtig heruntergehoben werden. Dabei wurde darauf geachtet, dass keine Wurzeln verletzt werden. Mit Vorlage des Rasters wurden die drei Ebenen der Tiefe nach schichtweise abgetragen und gefundene Wurzeln in codierte Papiersäckchen verpackt. Wurzeln welche rückseitig durch die Löcher für den Bewehrungsstahl und in Spalten zwischen Vlies und Box wuchsen wurden gesondert gekennzeichnet.

### 3.2.5 Wurzelscan

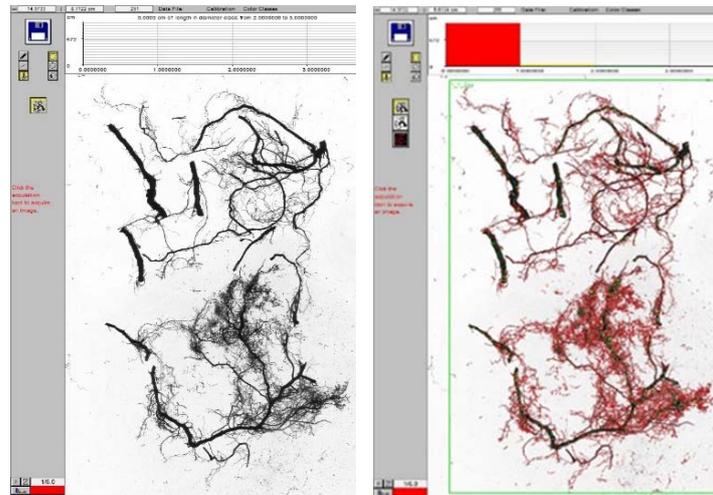
Im Zuge der Untersuchungen wurden im Zuge einer Bachelorarbeit von SCHIEFERMAIR (2015) Wurzelscans durchgeführt um genauere Informationen über die Länge, die Wurzeldurchmesser und das Volumen der Wurzeln zu erhalten. Hierfür wurden die Wurzeln der Wegeaufbau-Boxen mit den Korngrößenverteilungen 0/32, der feinsten, und 16/63, der größten Korngrößenmischung ausgewählt. Die Wurzeln wurden wie in Abbildung 33 sichtbar, gewaschen in eine Plexiglasschale mit Wasser gelegt und mit dem „Epson Perfektion V700 Photo“ Scanner gescannt. Pro Scan ist nur eine bestimmte Menge an Wurzeln sinnvoll, um ein analysefähiges Bild zu erhalten, bei einem großem Feinwurzelanteil (< 0,1 cm) muss das dichte Geflecht aufgelockert und teilweise getrennt werden.



**Abbildung 33: Wurzelwaschung (links), Wurzeln im Plexiglasbehälter (mitte), Epson-Scanner (rechts) (SCHIEFERMAIR, 2015)**

Die Scans wurden mit dem Wurzelscanprogramm WinRHIZO analysiert. WinRHIZO ist eine Analyse-Software, die anhand eines digitalen Bildes eine geometrische Vermessung des Wurzelsystems durchführt (siehe Abbildung 34). Das Programm umfasst unter anderem Analysen zu Morphologie, Architektur und Topologie (WINRHIZO 2015). Das Analyseprogramm erkennt die einzelnen Wurzelabschnitte und misst Durchmesser mit entsprechender Länge. Alle Längen wurden entsprechend der Durchmesser den definierten Durchmesserklassen zugeteilt und bilden innerhalb einer Klasse die Summe aller Längen. Die Einteilung der Durchmesserklassen erfolgte in 1 mm Schritten und

wurde für die Ergebnisse wieder in die schon verwendeten Durchmesserklassen nach KÖSTLER u.a. (1968) aufgeteilt.



**Abbildung 34: Wurzelscan (links) und Analyse (rechts) mit WinRhizo (SCHIEFERMAIR, 2015)**

## 4. Ergebnisse

Die Ergebnisse teilen sich in die Ergebnisse der Kalibrierung der Bodenwassergehaltssensoren, der Messungen der Bodenwassergehaltssensoren, der Ermittlung der Tragfähigkeit mittels Lastplattenversuche und der Auswertung der oberen und unteren Biomasse.

Für die bessere Lesbarkeit werden folgende Abkürzungen verwendet:

WVB... Wegeaufbau-Versuchsbox

GPS... Gehölzpflanzstreifen

SB... Substratversuchsbox

SF... Substratfeld

hyd.. hydraulisch stabilisiert

### 4.1 Kalibrierung der Bodenwassergehaltssensoren

Die Kalibrierung der Bodenwassergehaltssensoren zeigt folgende Ergebnisse: Das Substrat Erde in Abbildung 35, welche nach der Bodenkarte (eBOD) ein „Silt“ (Silt loam) ist, passt die Kurve für „Sand“ deutlich besser als „Silt“. Bei der Probe Granit-Splitt in Abbildung 36 passt „Silt“ sehr gut, wobei bei allen drei Kalibrierungskurven die selbstgemessene Kalibrierungskurve am besten passt.

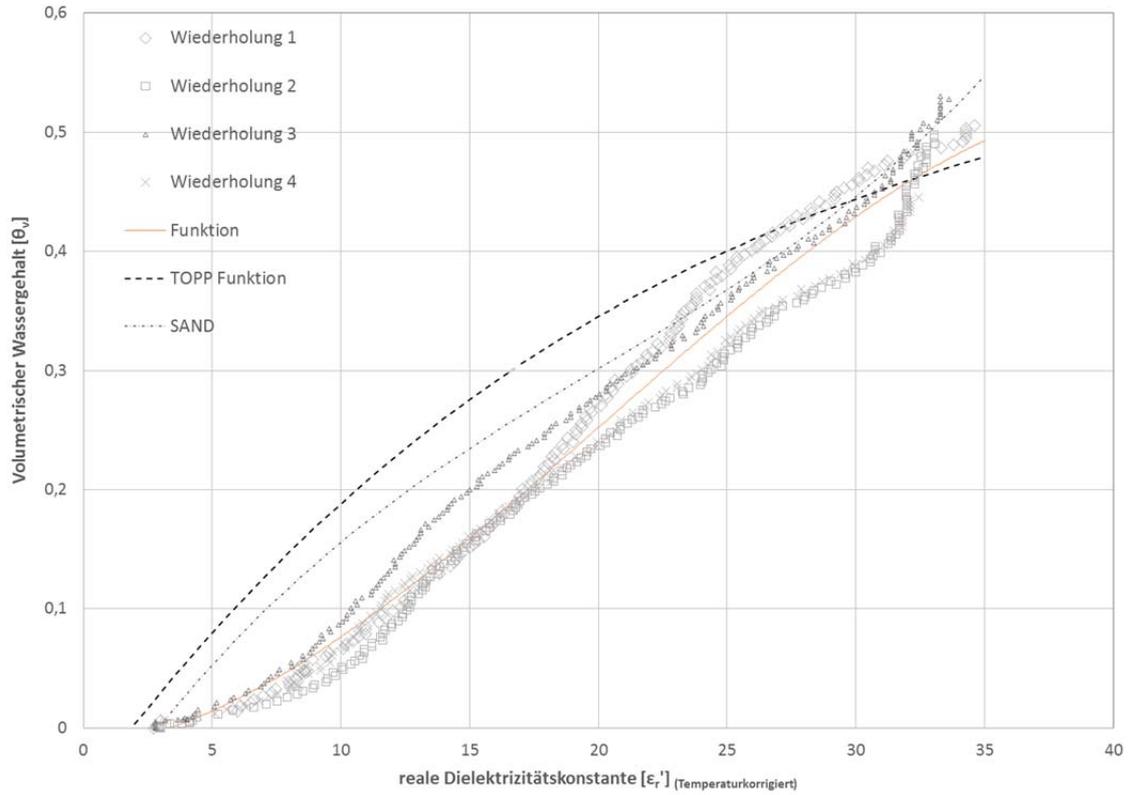


Abbildung 35: Kalibrierungskurve Erde

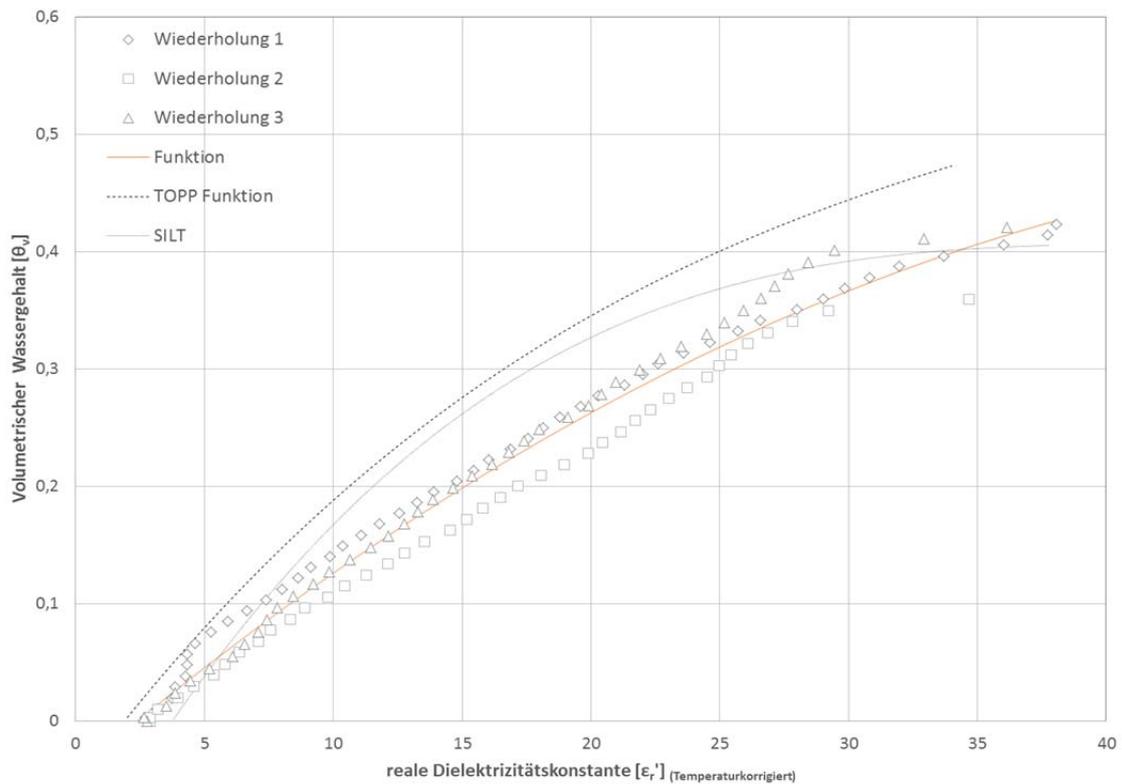


Abbildung 36: Kalibrierungskurve Granit 2-4 mm

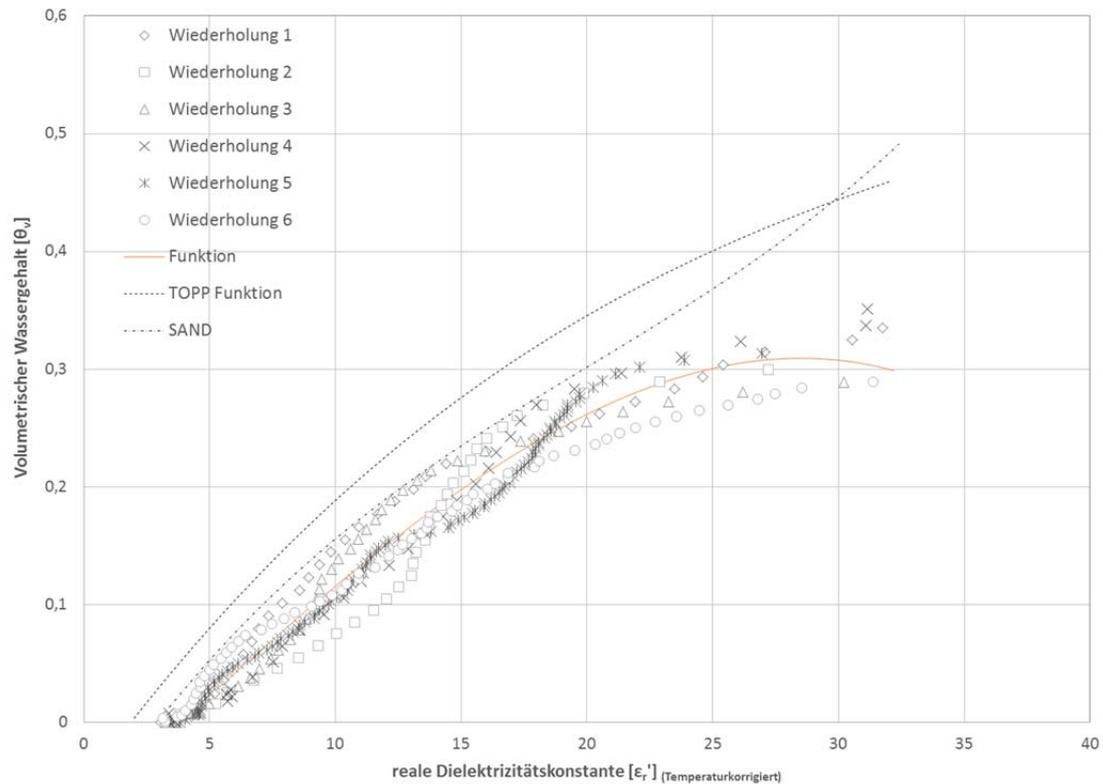
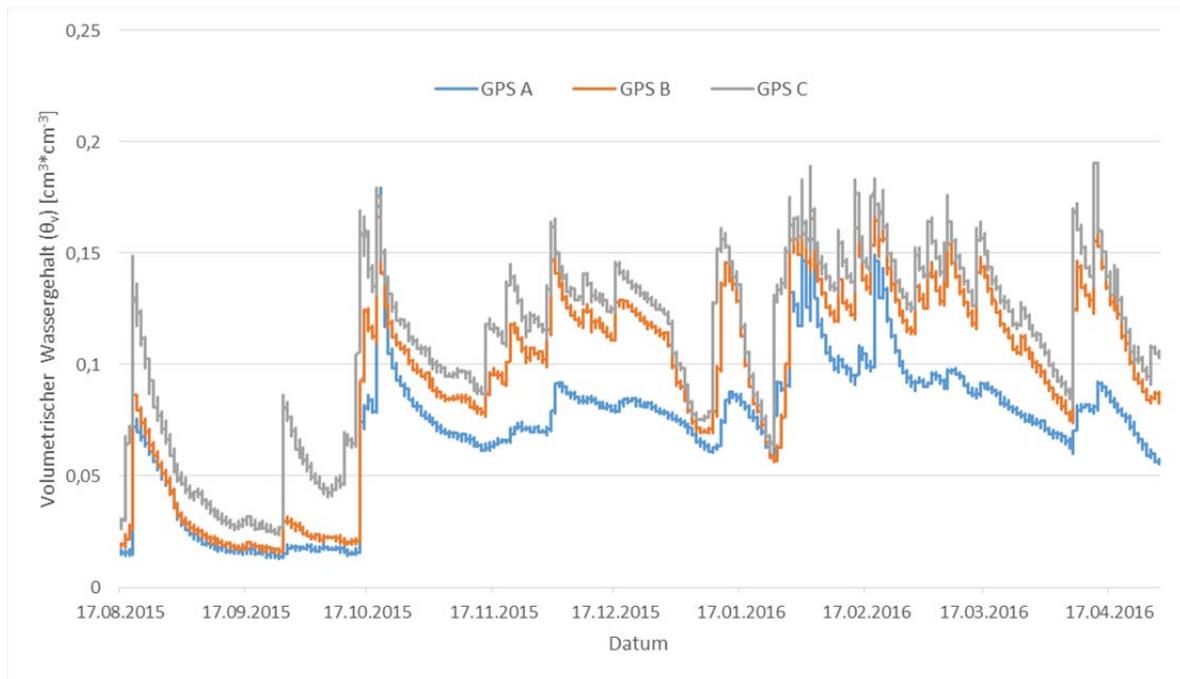


Abbildung 37: Kalibrierungskurve Substrat 0/32

## 4.2 Bodenwassergehaltsmessungen

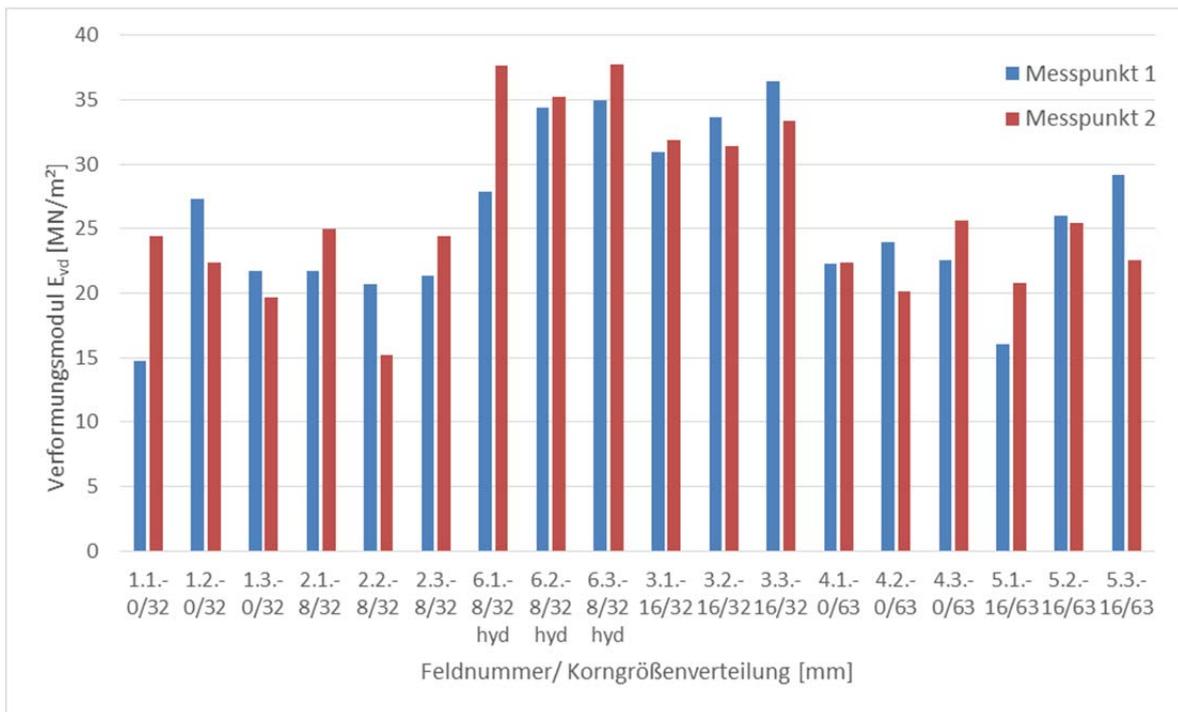
Wie in Abbildung 38 zu sehen ist verlaufen die Kurven der Bodenwassergehaltssensoren der Gehölzpflanzstreifen (GPS A, GPS B und GPS C, siehe Abbildung 11) sehr ähnlich zueinander. Der höchste volumetrische Wassergehalt ( $\Theta_v$ ) wird die ganze Messperiode in GPS C gemessen. GPS B liegt meist dicht dahinter und reagiert fast gleich. Nur GPS A weist viel niedrigere Werte und wenige plötzliche Anstiege auf, da bei diesem Gehölzpflanzstreifen eine Begrenzung fehlt und das Wasser sich seitlich in das anstehende Erdreich verteilen kann.



**Abbildung 38: gemessener volumetrischer Wassergehalt der Bodenwassergehaltssensoren der Gehölzpflanzstreifen von 17.8.15 bis 17.4.2016**

### 4.3 Lastplattenversuche

Abbildung 39 zeigt, dass das Verformungsmodul ( $E_{vd}$ ) beim hydraulisch stabilisierten Substrat 8/32 durchschnittlich am höchsten ist. Ein Grund dafür ist die Stabilisierung durch den Zement. Ein eindeutiger Trend, dass in Versuchsboxen mit einem niedrigeren Verformungsmodul ( $E_{vd}$ ) mehr Wurzeln gewachsen sind und dementsprechend mehr Wurzelmasse haben, ist nicht erkennbar. Dennoch ist zu sagen, dass in den Versuchsboxen mit den Substraten 8/32 hydraulisch stabilisiert und 16/32 hohe Verformungsmodule ( $E_{vd}$ ) gemessen wurden und relativ wenig Wurzelmasse vorhanden war. Die genauen Messdaten sind im Anhang zu finden.



**Abbildung 39: Lastplattenversuche an den Wegeaufbau-Versuchsboxen**

Bei den Substratversuchsboxen wurden zwei Messungen im Abstand von fünf Monaten durchgeführt und in Abbildung 40 ist erkennbar, dass sich die Tragfähigkeit bei einigen Boxen mehr als das Doppelte gesteigert hat.

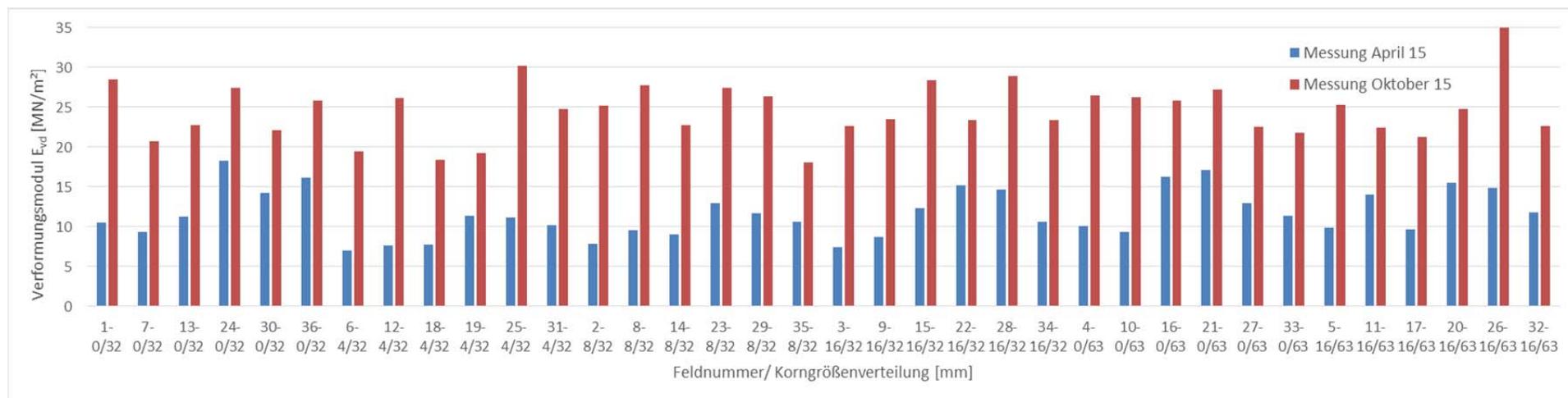
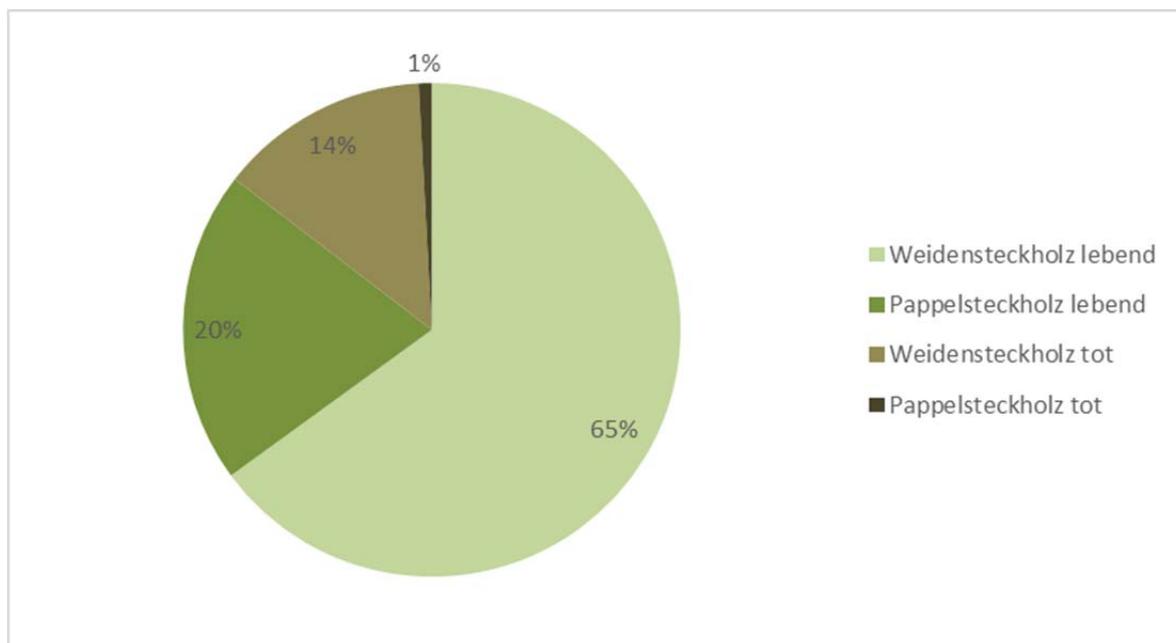


Abbildung 40: Lastplattenversuche an den Substratversuchsboxen

#### 4.4 Gehölzpflanzstreifen

Anfang Oktober 2015 wurde mit den Erhebungen der oberirdischen Biomasse begonnen. Aufgrund des trockenen Sommers musste die eingebrachten Steckhölzer viel gewässert werden, was zu einem guten Wachstum der Pflanzen führte. Es wurden auf den Gehölzpflanzstreifen der Erhebung des ersten Jahres, 117 Steckhölzer gesetzt, davon 92 Hybridweiden und 25 Hybridpappeln. Wie in Abbildung 41 abgebildet sind 16 Weidensteckhölzer, 14% aller Steckhölzer, und 1 Pappelsteckholz, 1% aller Steckhölzer, nicht ausgetrieben.



**Abbildung 41: Aufteilung aller Steckhölzer in Prozent**

Abbildung 42 zeigt den prozentuellen Anteil der Sprosse pro Sprosslängenklasse. Hierfür wurde die Sprosslänge in 20 cm Klassen eingeteilt. Die Länge der meisten Sprosse liegt nach einer Vegetationsperiode zwischen 21 und 160 cm und es wurde eine maximale Sprosslänge von 208 cm gemessen. Bei der Betrachtung des prozentuellen Anteils der Sprosse pro Durchmesserklasse (in 2 mm Schritten) ist in Abbildung 43 zu erkennen, dass circa 3/5 aller Sprosse zwischen 6 und 11 mm, gemessen 1 cm von der Schnittstelle, dick sind. Der maximale Durchmesser nach einer Vegetationsperiode betrug 18 mm.

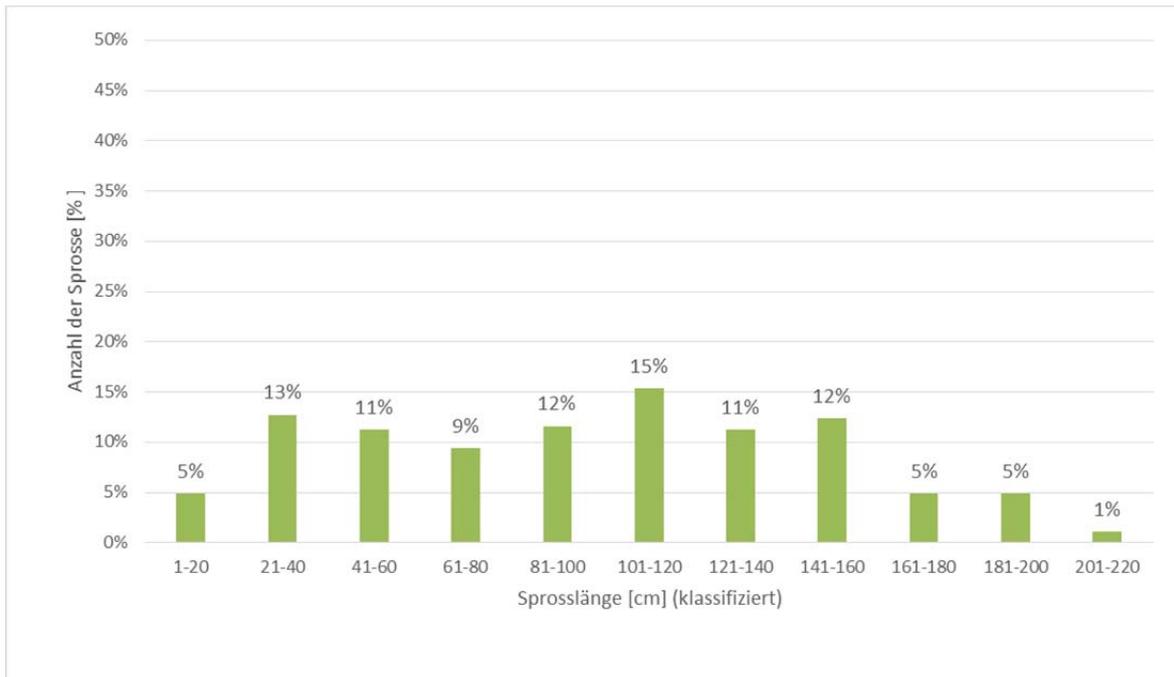
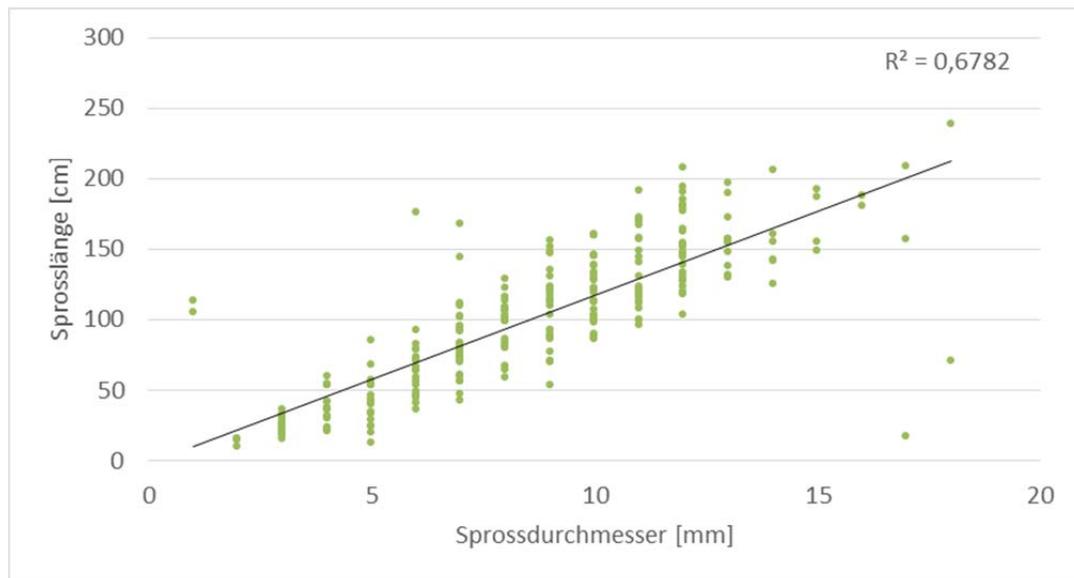


Abbildung 42: Anzahl der Sprosse in Längenklassen



Abbildung 43: Anzahl der Sprosse in Durchmesserklassen

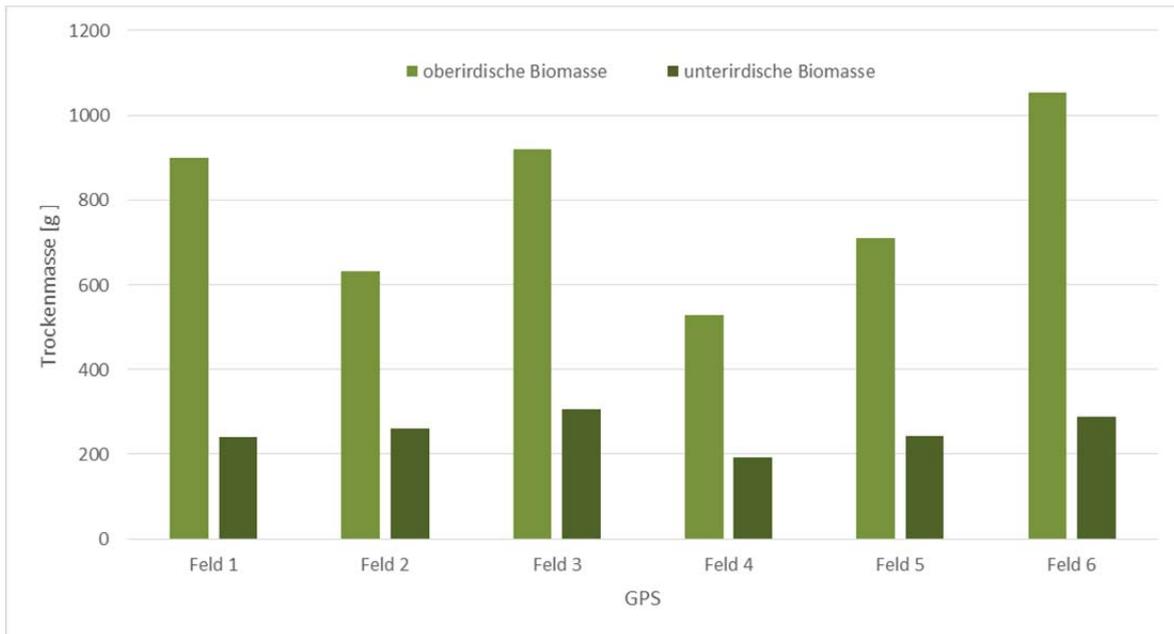


**Abbildung 44: Streudiagramm des Sprossdurchmessers zur Sprosslänge**

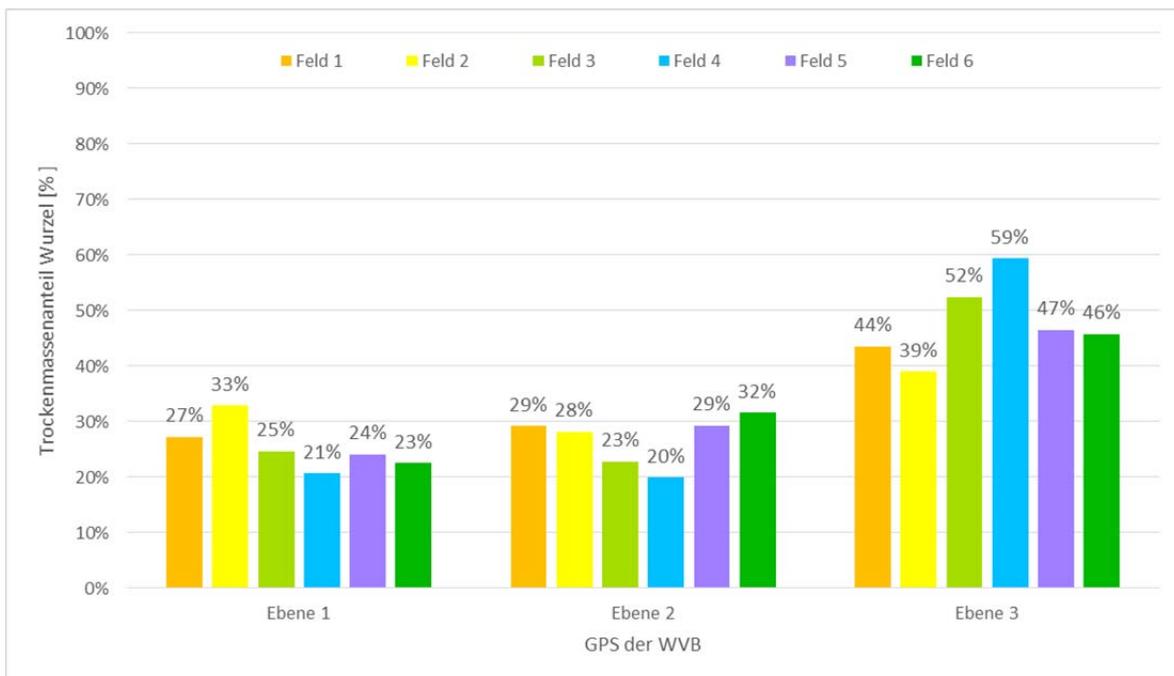
Im Streudiagramm in Abbildung 44 ist zu sehen, dass mit steigendem Sprossdurchmesser die Sprosslänge linear ansteigt und das lineare Bestimmtheitsmaß  $R^2 = 0,6782$  beträgt.

Nach der ersten Vegetationsperiode ist ersichtlich, dass die oberirdische Biomasse der Gehölzpflanzstreifen (GPS) der Wegeaufbau-Versuchsboxen um das 2 bis 3 fache höher als die unterirdische Biomasse ist (siehe Abbildung 45). Am höchsten ist die oberirdische Biomasse in Feld 6 mit 1053 g bei 10 Steckhölzern. Die niedrigste oberirdische Biomasse weist Feld 4 auf mit 528 g bei 12 Steckhölzern. Die höchste unterirdische Biomasse hat Feld 3 mit 305 g, die niedrigste unterirdische Biomasse hat Feld 4 mit 191 g.

Außerdem ist ein Zusammenhang mit der unterirdischen Biomasse und dem volumetrischen Wassergehalt ( $\Theta_v$ ) der Gehölzpflanzstreifen zu erkennen. Wie in Abbildung 38 und Abbildung 45 ersichtlich, nimmt die unterirdische Biomasse der Gehölzpflanzstreifen (GPS) mit dem volumetrischen Wassergehalt ( $\Theta_v$ ) pro Gehölzpflanzstreifen zu. GPS A hat die niedrigste unterirdische Biomasse und den niedrigsten volumetrischen Wassergehalt ( $\Theta_v$ ). GPS C hingegen weist die höchste unterirdische Biomasse und den höchsten volumetrischen Wassergehalt ( $\Theta_v$ ) auf.



**Abbildung 45: Wurzeltrockenmasse der oberirdischen und unterirdischen Biomasse der Gehölzpflanzstreifen der Wegeaufbau Versuchsbau**

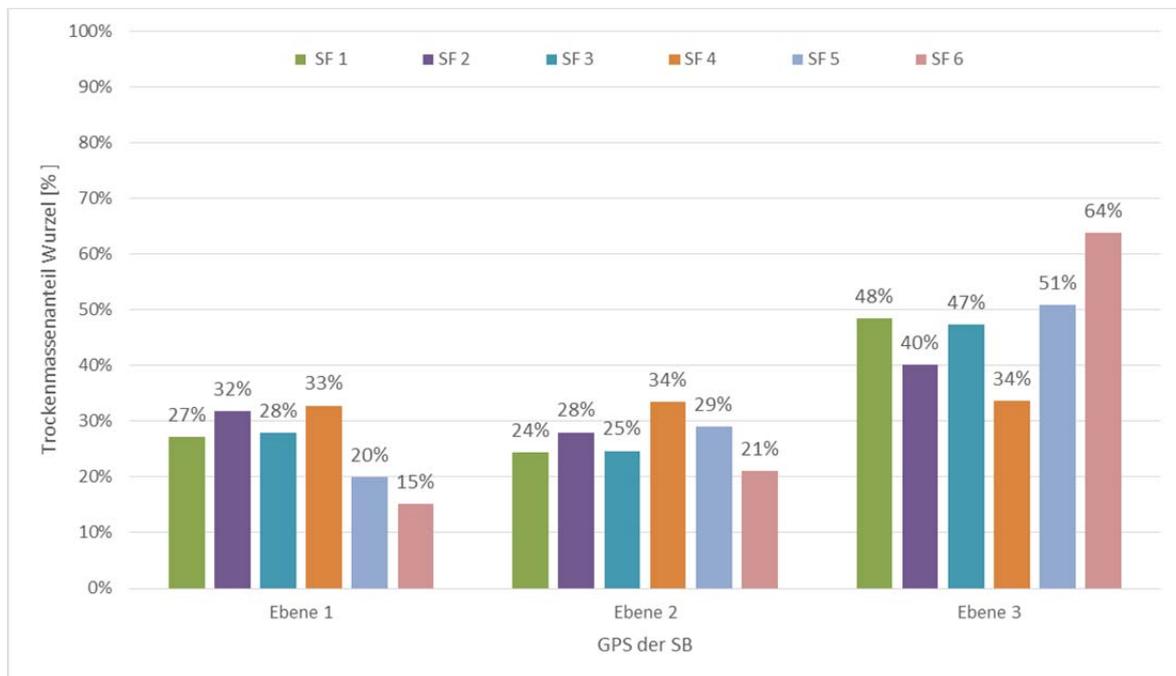


**Abbildung 46: Wurzelmassenanteile der Gehölzpflanzstreifen der Wegeaufbau-Versuchsboxen in Ebene 1-3**

In Abbildung 46 ist die Verteilung der Wurzelmasse der Gehölzpflanzstreifen (GPS) der Wegeaufbau-Versuchsboxen (WVB) in drei Ebenen ersichtlich. In Ebene 1 hat die Hälfte aller Felder einen höheren Anteil an Wurzelmasse. Bei der anderen Hälfte der Felder ist der höhere Anteil der Masse in Ebene 2 zu finden. Allgemein ist jedoch zu sagen, dass

bei allen Feldern die Ebene 3 den höchsten Anteil an Wurzelmasse hat. Im Anhang findet man genauere Informationen über die Wurzelmassenverteilung in Ebenen der Gehölzpflanzstreifen.

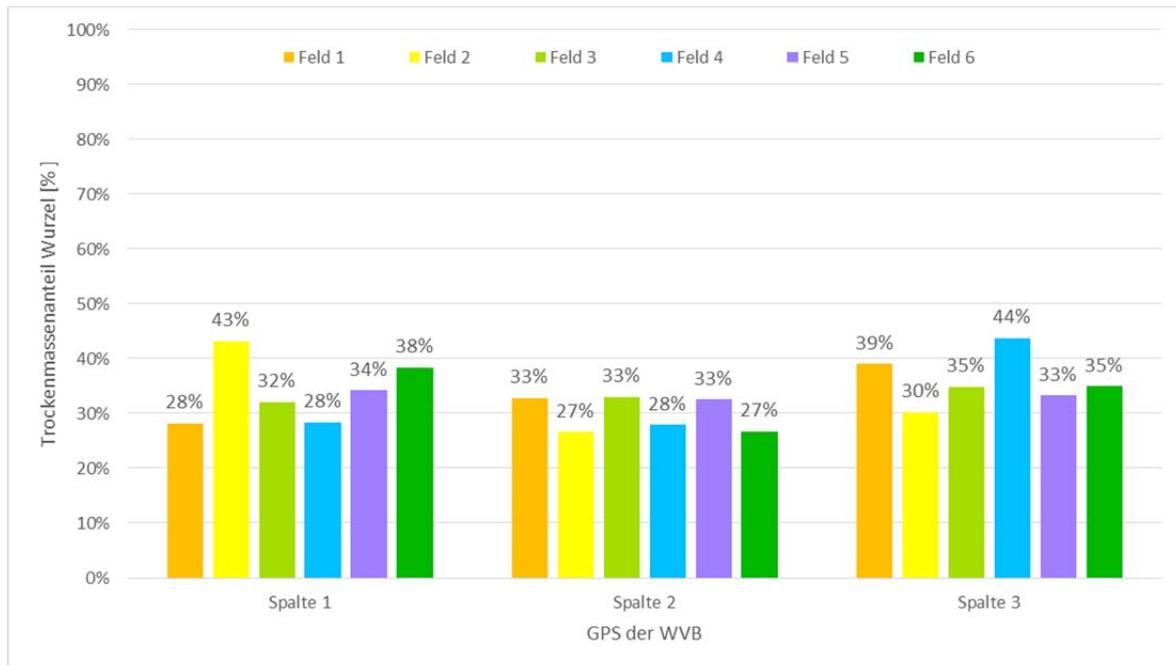
In Abbildung 47 bei der Verteilung der Wurzelmasse der Gehölzpflanzstreifen (GPS) der Substratversuchsboxen (SB) verhält es sich ähnlich wie bei der Verteilung der Wurzelmasse der Gehölzpflanzstreifen der Wegeaufbau-Versuchsboxen (WVB). Wenn man sich die Ebenen 1 und 2 ansieht, ist abzulesen, dass in Ebene 1 die Hälfte aller Felder einen höheren Anteil an Wurzelmasse hat. Bei der anderen Hälfte der Felder ist der höhere Anteil der Masse in Ebene 2 zu finden. Den größten Anteil der Wurzelmasse hat wie bei den Wegeaufbau-Versuchsboxen die Ebene 3. Eine Ausnahme bildet das Substratfeld (SF) 4, deren Aufteilung auf alle drei Ebenen fast gleich ist.



**Abbildung 47: Wurzelmassenanteile der Gehölzpflanzstreifen der Substratversuchsboxen in Ebene 1-3**

Bei der Betrachtung der Wurzelmassenverteilung der Gehölzpflanzstreifen (GPS) der Wegeaufbau-Versuchsboxen (WVB) in Spalten (siehe Abbildung 48) ist zu erkennen, dass der höchste Anteil an Wurzeln in GPS A (Feld 1 und 4) in der dritten Spalte, sprich bei der Versuchsbox, zu finden sind, obwohl sich um den Gehölzpflanzstreifen keine Begrenzung befindet. In GPS B (Feld 2 und 5) ist es genau anders herum. Den höchsten Anteil der Wurzeln ist hier in Spalte 1, am weitesten entfernt von der offenen Seite der Versuchsbox entfernt, zu finden. In GPS C sind beide Felder unterschiedlich. Hier hat Feld 3 den höchsten Anteil der Wurzelmasse in Spalte 3 und die Feld 6 hat den höchsten

Anteil in Spalte 1. Allgemein ist zu sagen, dass niemals Spalte 2 den höchsten Anteil der Wurzelmasse aufweist.



**Abbildung 48: Wurzelmassenanteile der Gehölzpflanzstreifen der Wegeaufbau-Versuchsboxen in Spalte 1-3**

#### 4.5 Wegeaufbau-Versuche

Zunächst wird die Wurzelmassenverteilung der drei Ebenen der Wegeaufbau-Versuchsboxen betrachtet. Wie Abbildung 49 zeigt, befindet sich der höchste Anteil der Biomasse fast durchgehend in der dritten Ebene. Ein möglicher Grund kann das Sedimentieren von Feinmaterial in den unteren Bereichen der Boxen, die eingeschwemmte Erde aus den Gehölzpflanzstreifen (siehe Abbildung 50) sowie das mit Wasser angesaugte Vlies, welches die untere Tragschicht von der oberen Tragschicht trennt sein. Infolgedessen würde das feuchte und feinsubstratreiche Milieu beste Bedingungen für ein Wurzelwachstum bieten. Aus diesem Grund wird für die weitere Analyse nur mehr die Ebene 1 und 2 herangezogen.

Die Substrate mit den Korngrößenmischungen 0/32, 8/32 und 16/63 zeigen eine relative Zunahme der Biomasse von Ebene 1 zu Ebene 3. In den Substraten mit der Korngrößenverteilung 16/32 und 8/32 hydraulisch stabilisiert sind die Anteile in Ebene 2 geringer als in den anderen Ebenen. Die gröberen Substraten 16/32 und 16/63 zeigen einen relativ niedrigen Biomasseanteil der Wurzeln in den ersten zwei Ebenen und in Ebene 3 einen sehr hohen. Im Anhang findet man genauere Informationen über die Wurzelmassenverteilung in Ebenen der Wegeaufbau-Versuchsboxen.

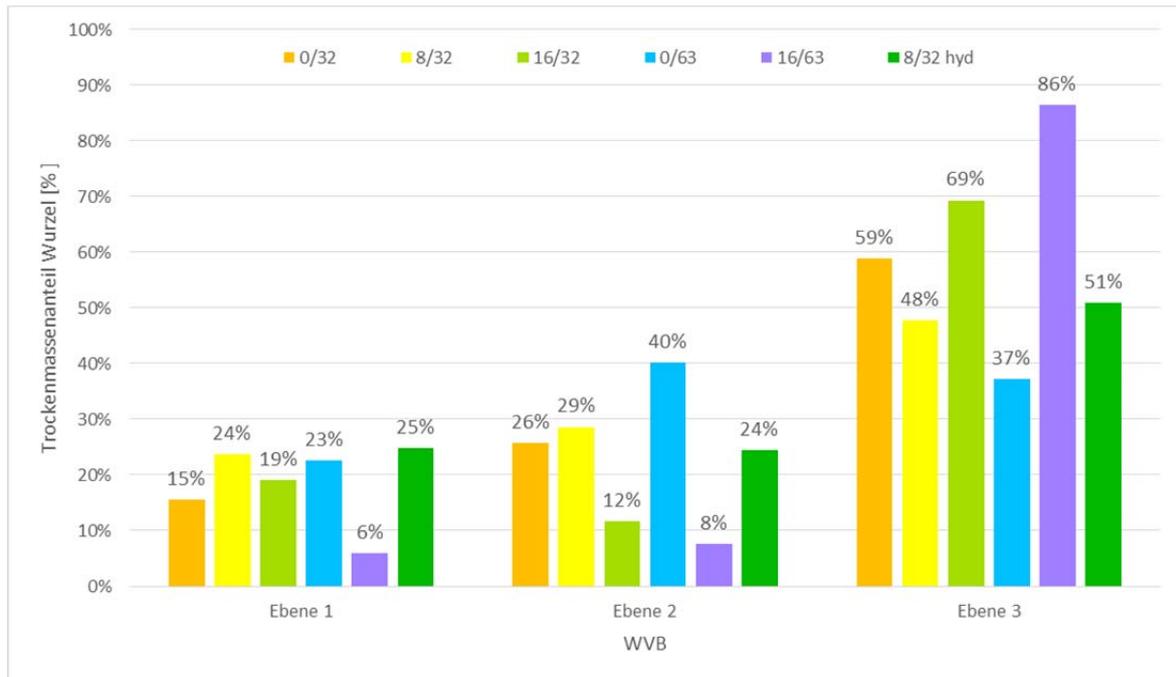
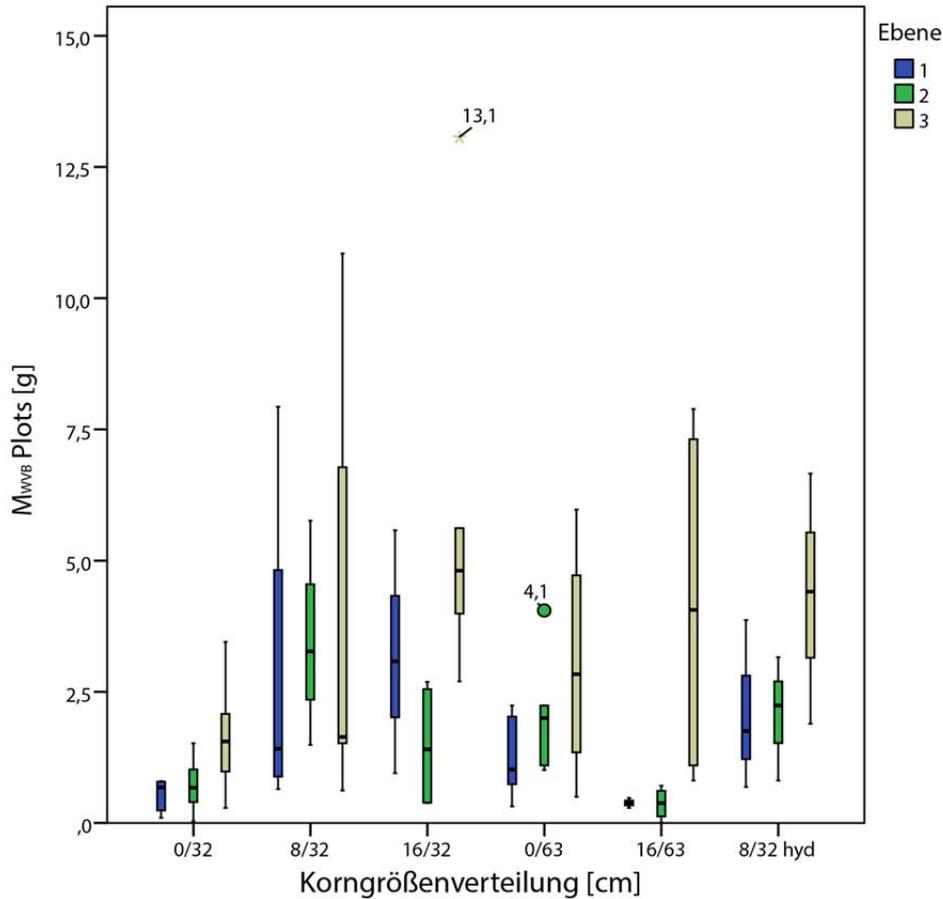


Abbildung 49: Wurzelmassenanteile der Wegeaufbau-Versuchsboxen in Ebene 1-3



Abbildung 50: Feinkornreiches Substrat und eingeschwemmte Erde in Ebene 3 (Großenzersdorf, Oktober 2015)

Abbildung 51 zeigt die Verteilung der unterirdischen Biomasse der Plots getrennt nach Ebenen der Wegeaufbauversuche. Die Substrate mit der Korngrößenverteilung 0/32, 0/63 und 16/63 zeigen einen stetigen Anstieg des Medians der Plot-Wurzelmasse ( $M_{WV}$ ) pro Ebene.



**Abbildung 51: Verteilung der Wurzelmasse ( $M_{WV}$ ) der Plots über den 3 Ebenen getrennt nach Wegeaufbauversuche**

Bei der Betrachtung der absoluten Werte der Wurzelmasse der Wegeaufbauversuchsboxen in Abbildung 52 zeigt sich, dass in der Versuchsbox 2 mit der Korngrößenverteilung 8/32 mit etwa 25 g Trockenmasse die meisten Wurzeln gefunden wurden. Im Gegensatz dazu wurden in der Versuchsbox mit der Korngrößenverteilung 16/63 nur etwa 3 g Wurzeln gefunden. Unabhängig der Anzahl der Stechkölzer und der Biomasse der Gehölzpflanzstreifen ist bei einem Größtkorn von 32 mm, ein Ansteigen der Biomasse mit höher werdenden Kleinstkorn zu sehen. Das Substrat 8/32 passt nicht in diese Reihe und bildet die Ausnahme. Beim Größtkorn mit 63 mm sinkt die Wurzelmasse bei Anstieg des Kleinstkorns.

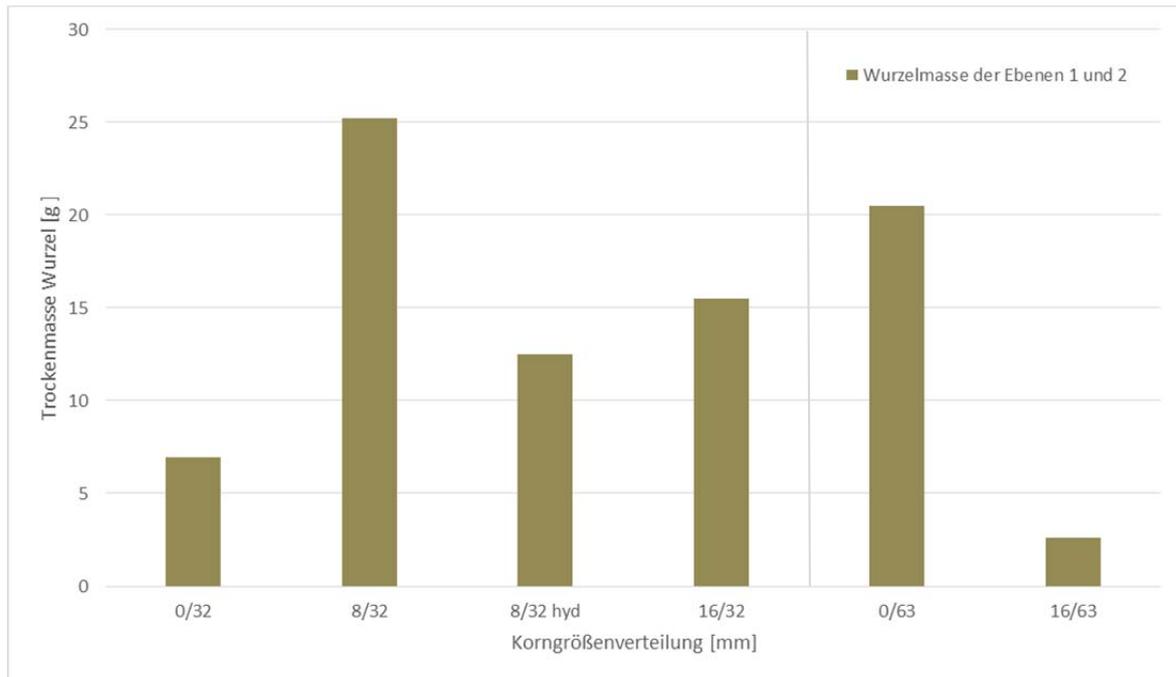


Abbildung 52: Trockenmasse der gesamten Wurzelmasse der Wegeaufbau-Versuchsboxen

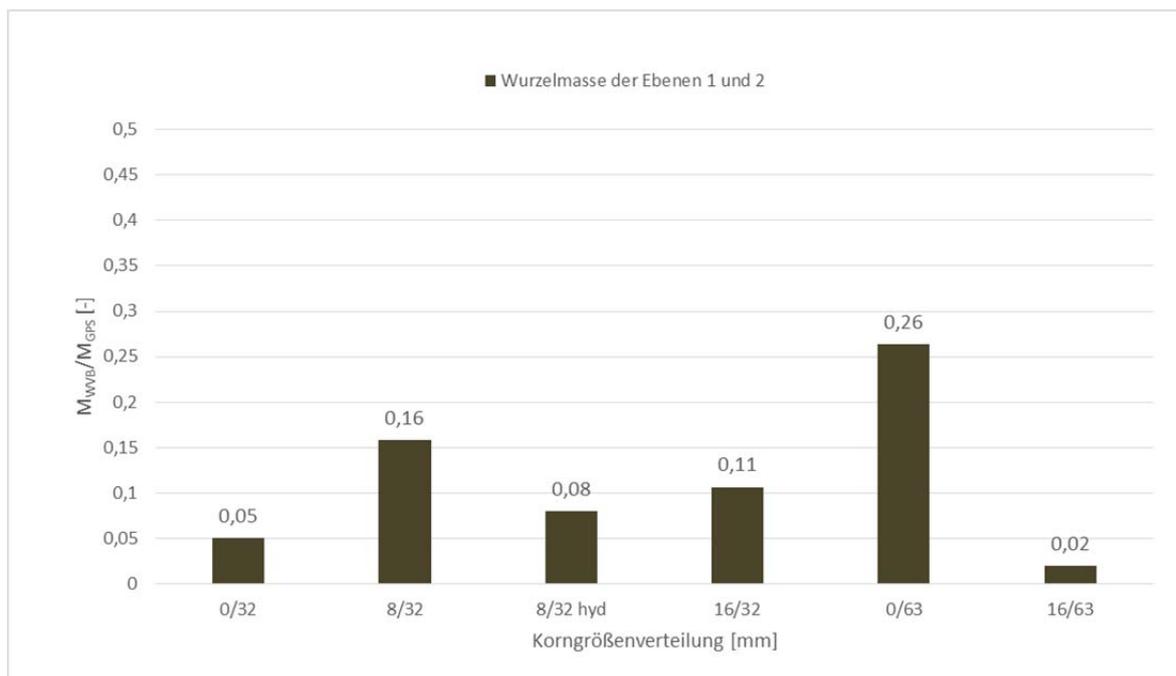
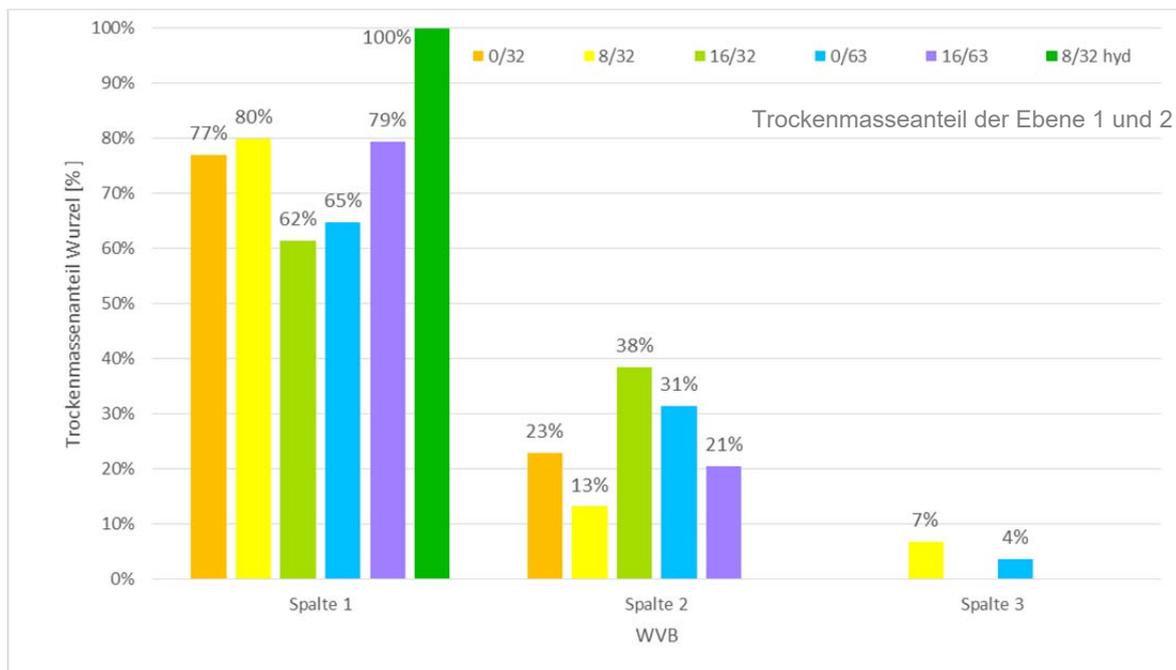


Abbildung 53: Gesamtwurzelmasse der Ebenen 1 und 2 der Wegeaufbau-Versuchsboxen in Relation zur Wurzelmasse der Gehölzpflanzstreifen

Um die Wurzelmasse der Wegeaufbau-Versuchsboxen (Ebene 1 und 2) miteinander vergleichen zu können wurde diese in Abbildung 53 in Relation zur Wurzelmasse des dazugehörigen Gehölzpflanzstreifen ( $M_{WVB}/M_{GPS}$ ) gesetzt. Hier zeigt sich wie bei den absoluten Werten der Wurzelmassen der Wegeaufbau-Versuchsbox bei den Substraten mit Größtkorn 32 mm ein Anstieg der Werte bei größer werdenden Kleinstkorn

(Ausnahme Substrat 8/32). Wie auch schon in Abbildung 52 ist der Wert von Substrat 8/32 höher als die Werte der anderen Substrate mit dem Größtkorn 32 mm. Die größte Wurzelbiomasse zeigt das Substrat 0/63, die niedrigste hat das Substrat 16/63.

Wenn man, wie in Abbildung 54 dargestellt, die Wurzelmassenanteile der Wegeaufbau-Versuchsboxen in Spalten betrachtet (gezählt wird ausgehend vom Gehölzpflanzstreifen), wird ersichtlich, dass in Spalte 1 die größte Wurzelmasse zu finden ist und in Spalte 2 die Wurzelmasse deutlich geringer ist. Nur in den Substraten 8/32 und 0/63 hat sich das Wurzelsystem bis in die dritte Spalte entwickelt. In allen anderen Feldern sind keine relevanten Wurzeln in der dritten Spalte gefunden worden. In der Box mit dem hydraulisch stabilisiertem Substrat 8/32 sind alle Wurzeln nur in der ersten Spalte zu finden. Möglicherweise ist das Substrat ab Spalte 2 aufgrund der Verfestigung nicht mehr für die Wurzeln durchdringbar.



**Abbildung 54: Wurzelmassenanteile der Wegeaufbau-Versuchsboxen in Spalten 1-3**

Abbildung 55 zeigt, dass die Verteilung der relativen Wurzelmasse der Wegeaufbau-Versuchsboxen-Plots ( $M_{WVB}/M_{GPS}$  Plots) in Spalte 1 bei allen Korngrößenmischungen, außer beim Substrat 16/32, am weitesten ist. Das Substrat 16/32 hat in der Spalte 2 die höchste Streuung. Das Substrat 8/32 und 0/63 haben in Spalte 3 die minimalste Wurzelmasse.

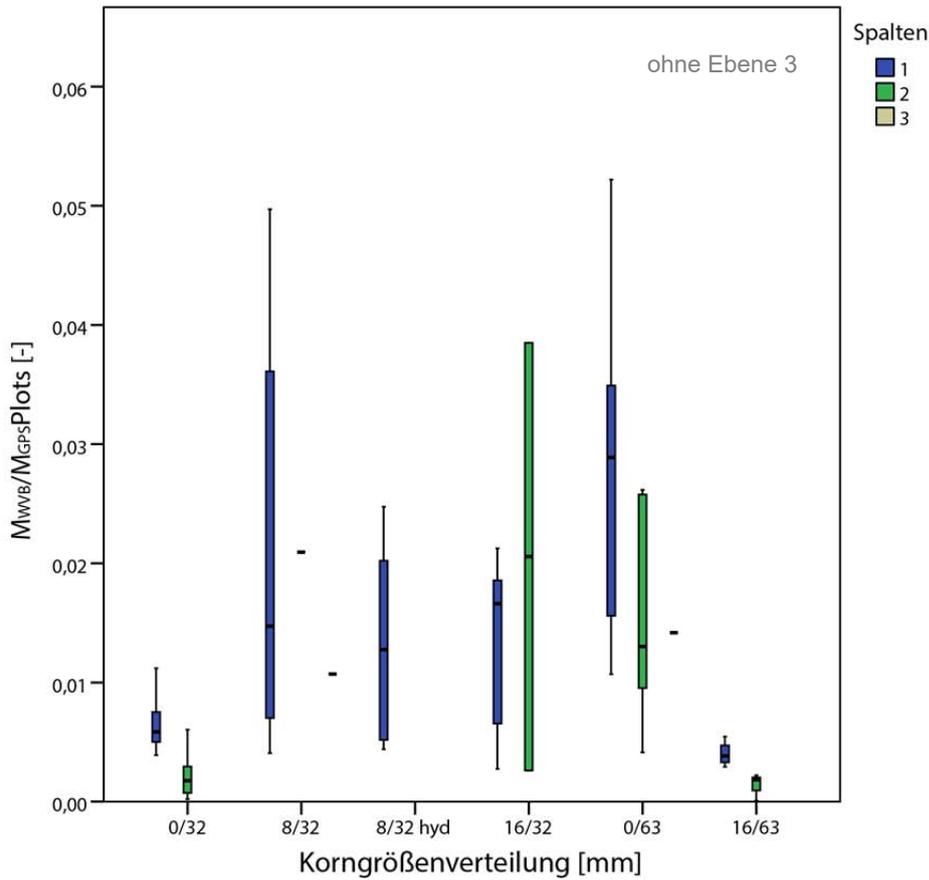


Abbildung 55: Verteilung der relativen Wurzelmasse der Wegeaufbau-Versuchsboxen-Plots in Spalten

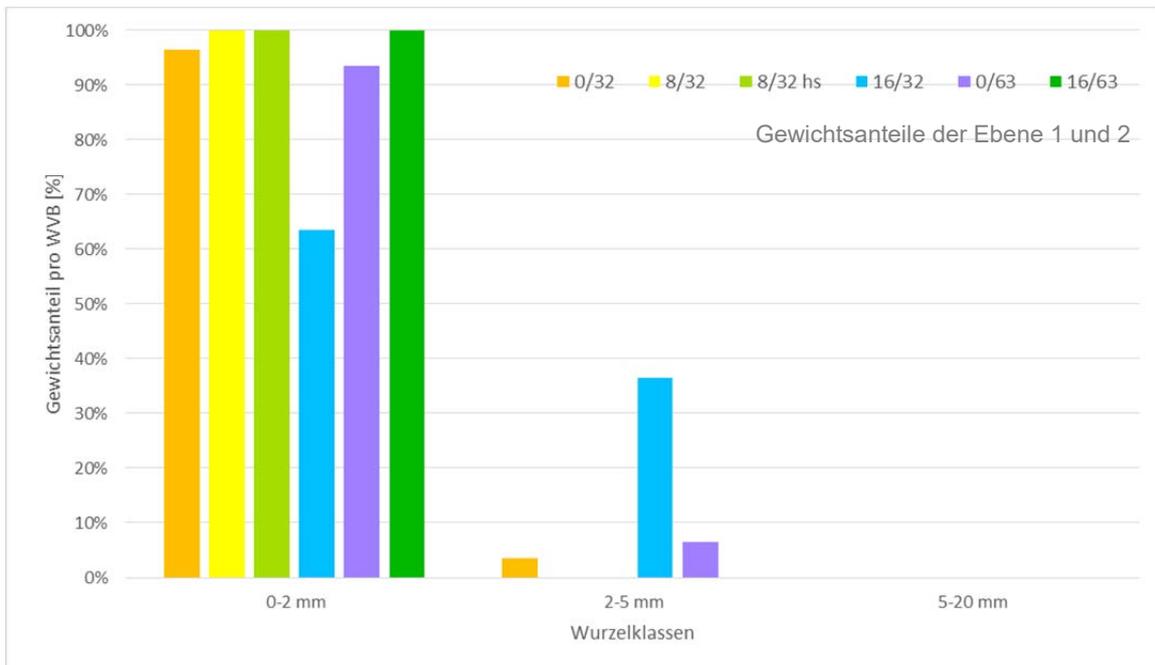
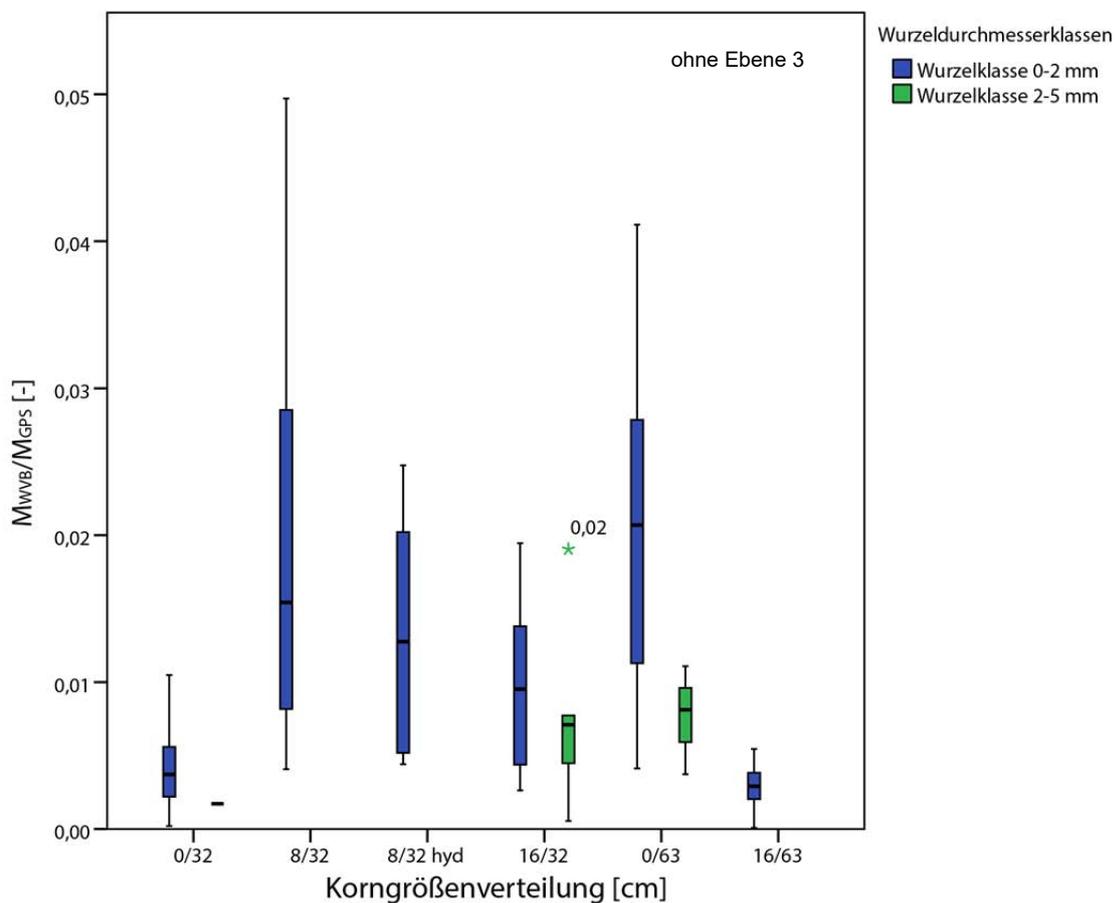


Abbildung 56: relative Gewichtsanteile der Ebenen 1 und 2 nach Wurzelklassen der Wegeaufbau-Versuchsboxen

Abbildung 56 zeigt deutlich, dass nach einer Vegetationsperiode der größte Gewichtsanteil im Wurzelbereich mit 0-2 mm Durchmesser vorliegt. Bei dem Substrat 16/32 ist auch ein verhältnismäßig relativ hoher Anteil an Mittelwurzeln mit 2-5 mm Durchmesser vorhanden.

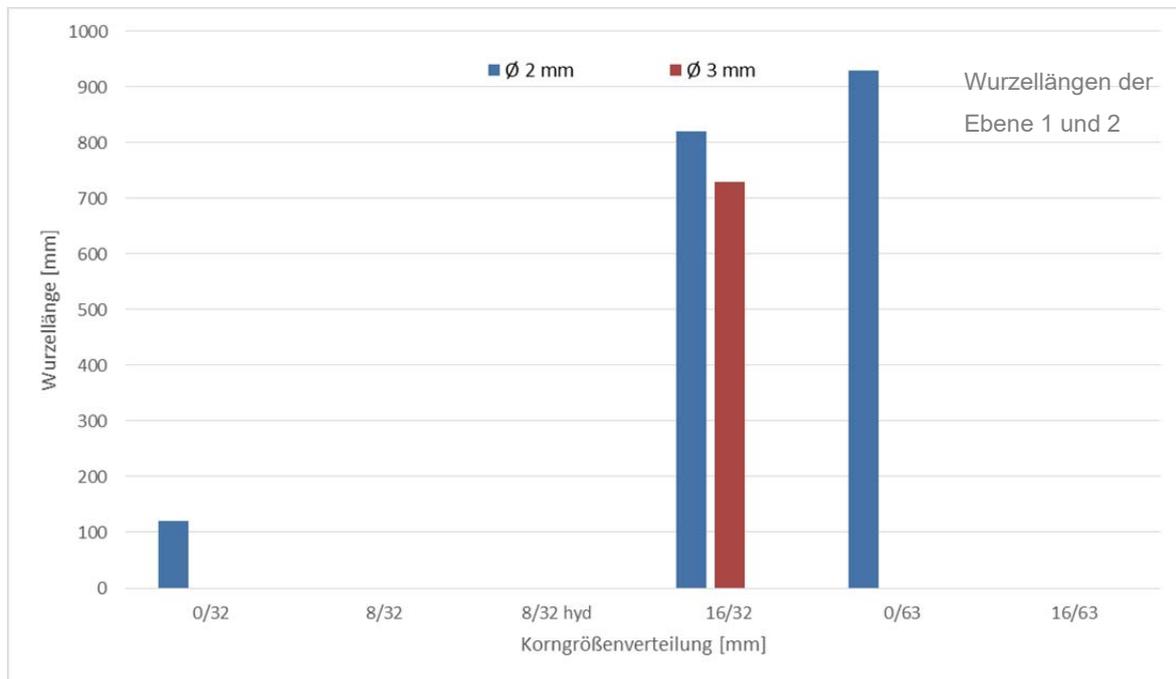
Bei Betrachtung der Verteilung relativen Wurzelmasse der Wegeaufbau-Versuchsboxen pro Plot ( $M_{WVB}/M_{GPS}$ ) aufgeteilt in Wurzeldurchmesserklassen in Abbildung 57 ist ersichtlich, dass in der Wurzelklasse 0-2 mm mit Größtkorn 32 mm ab dem Substrat 8/32, der Median bei größer werdenden Kleinstkorn sinkt. Das zeigt sich auch bei Größtkorn 63 mm. Die weiteste Verteilung hat das Substrat 8/32, die geringste die größten und feinkörnigsten Substrate 16/63 und 0/32. Wurzelmasse der Wurzelklasse 2-5 mm findet man nur in den Substraten 0/32, 16/32 und 0/63 in verhältnismäßig geringen Anteilen.



**Abbildung 57: Verteilung der relativen Wurzelmasse der Wegeaufbau-Versuchsboxen-Plots der Ebenen 1 und 2 nach Wurzeldurchmesserklassen**

Im Zuge der Auswertung wurden von den Wurzeln ab einem Durchmesser von 2 mm die Länge gemessen. Die Ergebnisse der Wegeaufbau-Versuchsboxen in Abbildung 58 zeigen, dass nur in drei der sechs Boxen Wurzeln mit über 2 mm Durchmesser gewachsen sind. Die größte Gesamtlänge der Wegeaufbau-Versuchsboxen findet man

mit einem Durchmesser von 2 mm und einer Länge von 930 mm beim Substrat 0/63. Ebenso findet man welche in 0/32 und 16/32 wobei hier auch relativ viele Wurzeln mit einem Durchmesser von 3 mm gefunden wurden.

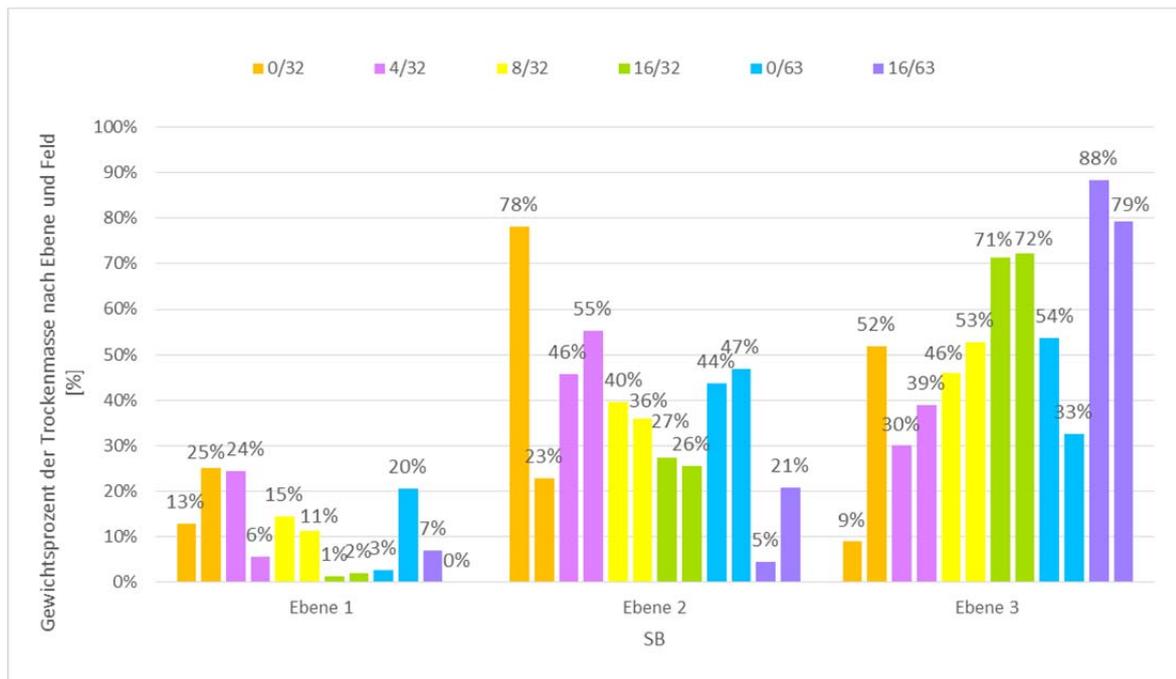


**Abbildung 58: Wurzellänge der Ebenen 1 und 2 nach Wurzeldurchmesser der Wegeaufbau-Versuchsflächen**

#### 4.6 Substratversuche

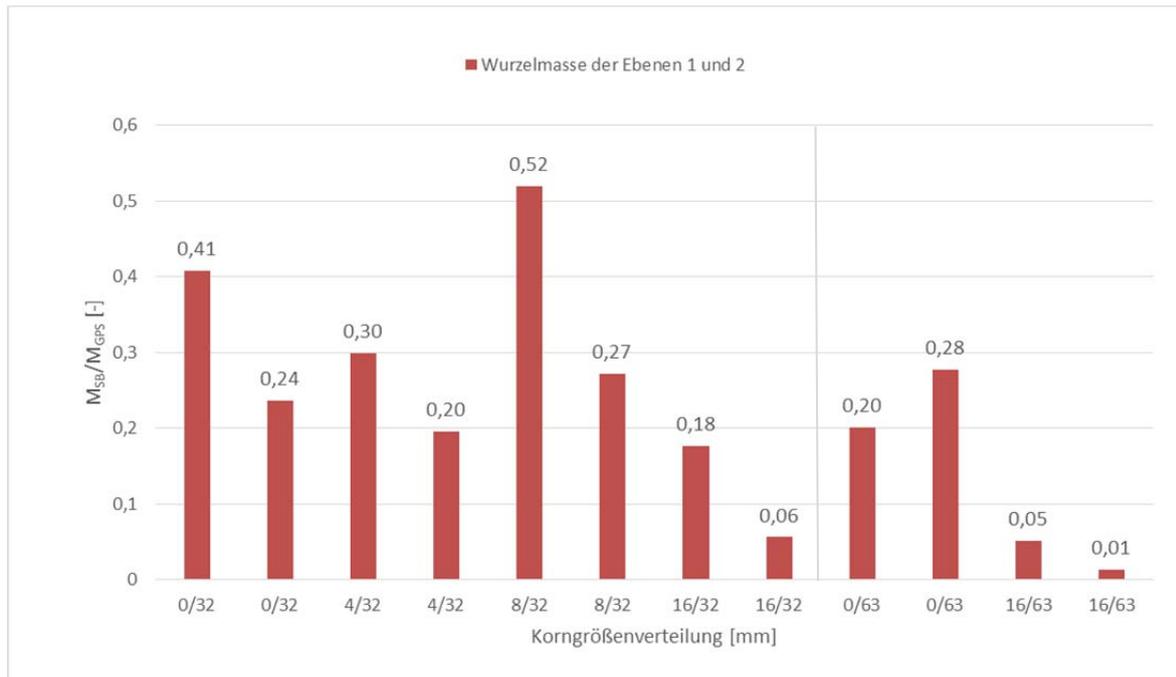
Neben den Wegeaufbau-Versuchen wurden auch Substratversuche durchgeführt, dessen Ergebnisse in diesem Kapitel behandelt werden. Die Wurzelmassenanteile der 3 Ebenen der Substratversuchsboxen in Abbildung 59 zeigen wie bei den Wegeaufbau-Versuchsboxen, dass Ebene 3 den größten Anteil der Biomasse aufweist. Für weitere Analysen wird diese Ebene aufgrund des möglichen Einflusses des Vlieses und dem Feinkornanteil nicht berücksichtigt.

Wenn man die einzelnen Substratversuchsboxen mit gleicher Korngrößenverteilung miteinander vergleicht, dann sieht man, dass es teils gewaltige Unterschiede in den Wurzelmassenanteilen gibt, die zum jetzigen Zeitpunkt nicht erklärbar sind.

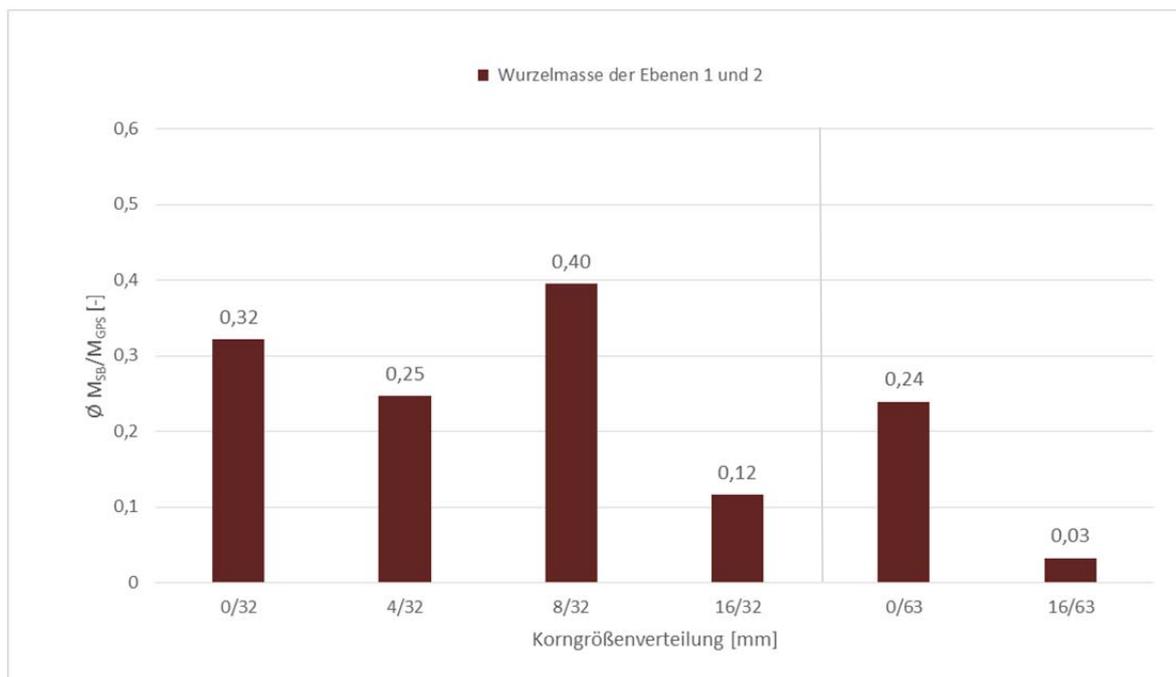


**Abbildung 59: Wurzelmassenanteile der Substratversuchsboxen in Ebene 1-3**

Damit die Wurzelmasse der Substratversuchsboxen miteinander verglichen werden kann wurden diese in Abbildung 60 in Beziehung zur Wurzelmasse des dazugehörigen Gehölzpflanzstreifen gesetzt. Für alle nachfolgenden Analysen wurden jeweils die Mittelwerte der Ergebnisse der beiden Substratversuchsboxen mit selber Korngrößenverteilung herangezogen. Man muss jedoch beachten, dass die Wurzelmassen innerhalb der selben Korngrößenverteilung und Ebene sehr unterschiedlich sind. Im Gegensatz zur Reihung nach Größtkorn bei der relativen Wurzelmasse der Wegeaufbau-Versuchsbox, sinken die Werte bei der relativen Wurzelmasse der Substratversuchsboxen ( $M_{SB}/M_{GPS}$ ) bei größer werdendem Kleinstkorn bei Korngrößen bis 32 mm (Ausnahme Substrat 8/32) (siehe Abbildung 61). Das Substrat mit der Korngrößenverteilung 8/32 hat die höchste relative Wurzelmasse ( $M_{SB}/M_{GPS}$ ). Die Substrate mit dem Größtkorn 63 mm verhalten sich in den Substratversuchsboxen genauso wie in den Wegeaufbau-Versuchsboxen. Die Wurzelbiomasse in 0/63 ist relativ hoch und bei 16/63 sehr niedrig. Letzteres hat auch von allen Substraten die niedrigste relative Wurzelmasse ( $M_{SB}/M_{GPS}$ ).

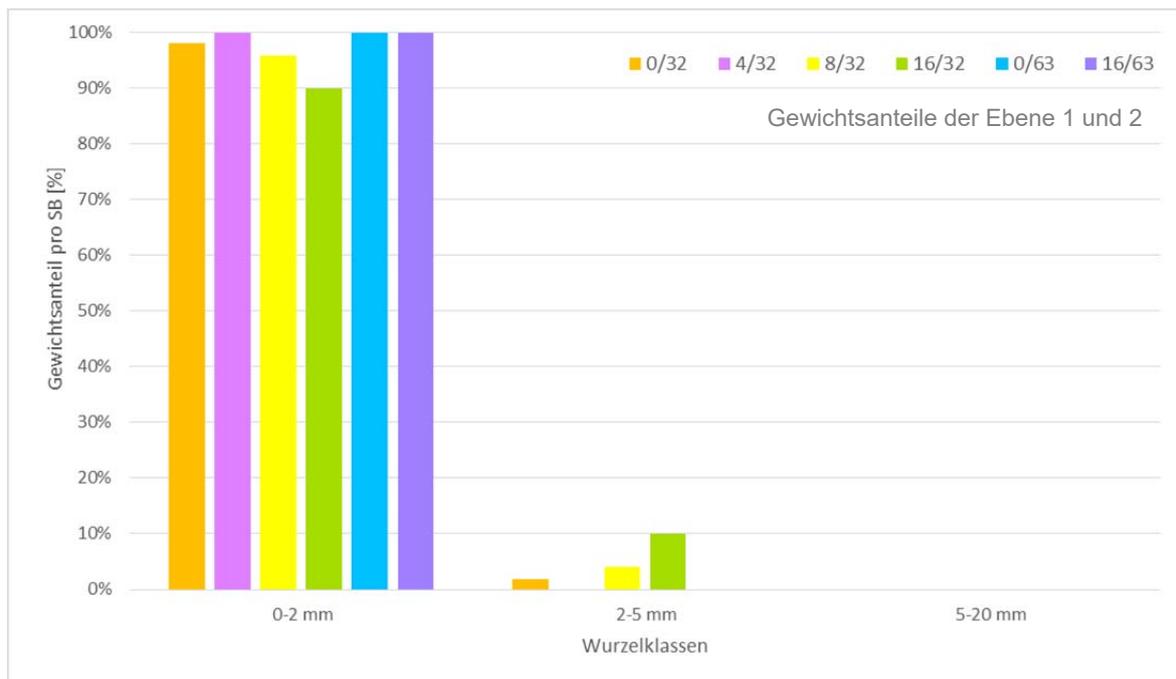


**Abbildung 60: Gesamtwurzelmasse der Substratversuchsboxen in Relation zur Wurzelmasse der Gehölzpflanzstreifen der Substratfelder**

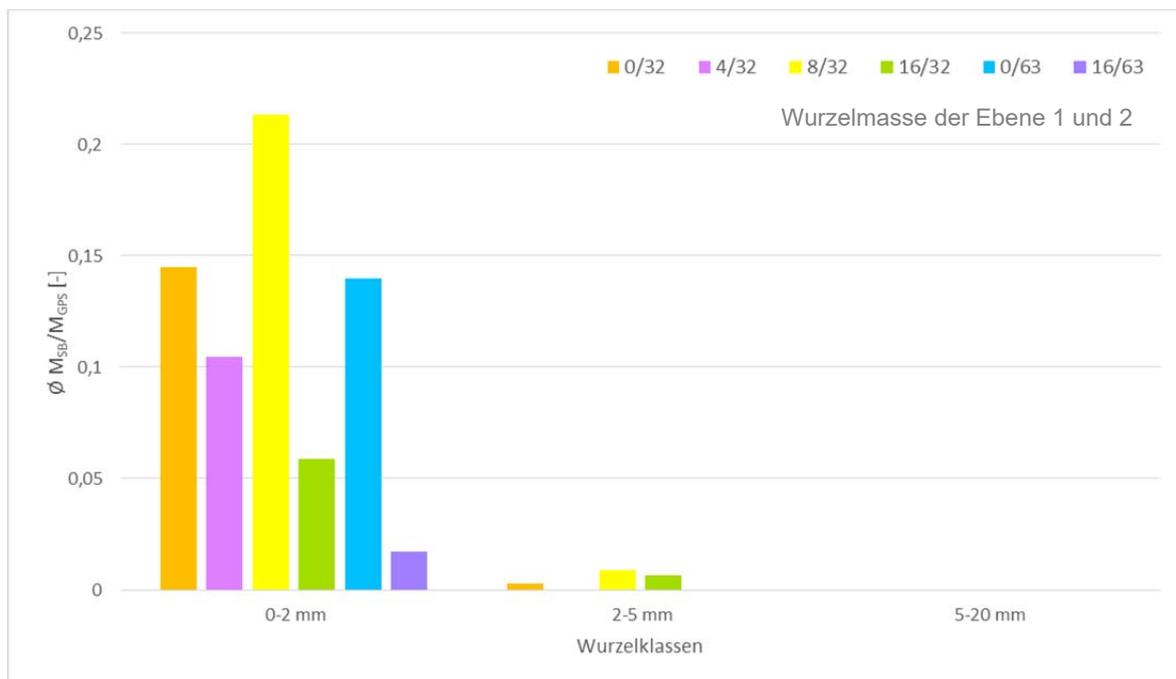


**Abbildung 61: Gemittelte Wurzelmasse der Substratversuchsboxen in Relation zur Wurzelmasse der Gehölzpflanzstreifen der Substratfelder**

Abbildung 62 zeigt wie bei den Wegeaufbauversuchsflächen, dass nach einer Vegetationsperiode der größte Gewichtsanteil im Wurzelbereich mit 0-2 mm Durchmesser vorliegt. Beim Substrat 16/32 ist ebenfalls ein erhöhter Anteil an Mittelwurzeln mit 2-5 mm Durchmesser vorhanden.



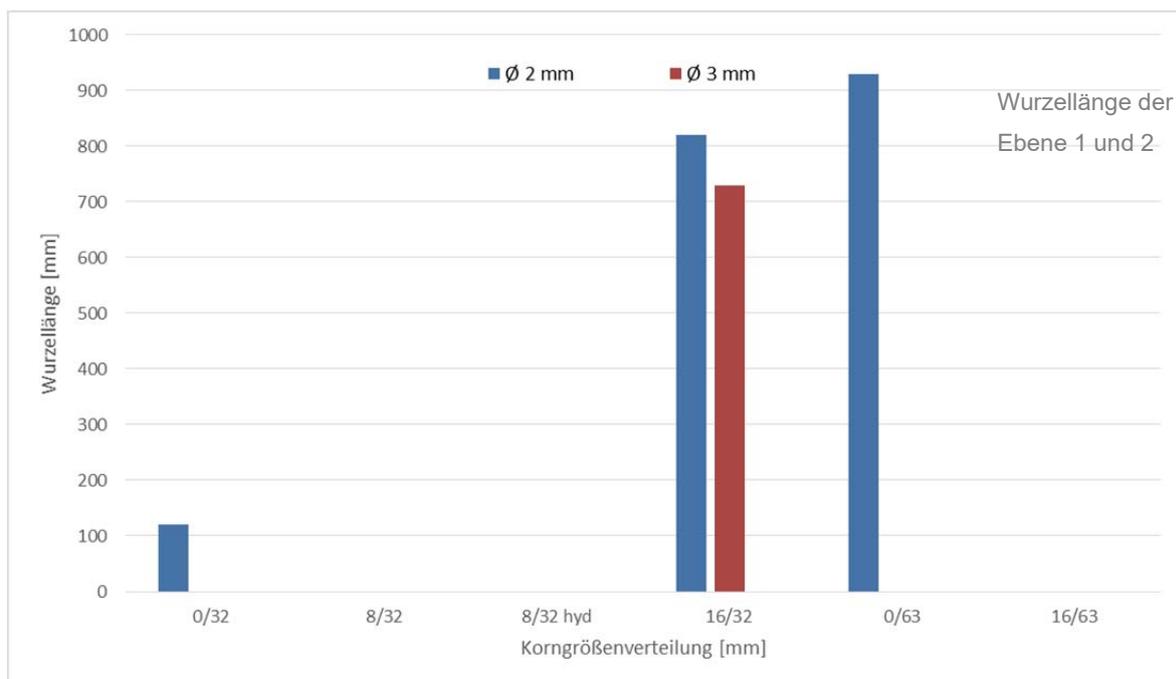
**Abbildung 62: Relative gemittelte Gewichtsanteile nach Wurzelklassen der Substratversuchsboxen**



**Abbildung 63: Gemittelte Wurzelmasse der Substratversuchsboxen in Relation zur Wurzelmasse der Gehölzpflanzstreifen der Substratfelder nach Wurzelklassen**

Die relative Wurzelmasse der Substratversuchsboxen in Abbildung 63 verhält sich ähnlich der der Wegeaufbau-Versuchsboxen. In der Wurzelklasse 0-2 mm mit Größtkorn 32 mm sinkt die relative Wurzelmasse bei größer werdenden Kleinstkorn 8/32. Im Gegensatz zu den Wegeaufbau-Versuchsboxen ist der Wert vom Substrat 0/32 mit 0,14 am zweithöchsten. Das gleiche zeigt sich ebenfalls bei Größtkorn 63 mm. Wie auch schon in Abbildung 57 ist der Wert von Substrat 8/32 der höchste und von 16/63 der niedrigste. Wurzelmasse der Wurzelklasse 2-5 mm finden sich ebenfalls in den Substraten 0/32, 16/32 und 0/63 in verhältnismäßig geringen Anteilen.

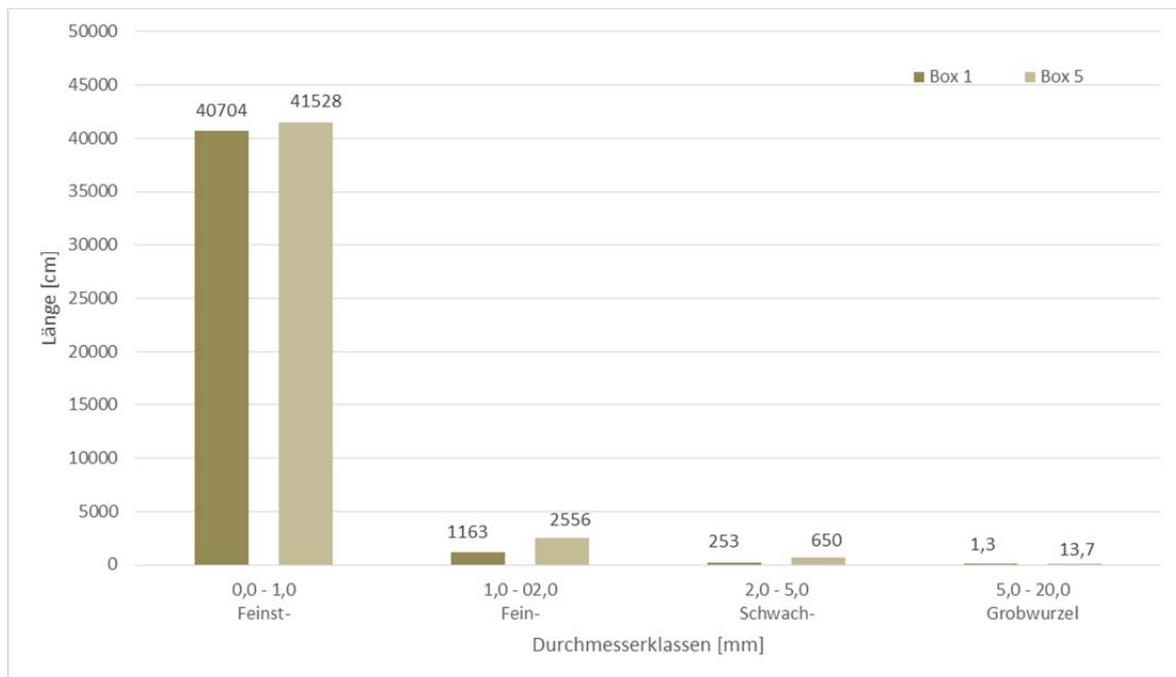
In Abbildung 64 sind die Wurzellänge nach Wurzel Durchmesser der Substratversuchsboxen abgebildet. Nur in drei der 12 Boxen sind Wurzeln mit über 2 mm Durchmesser gewachsen. Die größte Gesamtlänge der Wegeaufbau-Versuchsboxen findet man mit einem Durchmesser von 2 mm und einer Länge von 380 mm beim Substrat 8/32. Ebenso findet man welche in 16/32 und 0/32, wobei hier nur Wurzeln mit einem Durchmesser von 3 mm gefunden wurden.



**Abbildung 64: Wurzellänge der Substratversuchsboxen nach Wurzel Durchmesser**

## 4.7 Wurzelscans

Abbildung 65 zeigt die Wurzellängen der Wegeaufbau-Versuchsboxen aufgeteilt in Durchmesserklassen (Feinst-, Fein-, Schwach- und Grobwurzel) von den Substraten 0/32 und 16/63.



**Abbildung 65: Wurzellängen der Wegeaufbau-Versuchsboxen 1 und 5, aufgeteilt in Durchmesserklassen (SCHIEFERMAIR, 2015)**

Der größte Wurzelanteil nach Wurzellängen liegt im Feinstwurzelbereich (< 1 mm) mit 40.704 cm Wurzellänge im Substrat 0/32 und 41.528 cm Wurzellänge im Substrat 16/63. Im Feinwurzelbereich (1 - < 2 mm) weist das Substrat 16/63 die doppelte Wurzellänge als die Wurzeln im Substrat 0/32 auf. Im Schwachwurzelbereich (2 - < 5 mm) zeigt die Wurzellängensumme im Substrat 16/63 einen fast dreimal so hohen Anteil wie im Substrat 0/32. Im Grobwurzelbereich (5 - < 20 mm) befindet sich im Substrat 16/63 mit 13,7 cm mehr als die zehnfache Wurzellängensumme an Grobwurzeln wie im Substrat 0/32.

Obwohl die beiden Boxen beinahe dieselbe Biomasse vorweisen, ist ein relativer Unterschied zwischen Fein- bis Grobwurzelbereich erkennbar. Eine mögliche Erklärung für die relativ höheren Wurzellängen für Fein-, Schwach- und Grobwurzeln im Substrat 16/63 können die bestehenden Hohlräume sein. Diese bieten den Wurzeln bessere Möglichkeiten stärker zu wachsen.

## 5. Diskussion und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden dreijährige Feldversuche angelegt, durch welche die Auswirkungen des Einwurzelns von Wurzeln in verschiedenen gestuften Korngrößenmischungen auf das Substrat aus Kantkorn untersucht werden soll. Den ersten Teil des Feldversuches wurde nach einer Vegetationsperiode erhoben und analysiert. Durch Bodenwassergehaltssensoren in der Erde wurden Erkenntnisse über die mögliche Speicherung und den Abfluss von Wasser in den Feldversuchen gewonnen. Lastplattenversuche erhoben geotechnische Randbedingungen, um mögliche Unterschiede zwischen den Versuchsboxen zu erhalten. Wurzelscans brachten Erkenntnisse über die Wurzelmorphologie.

Die Kalibrierung der Bodenwassergehaltssensoren führte zu Problemen, da der Großteil der verwendeten Substrate eine zu große Korngrößenverteilung für eine messtechnische Erfassung aufwies. Deswegen wurden die Sensoren beim Einbau in die Versuchsfelder in einen Mullstrumpf mit Splitt (2/4) gebettet. Dieser Splitt (2/4), die Korngrößenverteilung 0/10 vom Substrat 0/32 und die Erde der Gehölzpflanzstreifen wurden zur Kalibrierung im Labor herangezogen. Die gewonnenen Kalibrierungskurven führten zu nachvollziehbaren Ergebnissen bei den späteren Naturmessungen. Um jedoch eine einwandfreie und nicht durch ein anderes Substrat, wie in diesem Fall der Splitt (2/4), verfälschtes Messergebnis zu erhalten, sollte bei zukünftigen Bodenwassermessungen andere Messsensoren verwendet werden. Diese sollten für gröberes Substrat geeignet sein.

Die Ergebnisse der Messungen der Bodenwassergehaltssensoren im Erdreich von Mitte August 2015 bis Mitte April 2016 zeigen, dass der Gehölzpflanzstreifen, der vom umgebenen Erdreich nicht baulich begrenzt ist, durchgehend einen geringeren volumetrischen Wassergehalt ( $\Theta_v$ ) aufweist, als die anderen von den Versuchsboxen eingegrenzten Gehölzpflanzstreifen. Es lässt sich jedoch ein Zusammenhang zwischen dem volumetrischen Wassergehalt ( $\Theta_v$ ) der Gehölzpflanzstreifen und der unterirdischen Biomasse erkennen. Die unterirdische Biomasse der Gehölzpflanzstreifen nimmt mit dem volumetrischen Wassergehalt ( $\Theta_v$ ) pro Gehölzpflanzstreifen zu. Eine Unterversorgung im äußersten Gehölzpflanzstreifen der Pflanzen konnte jedoch nicht festgestellt werden. Bei der Betrachtung der Gehölzpflanzstreifen in Spalten zeigt sich, dass sich im äußersten Gehölzpflanzstreifen der höchste Anteil an Wurzeln in der dritten Spalte befindet, obwohl die Wurzeln Platz hätten in das Erdreich, um den Versuch zu wachsen. Eine bauliche Umgrenzung des Gehölzpflanzstreifens, wäre für zukünftige Versuche jedoch vom Vorteil, um gleiche Bedingungen bieten zu können.

Die Lastplattenversuche ergaben, dass die Setzungen beim hydraulisch stabilisierten Substrat 8/32 durchschnittlich am höchsten sind. Ein Grund dafür ist die Stabilisierung durch den Zement. Ein eindeutiger Trend, dass in Versuchsboxen mit einem niedrigeren Verformungsmodul ( $E_{vd}$ ) mehr Wurzeln gewachsen sind und dementsprechend mehr Wurzelmasse haben, ist nicht erkennbar. Dennoch ist zu sagen, dass in den Versuchsboxen mit den Substraten 8/32 hydraulisch stabilisiert und 16/32 hohe Verformungsmodule ( $E_{vd}$ ) gemessen wurden und relativ wenig Wurzelmasse vorhanden war. An den Substratversuchen wurden zwei Mal im Abstand von fünf Monaten die Setzungen gemessen. Die Ergebnisse zeigen, dass sich in dieser Zeit die Tragfähigkeit aufgrund von natürlichen Setzungen fast verdoppelt hat.

Die Pflanzen konnten sich trotz des heißen und trockenen Sommers gut entwickeln. Nur 15 % aller Steckhölzer sind nicht ausgetrieben und mit steigendem Sprossdurchmesser steigt die Sprosslänge linear an. Die Länge der meisten Sprosse liegt nach einer Vegetationsperiode zwischen 21 und 160 cm und es wurde eine maximale Sprosslänge von 208 cm gemessen. 3/5 aller Sprosse sind, gemessen 1 cm von der Schnittstelle, zwischen 6 und 11 mm dick.

Die Ergebnisse nach der ersten Vegetationsperiode noch mit Vorsicht zu interpretieren. Im Vergleich der Wegeaufbau-Versuche mit den Substratversuchen fällt auf, dass sich die Wurzeln völlig unterschiedlich in den Substraten entwickelt haben. In den Wegeaufbau-Versuchsboxen steigt die Wurzelmasse bei Größtkorn 32 mit steigendem Kleinstkorn (0/32- 16/32). Bei den Substratversuchen verhält es sich genau konträr (16/32- 0/32). Hier sinkt die Wurzelmasse bei Größtkorn 32 mit steigendem Kleinstkorn. Die Ausnahme ist bei beiden das Substrat 8/32, hier ist die Wurzelmasse am größten. Bei Größtkorn 63 sinkt die Wurzelmasse bei beiden Versuchen mit steigendem Kleinstkorn. Ein Grund für den höchsten Wert bei Korngrößenverteilung 0/63 und 8/32 könnte einerseits der große Anteil an kleinen Korngrößen sein, zwischen denen sich genug Feuchtigkeit sammeln kann, um ein geeignetes Milieu für die Wurzeln zu bieten. Andererseits sind noch immer große Korngrößen vorhanden, die genügend Platz zum Wachsen der Wurzeln bieten. Diese Unterschiede in der Wurzelmasse bei beiden Versuchen können unter Umständen auf eine unterschiedlich starke Verdichtung bzw. einer schlechten Durchmischung der Substrate zurückzuführen sein, sind aber bis zum jetzigen Zeitpunkt nicht eindeutig nachvollziehbar.

Untersuchungen zur räumlichen Ausbreitung der Wurzeln ergaben eine klare Abnahme der Wurzelmasse mit zunehmendem Abstand zu den Steckhölzern. Das mit Zement stabilisierte Substrat zeigte ein Wurzelwachstum nur im steckholznahen Bereich (Spalte 1). Dies kann unter Umständen auf die Stabilisierung zurückgeführt werden. Die

folgenden Untersuchungen im Herbst 2016 und 2017 sollen dahingehend Aufschluss geben. Die Bewurzelungsdichte in verschiedenen Tiefen zeigte einen erhöhten Anteil an Biomasse in der untersten Ebene. Dies spiegelt das natürliche Wurzelverhalten von Steckhölzern wieder, welche am unteren Ende vermehrt Wurzeln entwickeln. Zusätzlich scheinen jedoch auch eine erhöhte Feuchtigkeit im Vlies zwischen obere und untere Tragschicht sowie ein Auswaschen der Feinanteile der Substrate von höheren in tiefere Bereiche und das Einschwemmen von Erde aus den Gehölzpflanzstreifen in die Versuchsboxen, das Wurzelverhalten verstärkt zu beeinflussen. Vor allem die größten Korngrößenmischungen wie 16/32 und 16/63 zeigen in der 3. Ebene einen relativ hohen Anteil an Wurzelmasse im Vergleich zu den Ebenen 1 und 2. Für die kommenden Erhebungen sollen in den einzelnen Ebenen Siebanalysen durchgeführt werden um diese Vermutungen zu überprüfen.

Bei der Betrachtung der Wurzeldurchmesser ist die Erkenntnis, dass nach einer Vegetationsperiode der größte Gewichtsanteil im Wurzelbereich in der Durchmesserklasse 0-2 mm vorliegt. Die Wurzelscans zeigen dasselbe Ergebnis bei der Betrachtung der Wurzellänge je Durchmesserklasse. Nur das Substrat 16/32 hat in dieser Zeitspanne schon einen relativ hohen Anteil von fast 40% an Mittelwurzeln mit 2-5 mm Durchmesser. Die höchste Gesamtlänge von Wurzeln über den Durchmesser von 2 mm weisen bei den Wegeaufbau-Versuchsboxen das grobkörnige Substrat 0/63 und 16/32 und bei den Substratversuchen 8/32 und ebenfalls 16/32 auf.

Die Ergebnisse nach einer Vegetationsperiode zeigen auf, dass eine feingestufte Korngrößenverteilung (0,1 mm bis 63 mm) mit viel Anteil an Feinmaterial und auch hohen Anteilen an grobem Material zu hoher Bewurzelung führt. Dies kann unter Umständen durch den einerseits vorhandenen Feinkornanteil und der damit verbundenen Wasserspeicherfähigkeit, sowie den Grobkörnern und den damit verbundenen Hohlräumen zurückzuführen sein. Im Gegensatz dazu ist bei einer Korngrößenverteilung im groben Bereich (zwischen 16 mm bis 63 mm) eine sehr geringe Biomasse vorzufinden.

Die Ergebnisse nach einem Jahr Messung bestätigen die Untersuchungen von KOPINGA (1994) und STRECKENBACH et al. (2008). Diese besagen, dass die Verwendung von grobem Schotter das Wurzelwachstum durch:

- das Abfließen des Kondenswassers
- der erhöhten mechanischen Resistenz des Substrates, sowie
- des großen zu überbrückenden Abstand zwischen den Einzelkörnern

zur Verminderung des Wurzelwachstums führt (KOPINGA, 1994 und STRECKENBACH et al., 2008). Welcher dieser Punkte zutrifft ist zum jetzigen Zeitpunkt des Versuches noch nicht geklärt. Generell gilt jedoch festzuhalten, dass nach dem ersten Jahr der Versuche

lediglich ein Einwurzelverhalten beschrieben werden kann und daraus nicht von einer dauerhaften Bewurzelung des Substrates ausgegangen werden kann. Die Beobachtung über einen längeren Zeitraum ermöglicht die Verfolgung der Entwicklung der Biomasse und lässt Schlüsse zur Überlebensfähigkeit und dem Verhalten von Wurzeln in den unterschiedlichen Substraten zu.

Im Herbst 2016 und 2017 werden die Untersuchungen zu den kleinräumigen Feldversuchen fortgesetzt. Die Entwicklung der Wurzelbiomasse in den Versuchsboxen ermöglicht nach der 2. Vegetationsperiode konkretere Hinweise auf die Unterschiede zu den verschiedenen Korngrößenmischungen.

Für die weiteren Untersuchungen ist zu überlegen, ob weniger Aufnahmeparameter bei der Erhebung der ober- und unterirdischen Biomasse reichen. Im Speziellen wurde die oberirdische Biomasse sehr genau erhoben. Man könnte zum Beispiel von der separaten Erhebung der Haupt- und Seitentriebe der oberirdischen Biomasse absehen oder den Durchmesser der Steckhölzer, da die Daten in dieser Arbeit nicht zur Verwendung kamen. Außerdem ist zu hinterfragen, wie sinnvoll es ist die Längen der Wurzeln zu erheben, da die Daten zu keinen Mehrnutzen haben.

Weiter muss man die Erhebungsmethode überdenken. Da zuerst die ganze oberirdische und dann erst die unterirdische Biomasse erhoben wurde, kann es zu Verzerrungen in den Ergebnissen gekommen sein. Das Abschneiden der Sprosse hat nämlich ein Wurzelwachstum anregen können, das bei Wurzeln die später erhoben wurden höher sein kann, als bei Wurzeln die früher entnommen wurden. Zukünftig wäre eine zeitgleiche Erhebung von Vorteil.

Mit dieser Arbeit konnten erste Erkenntnisse und Erfahrungen über den Bau solch einer Versuchsfläche, der Kalibrierung der Bodenwassergehaltssensoren, der Lastplattenversuche an solchen Standorten, der Aufnahmemethoden und dem Verhalten von Wurzeln in unterschiedlichen Kantkornmischungen gesammelt werden. All diese Erkenntnisse sollen den Erhebungen der nächsten Jahre, zukünftigen Forschungen und einer Lösung zur Minimierung von Wurzelschäden an asphaltierten Wegeböden dienen.

## 6. Literaturverzeichnis

BALDER, H. (1998): Die Wurzeln der Stadtbäume. Ein Handbuch zum vorbeugenden und nachsorgenden Wurzelschutz. Parey Buchverlag, Berlin.

BARKER, P.A. (1983): Some urban trees of California: Maintenance problems and genetic improvement possibilities. In METRIA: 4. Proceedings of the Fourth Biennial Conference of the Metropolitan Tree Improvement Alliance (H.D. Gerhold, ed.), pp. 47 – 54. The Pennsylvania State University, School of Forest Resources.

BURGER , D.W. and TAYLOR, Z. (2000): Selection and propagation of deep-rooted ornamental trees for urban environments. In Report of the Elvenia J. Slosson Fund for Ornamental Horticulture 1998–1999. (L. Dodge, ed.), pp. 6–7. University of California, Davis, Division of Agriculture and Natural Resources.

CLIMATE-DATA.ORG (Hrsg.) (2016): Klima: Großenzersdorf. Online im Internet: <http://de.climate-data.org/location/22986/>, Stand: 17.8.2016.

COSTELLO, L.R., and JONES, K.S. (2003): Reducing infrastructure damage by tree roots: A compendium of strategies. International Society of Arboriculture, Cohasset, CA. 119 pp.

COSTELLO, L.R., PERRY, E.J. and KELLEY, D. (2000): Field Assessment of Soil Factors Contributing to Sidewalk Damage by Tree Roots. In Strategies to Reduce Infrastructure Damage by Tree Roots. Proceedings of a Symposium for Researchers and Practitioners. Western Chapter, International Society of Arboriculture, Cohasset, CA.

DAY, R.W. (1991): Damage of structures due to tree roots. Journal of Performance of Constructed Facilities 5, 200–207.

DEPARTMENT FÜR NUTZPFLANZENWISSENSCHAFTEN (DNW) (Hrsg.), (2016a): Versuchswirtschaft Großenzersdorf. Online im Internet: <http://www.dnw.boku.ac.at/vwg/organisation/die-versuchswirtschaft/>, Stand: 17.8.2016.

DEPARTMENT FÜR NUTZPFLANZENWISSENSCHAFTEN (DNW) (Hrsg.), (2016b): Wetterdaten Standort Raasdorf. Online im Internet: [https://dnw-web.boku.ac.at/dnw/wetter\\_form\\_pys.php](https://dnw-web.boku.ac.at/dnw/wetter_form_pys.php), Stand: 17.8.2016.

DOUSSAN, C.; PAGÈS, L.; PIERRET, A. (2003): Soil exploration and resource acquisition by plant roots: An architectural and modelling point of view. Agronomie 23, 419–431.

HAMILTON, W.D. (1984): Sidewalk/curb-breaking tree roots. 1. Why tree roots cause pavement problems. Arboricultural Journal 8 ,37 – 44.

HIETZ, P., KIKUTA, S., KARTUSCH, B., KÖNIGSHOFER, H., TREMETSBERGER, K. (2009): Bau der Pflanze. Skriptum zur gleichnamigen Lehrveranstaltung VU 831.106. Universität für Bodenkultur Wien, Department für Integrative Biologie und Biodiversitätsforschung, Institut für Botanik.

IGEWA (o.J.): Merkblatt Plattendruckversuch DIN 18134. Online im Internet: <http://www.igewa.de/merkblaetter/plattendruckversuch/plattendruckversuch.pdf>, Stand: 28.06.2016.

KÖBLER, G. (1997): Lexikon des europäischen Rechtsgeschichte. 4. Auflage. Verlag C. H. Beck, München.

KÖSTLER, J. N., BRÜCKNER E., BIBELRIETHER H. (1968): Die Wurzeln der Waldbäume. Untersuchungen zur Morphologie der Waldbäume in Mitteleuropa. Hamburg – Berlin.

KOPINGA, J. (1994): Aspects of the damage to asphalt road pavings caused by roots. In Watson, G., and D. Neely (Eds.). The Landscape Below Ground. Proceedings of an International Workshop on Tree Root Development in Urban Soils. International Society of Arboriculture, Champaign, IL. pp. 165-178.

KUTSCHERA, L., LICHTENEGGER, E. (2002): Wurzelatlas mitteleuropäischer Waldbäume und Sträucher. 1. Auflage. Leopold Stocker Verlag, Graz- Stuttgart.

LEUSCHNER, C., HERTEL, D., SCHMID, I., KOCH, O., MUHS, A., HÖLSCHER, D. (2004): Stand fine root biomass and fine root morphology in oldgrowth beech forests as a function of precipitation and soil fertility. *Plant and Soil* 258: 43 – 56.

LOISKANDL, W., BUCHAN, G.D., SOKOL, W., NOVAK, V., HIMMELBAUER, M. (2010): Calibrating electromagnetic short soil water sensors. *J. Hydrol. Hydromech.*, 58, 2010, 2, 114–125, Wien.

LÜTTGE, U., KLUGE, M. (2012): Botanik: Die einführende Biologie der Pflanzen. 7. Auflage, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.

MCPHERSON, E.G., PEPER, P.J. (1995): Infrastructure repair costs associated with street trees in 15 cities. In *Trees and Building Sites*. In Proceedings of and International Workshop on Trees and Buildings (G.W. Watson and D. Neely eds.), pp. 49–64. International Society of Arboriculture, Savoy, Ill, USA.

MCPHERSON, E.G. (2000): Expenditures associated with conflicts between street tree root growth and hardscape in California. *Journal of Arboriculture* 26, 289–297.

RANDRUP, T.B., MCPHERSON, E.G.; COSTELLO, L.R. (2003): A review of tree root conflicts with sidewalks, curbs, and roads. *Urban Ecosystems* 5: 209-225.

REICHWEIN, S. (2002): Baumwurzeln unter Verkehrsflächen. Untersuchungen zu Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln und Ansätze zur Schadensbehebung und Schadensvermeidungen. Dissertation am Fachbereich Landschaftsarchitektur und Umweltentwicklung der Universität Hannover. Beiträge zur räumlichen Planung. Band 66. Schriftenreihe des Fachbereichs Landschaftsarchitektur und Umweltentwicklung der Universität Hannover.

RICHTER, D., HEINDEL, M. (2011): Straßen- und Tiefbau: Mit lernfeldorientierten Projekten. 11. Auflage. Vieweg + Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden.

RIS (2016): Bundesgesetz über die Binnenschifffahrt (Schifffahrtsgesetz – SchFG). Online im Internet: [https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe? Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10012703](https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10012703), Stand: 21.06.2016.

RVS (2009): Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen – Oberbaubemessung – RVS 03.08.63 (idF. V. 01.01.2009).

SCHIEFERMAIR, F. (2016): Belagsschäden durch Gehölzwurzeln an gewässerbegleitenden Wegen, Kleinversuche zur Wurzelentwicklung von Weiden und Pappeln in verschiedenen Korngrößenmischungen. Bachelorarbeit, Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Universität für Bodenkultur, Wien.

SCHOPFER, P., BRENNICKE, A. (2010): Pflanzenphysiologie. 7. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.

SEIPEL, H. (2011): Fachkunde für Garten- und Landschaftsbau. 5. Auflage. Verlag Dr. Felix Büchner- Handwerk und Technik, Hamburg.

SOKOPP, M. (2012): Gehölzstrukturen an Hochwasserschutzdämmen. Auswirkungen von Weiden- und Gräser/Kräuter-Bewuchs auf den Bodenwasserhaushalt anhand von Lysimeterversuchen. Diplomarbeit, Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Universität für Bodenkultur, Wien.

STEUBING, L., FANGMEIER, A. (1992): Pflanzenökologisches Praktikum. Ulmer, Stuttgart: 205. In: Traxler, A : Handbuch des vegetationsökologischen Monitorings, Methoden, Praxis, angewandte Projekte, Teil A: Methoden. S.126. Umweltbundesamt, Wien.

STEVENS (2016): Online im Internet:  
[http://www.stevenswater.com/resources/datasheets/hydraprobe\\_brochure\\_](http://www.stevenswater.com/resources/datasheets/hydraprobe_brochure_web.pdf)  
web.pdf,  
Stand: 04.04.2016.

STRAUBE, E., BECKEDAHL, H. (2000): Straßenbau und Straßenerhaltung. Ein Handbuch für Studium und Praxis. 6. Auflage. Erich Schmidt Verlag GmbH & Co, Berlin.

STRECKENBACH, M., STÜTZEL, T., BOSSELER, B, (2008): Schäden durch Wurzeln von Gehölzen. Tagungsband der 19. Österreichischen Baumpflegetagung 2008, Wien.

TOPP G.C., DAVIS J.L., ANNAN A.P., 1980: Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurement in Coaxial Transmission Lines. Water Resources Research, 16, 574–582. In: Loiskandl et al. (2010): Calibrating electromagnetic short soil water sensors, J. Hydrol. Hydromech., 58, 2010, 2, 114–125, Wien.

VIA DONAU- ÖSTERREICHISCHE WASSERSTRASSEN GESELLSCHAFT MBH (2015): Treppelwege. Online im Internet: <http://www.viadonau.org/infrastruktur/betrieb-zu-land/treppelwege/> , Stand: 21.06.2016.

WAGAR, J.A., BARKER, P.A. (1983): Tree root damage to sidewalks and curbs. Journal of Arboriculture 9:177-181.

WEISSTEINER, C., KONZEL, C. (2015): Gehölzwurzeln als Schadensverursacher asphaltierter Wegebeläge an Donau-Treppelwegen. In: Ingenieurbiologie. Mitteilungsblatt für die Mitglieder des Vereins für Ingenieurbiologie, 1/2015, 84-89. Ingenieurbiologie. Neue Entwicklungen an Fließgewässern, Hängen und Böschungen, Wien.

WINRHIZO (2015): Online im Internet:  
[http://www.regentinstruments.com/assets/winrhizo\\_about.html](http://www.regentinstruments.com/assets/winrhizo_about.html), Stand: 09.01.2016.

WONG, T.W., GOOD, J.E.G., DENNE, M.P. (1988): Tree root damage to pavements and kerbs in the City of Manchester. Arboricultural Journal 12,7–34.

YOUNG M.H., FLEMMING J.B., WIERENGA P.J., WAR-RICK A.W., 1997: Rapid Laboratory Calibration of Time Domain Reflectometry Using Upward Infiltration. Soil Sci. Soc. Am J., 61, 707–712. In: Loiskandl et al. (2010): Calibrating electromagnetic short soil water sensors, J. Hydrol. Hydromech., 58, 2010, 2, 114–125, Wien.

## 7. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung der Wurzel (eigene Bearbeitung nach HIETZ et al., 2009).....	13
Abbildung 2: Wurzel Aufbau im Querschnitt (HIETZ et al., 2009; eigene Überarbeitung) .....	13
Abbildung 3: Differenzierung der Wurzelspitze (HIETZ et al., 2009; eigene Überarbeitung) .....	14
Abbildung 4: Verlauf des sekundären Dickenwachstums einer Wurzel (LÜTTGE & KLUGE, 2012; eigene Überarbeitung).....	15
Abbildung 5: Allorhizie bei Dikotylen (links) und sekundäre Homorhizie bei Monokotylen (rechts) (HIETZ et al., 2009).....	18
Abbildung 6: Sedimentation der Statolithen (SCHOPFER & BRENNICKE, 2010).....	19
Abbildung 7: Straßenaufbau angelehnt an RVS 03.08.63 (eigene Bearbeitung) .....	23
Abbildung 8: Schichtaufbau einer wassergebundenen Decke (eigene Bearbeitung nach SEIPEL, 2011) .....	27
Abbildung 9: Klimadiagramm für Großenzersdorf (CLIMATE-DATA.ORG, 2016) .....	28
Abbildung 10: Niederschlag und Temperatur der Wetterstation Raasdorf von Mai bis November 2015 (DNW BOKU, 2016b).....	29
Abbildung 11: Übersichtsplan der Versuchsanlage (WEISSTEINER, 2015; eigene Überarbeitung) ....	31
Abbildung 12: Arbeitsschritte zur Herstellung der unteren Tragschicht der Versuchsfläche mit 25 cm 0/63 KK und 5 cm 0/32 KK und Ausbringung des Dränvlieses (Großenzersdorf, 27.-30.4.2015)...	32
Abbildung 13: Grundriss und Schnitt der Wegeaufbau-Versuchsboxen mit unterer Tragschicht, Bodenwassergehaltssensoren nur in Boxen 1.1.-6.1. (WEISSTEINER, 2015; eigene Überarbeitung).....	34
Abbildung 14: Grundriss und Schnitt der Substratversuchsboxen ohne unterer Tragschicht (WEISSTEINER, 2015; eigene Überarbeitung) .....	35
Abbildung 15: Bau von Wegeaufbau-Versuchsboxen mit Baustahlmatte, Drahtgitter, Kokosmatte und Bewehrungsseilen in Reihen (Großenzersdorf, 27.-30.4.2015).....	36
Abbildung 16: Lagenweise Befüllung und Verdichtung der Wegeaufbau-Versuchsboxen (Großenzersdorf, 27.-30.4.2015) .....	37
Abbildung 17: Einbau und lagenweise Befüllung der Substratversuchsboxen (Großenzersdorf, 27.-30.4.2015).....	37
Abbildung 18: Fertig befüllte Versuchsanlage mit allen Tragschichten und Gehölzpflanzstreifen (Großenzersdorf, 27.-30.4.2015) .....	38
Abbildung 19: Einbringung der Beton Deckschicht (Großenzersdorf, 27.-30.4.2015).....	39
Abbildung 20: Einschlagen der Stekhölzer (Großenzersdorf, 27.-30.4.2015) .....	39
Abbildung 21: Einbau der Wassergehaltssensoren in 45 cm und 15 cm Tiefe (Großenzersdorf, 27.-30.4.2015).....	40
Abbildung 22: Befüllung des Zylinders mit der Substratprobe (Wien, 15.05.2015) .....	42
Abbildung 23: Einbau des Messensors und Befüllung mit Wasser (Wien, 15.05.2015).....	43
Abbildung 24: Überstautes Substrat und gesamter Versuchsaufbau (Wien, 15.05.2015) .....	43
Abbildung 25: Versuchsaufbau für Kalibrierung (LOISKANDL, 2010).....	44
Abbildung 26: Dynamische Lastplattenversuche auf der unteren und oberen Tragschicht (Großenzersdorf, 27.-30.4.2015) .....	45
Abbildung 27: Versuchsfläche der ersten Erhebungen 2015 (WEISSTEINER, 2015; eigene Überarbeitung).....	46
Abbildung 28: Boxfelder und Gehölzpflanzstreifen der Wegeaufbau-Versuche mit einem 33,3 x 50 cm und 16,6 x 16,6 cm großen Raster (Großenzersdorf, Oktober 2015; WEISSTEINER, 2015). 47	
Abbildung 29: Einteilung der Gehölzpflanzstreifen in Raster von 16,6 und 25 x 25 cm (Großenzersdorf, 2.10.2015).....	47
Abbildung 30: Ernten und Aufnahme der oberirdischen Biomasse (Großenzersdorf, Oktober 2015)...	49

Abbildung 31: Ernte und Aufnahme der unterirdischen Biomasse (Großenzersdorf, Oktober– November 2015).....	50
Abbildung 32: Bearbeitung der Wegeaufbau-Versuchsboxen und Aufnahme der unterirdischen Biomasse in 3 Ebenen (Großenzersdorf, Oktober– November 2015) .....	51
Abbildung 33: Wurzelwaschung (links), Wurzeln im Plexiglasbehälter (mitte), Epson-Scanner (rechts) (SCHIEFERMAIR, 2015) .....	52
Abbildung 34: Wurzelscan (links) und Analyse (rechts) mit WinRhizo (SCHIEFERMAIR, 2015).....	53
Abbildung 35: Kalibrierungskurve Erde .....	55
Abbildung 36: Kalibrierungskurve Granit 2-4 mm.....	55
Abbildung 37: Kalibrierungskurve Substrat 0/32 .....	56
Abbildung 38: gemessener volumetrischer Wassergehalt der Bodenwassergehaltssensoren der Gehölzpflanzstreifen von 17.8.15 bis 17.4.2016 .....	57
Abbildung 39: Lastplattenversuche an den Wegeaufbau-Versuchsboxen .....	58
Abbildung 40: Lastplattenversuche an den Substratversuchsboxen.....	59
Abbildung 41: Aufteilung aller Stechhölzer in Prozent.....	60
Abbildung 42: Anzahl der Sprosse in Längensklassen .....	61
Abbildung 43: Anzahl der Sprosse in Durchmesserklassen.....	61
Abbildung 44: Streudiagramm des Sprossdurchmessers zur Sprosslänge .....	62
Abbildung 45: Wurzelrockenmasse der oberirdischen und unterirdischen Biomasse der Gehölzpflanzstreifen der Wegeaufbau Versuchsboxen .....	63
Abbildung 46: Wurzelmassenanteile der Gehölzpflanzstreifen der Wegeaufbau-Versuchsboxen in Ebene 1-3.....	63
Abbildung 47: Wurzelmassenanteile der Gehölzpflanzstreifen der Substratversuchsboxen in Ebene 1-3 .....	64
Abbildung 48: Wurzelmassenanteile der Gehölzpflanzstreifen der Wegeaufbau-Versuchsboxen in Spalte 1-3.....	65
Abbildung 49: Wurzelmassenanteile der Wegeaufbau-Versuchsboxen in Ebene 1-3 .....	66
Abbildung 50: Feinkornreiches Substrat und eingeschwemmte Erde in Ebene 3 (Großenzersdorf, Oktober 2015).....	66
Abbildung 51: Verteilung der Wurzelmasse ( $M_{WV}$ ) der Plots über den 3 Ebenen getrennt nach Wegeaufbauversuche .....	67
Abbildung 52: Trockenmasse der gesamten Wurzelmasse der Wegeaufbau-Versuchsboxen.....	68
Abbildung 53: Gesamtwurzelmasse der Ebenen 1 und 2 der Wegeaufbau-Versuchsboxen in Relation zur Wurzelmasse der Gehölzpflanzstreifen .....	68
Abbildung 54: Wurzelmassenanteile der Wegeaufbau-Versuchsboxen in Spalten 1-3.....	69
Abbildung 55: Verteilung der relativen Wurzelmasse der Wegeaufbau-Versuchsboxen-Plots in Spalten.....	70
Abbildung 56: relative Gewichtsanteile der Ebenen 1 und 2 nach Wurzeldurchmesserklassen der Wegeaufbau-Versuchsboxen.....	70
Abbildung 57: Verteilung der relativen Wurzelmasse der Wegeaufbau-Versuchsboxen-Plots der Ebenen 1 und 2 nach Wurzeldurchmesserklassen .....	71
Abbildung 58: Wurzellänge der Ebenen 1 und 2 nach Wurzeldurchmesser der Wegeaufbau-Versuchsflächen .....	72
Abbildung 59: Wurzelmassenanteile der Substratversuchsboxen in Ebene 1-3 .....	73
Abbildung 60: Gesamtwurzelmasse der Substratversuchsboxen in Relation zur Wurzelmasse der Gehölzpflanzstreifen der Substratfelder.....	74
Abbildung 61: Gemittelte Wurzelmasse der Substratversuchsboxen in Relation zur Wurzelmasse der Gehölzpflanzstreifen der Substratfelder.....	74
Abbildung 62: Relative gemittelte Gewichtsanteile nach Wurzeldurchmesserklassen der Substratversuchsboxen .....	75

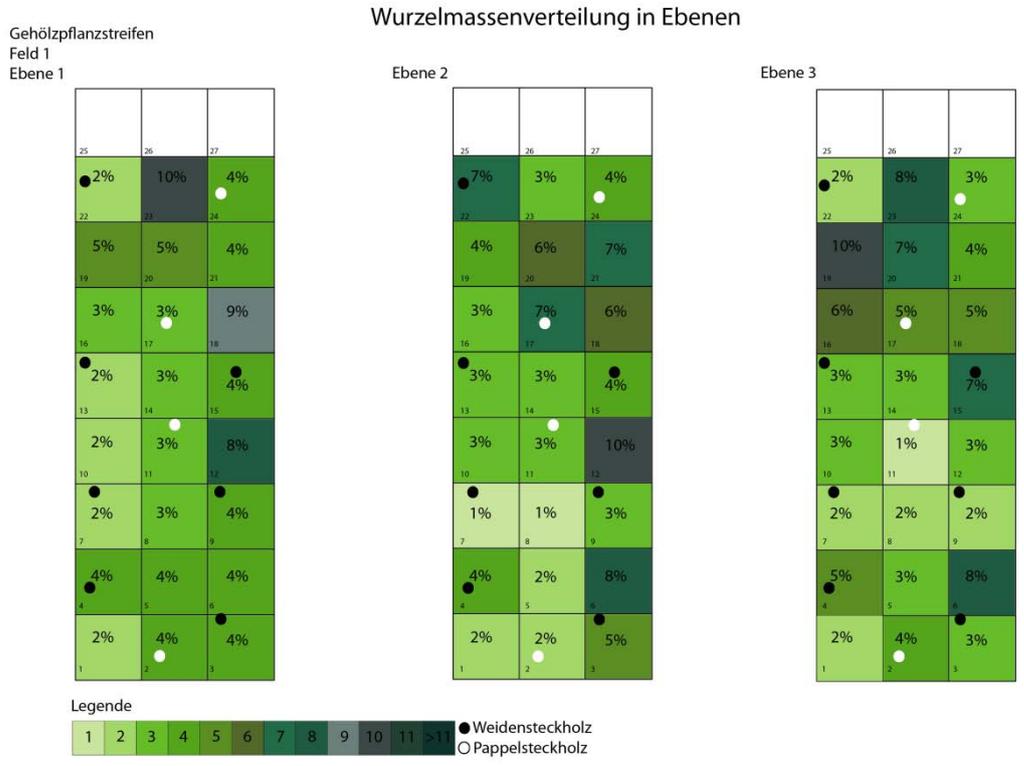
Abbildung 63: Gemittelte Wurzelmasse der Substratversuchsboxen in Relation zur Wurzelmasse der Gehölzpflanzstreifen der Substratfelder nach Wurzel Durchmesserklassen .....	75
Abbildung 64: Wurzellänge der Substratversuchsboxen nach Wurzel Durchmesser .....	76
Abbildung 65: Wurzellängen der Wegeaufbau-Versuchsboxen 1 und 5, aufgeteilt in Durchmesserklassen (SCHIEFERMAIR, 2015) .....	77

## 8. Tabellenverzeichnis

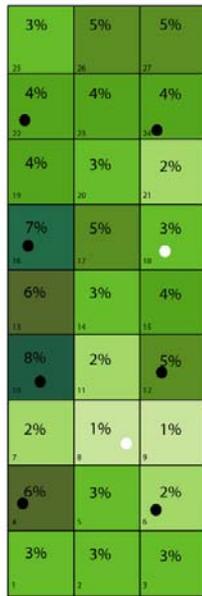
Tabelle 1: Einteilung der Wurzeln nach ihrem Durchmesser (KÖSTLER u.a., 1968)<sup>17</sup>

# 9. Anhang

## I Wurzelmassenverteilung in Ebenen der Wegeaufbau-Versuchsboxen und deren Gehölzpflanzstreifen

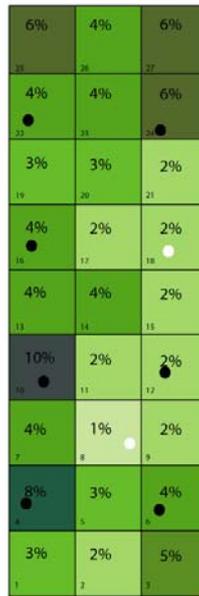


Gehölzpflanzstreifen  
Feld 2  
Ebene 1

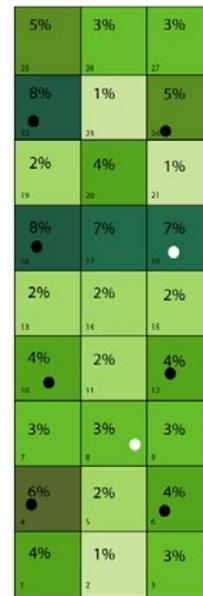


### Wurzelmassenverteilung in Ebenen

Ebene 2



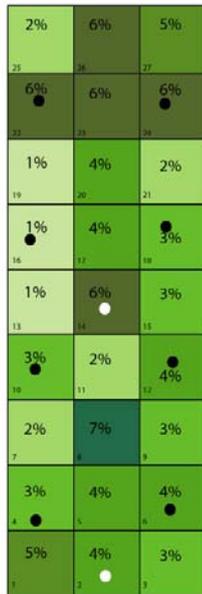
Ebene 3



Legende

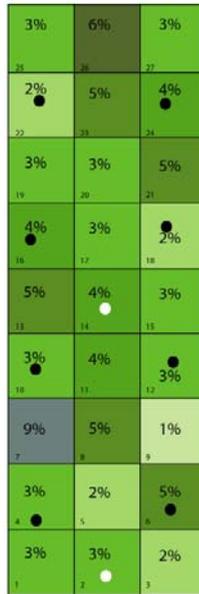


Gehölzpflanzstreifen  
Feld 3  
Ebene 1

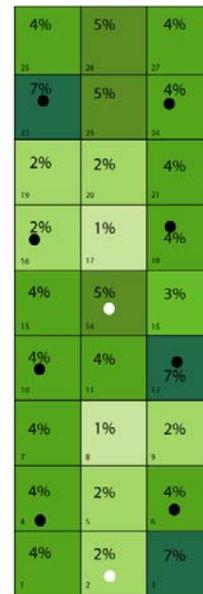


### Wurzelmassenverteilung in Ebenen

Ebene 2



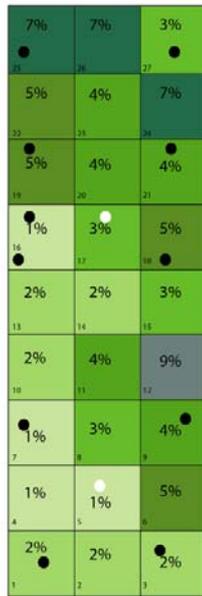
Ebene 3



Legende

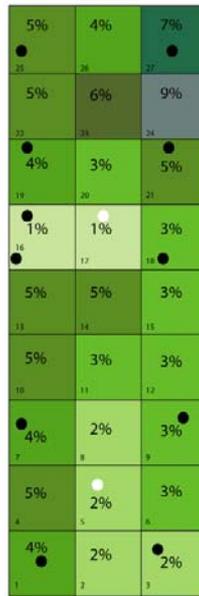


Gehölzpflanzstreifen  
Feld 4  
Ebene 1

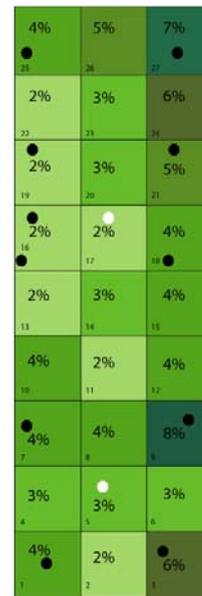


### Wurzelmassenverteilung in Ebenen

Ebene 2



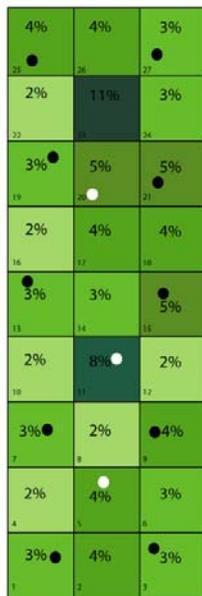
Ebene 3



Legende

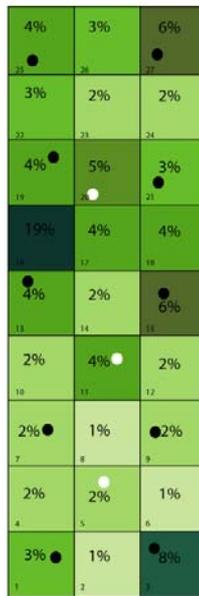


Gehölzpflanzstreifen  
Feld 5  
Ebene 1

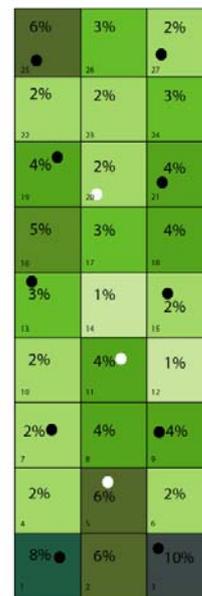


### Wurzelmassenverteilung in Ebenen

Ebene 2



Ebene 3



Legende

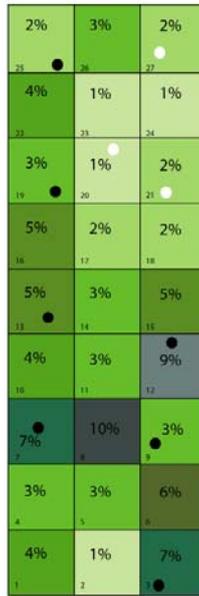


## Wurzelmassenverteilung in Ebenen

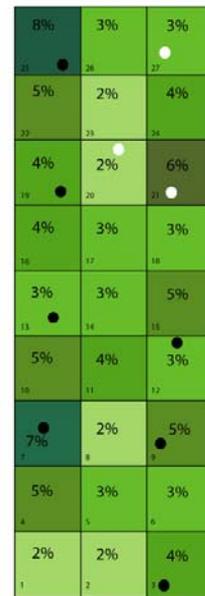
Gehölzpflanzstreifen  
Feld 6  
Ebene 1



Ebene 2



Ebene 3

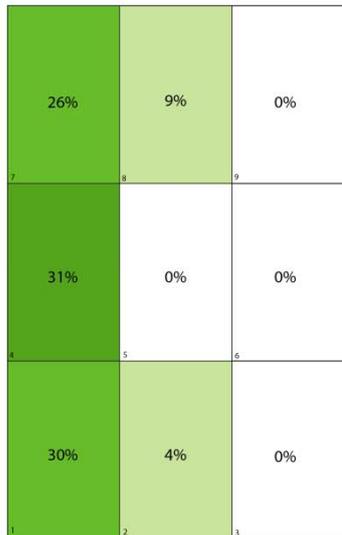


Legende



## Wurzelmassenverteilung in Ebenen

Wegesaufbau-Versuchsbox  
Feld 1 (0/32)  
Ebene 1



Ebene 2



Ebene 3



Legende



Wegesaufbau-Versuchsbox  
Feld 2 (8/32)  
Ebene 1

### Wurzelmassenverteilung in Ebenen

Ebene 2

Ebene 3



Legende

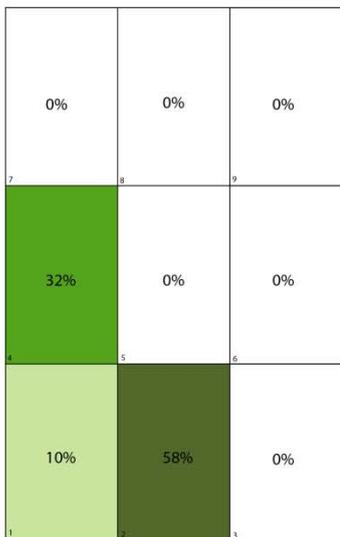


Wegesaufbau-Versuchsbox  
Feld 3 (16/32)  
Ebene 1

### Wurzelmassenverteilung in Ebenen

Ebene 2

Ebene 3



Legende

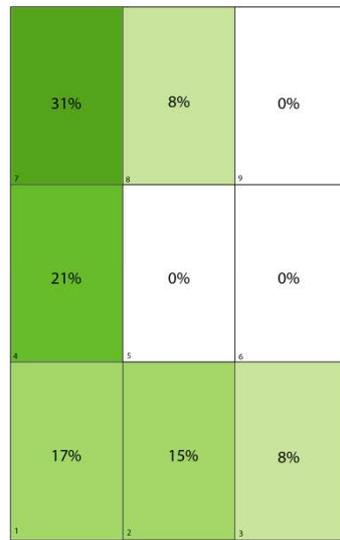


Wegesaufbau-Versuchsbox  
Feld 4 (0/63)  
Ebene 1

### Wurzelmassenverteilung in Ebenen

Ebene 2

Ebene 3



Legende

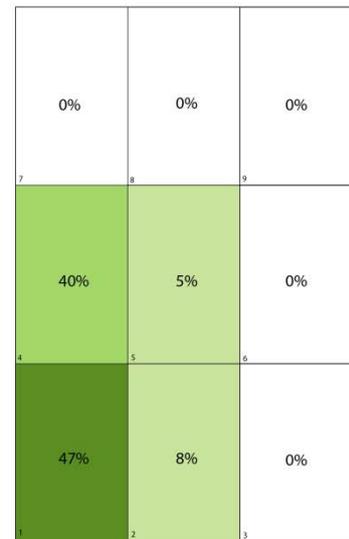
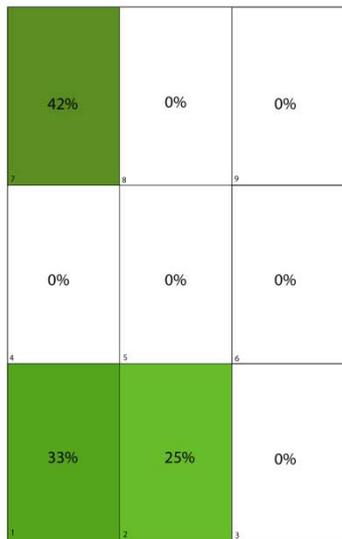


Wegesaufbau-Versuchsbox  
Feld 5 (16/63)  
Ebene 1

### Wurzelmassenverteilung in Ebenen

Ebene 2

Ebene 3



Legende

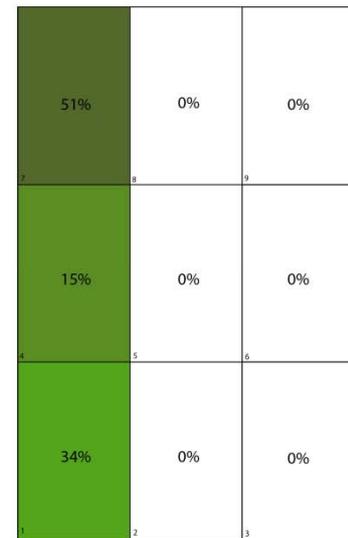
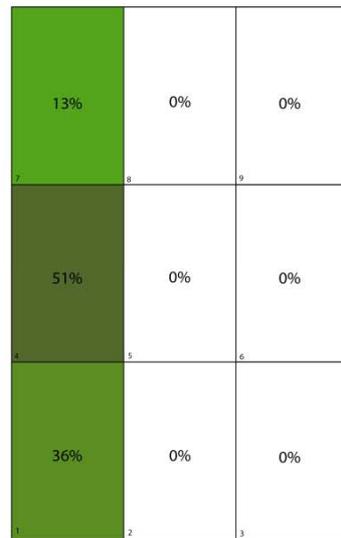


Wegesaufbau-Versuchsbox  
 Feld 6 (8/32 hyd)  
 Ebene 1

### Wurzelmassenverteilung in Ebenen

Ebene 2

Ebene 3



Legende



## II Messdaten Lastplattenversuche

Anmerkung	Feld	Korngröße	Code	Messpunkt 1- Messung 1 [MN/m <sup>2</sup> ]	Messpunkt 1-Messung 2 [MN/m <sup>2</sup> ]	Messpunkt 1-Messung 3 [MN/m <sup>2</sup> ]	Messpunkt 1-Messung 4 [MN/m <sup>2</sup> ]	Messpunkt 2- Messung 1 [MN/m <sup>2</sup> ]	Messpunkt 2- Messung 1 [MN/m <sup>2</sup> ]	Messpunkt 3-Messung 1 [MN/m <sup>2</sup> ]	Messpunkt 4- Messung 1 [MN/m <sup>2</sup> ]	MW Messpunkt 1	MW Messpunkt 2
	Unterbau	0/63	Punkt 1	21,7	29,1	28,2	27,8					26,7	0
	Unterbau	0/63	Punkt 2	30,3	30,3	30,2	30,3					30,275	0
	Unterbau	0/63	Punkt 3	22,7	24,6	25,1	26,4					24,7	0
	Unterbau	0/63	Punkt 4	23,9	25,5	25,4	25,8					25,15	0
	Unterbau	0/63	Punkt 5	33,3	32,6	32,1	33					32,75	0
halbvoll	1.1.	0/32		11,3	10,8	10,6	10,9					10,9	0
halbvoll	1.2.	0/32		8,3	8,4	9,3	9,2					8,8	0
halbvoll	1.3.	0/32		13,5	13	12,8	12,4					12,925	0
halbvoll	2.1.	8/32		10,9	9,8	10,6	8,6					9,975	0
halbvoll	2.2.	8/32		10,5	8,6	8,1	12					9,8	0
halbvoll	2.3.	8/32		8,7	11,9	8,4	7,3					9,075	0
halbvoll	3.1.	16/32		22,3	22,2	24,1	24,5					23,275	0
halbvoll	3.2.	16/32		9,3	8,4	8,4	8,9					8,75	0
halbvoll	3.3.	16/32		23,2	22,6	22,6	23,3					22,925	0
halbvoll	4.1.	0/63		11,1	11,4	10,3	8,8					10,4	0
halbvoll	4.2.	0/63		13,5	13	12,8	12,4					12,925	0
halbvoll	4.3.	0/63		13,6	11,4	11,1	11,4					11,875	0
halbvoll	5.1.	16/63		12,9	13	13	12,4					12,825	0
halbvoll	5.2.	16/63		11,7	9,9	9,7	9,3					10,15	0
halbvoll	5.3.	16/63		12,7	10,6	10,2	10,5					11	0
halbvoll	6.1.	8/32 hyd		25,1	23,4	23,9	24,8					24,3	0
halbvoll	6.2.	8/32 hyd		22,1	21,7	22,1	22					21,975	0
halbvoll	6.3.	8/32 hyd		19,1	20,7	20,7	23,3					20,95	0
voll	1.1.	0/32	1.1.- 0/32	14,5	14,6	14,7	15,1	26,1	24,8	23,6	23,1	14,725	24,4
voll	1.2.	0/32	1.2.- 0/32	35,2	25,2	24,7	24,3	22,9	22,1	21,8	22,7	27,35	22,375
voll	1.3.	0/32	1.3.- 0/32	20,3	22	22,3	22,5	19,2	19,5	20	20	21,775	19,675
voll	2.1.	8/32	2.1.- 8/32	24,7	21,8	20,3	20,2	25,8	24,1	26	24	21,75	24,975
voll	2.2.	8/32	2.2.- 8/32	19,1	19,2	20,7	23,7	16,2	15	15,2	14,4	20,675	15,2
voll	2.3.	8/32	2.3.- 8/32	19,8	22,3	21,6	21,6	21,2	21,8	32,3	22,5	21,325	24,45
voll	3.1.	16/32	3.1.- 16/32	29,9	30,8	31,4	31,8	32	32,1	31,7	31,7	30,975	31,875
voll	3.2.	16/32	3.2.- 16/32	33,7	33,2	34,2	33,6	31,6	31,5	30,8	31,6	33,675	31,375
voll	3.3.	16/32	3.3.- 16/32	34,4	36,8	37,1	37,6	29,8	33,4	34,8	35,4	36,475	33,35
voll	4.1.	0/63	4.1.- 0/63	21,4	23,4	22	22,4	22,7	22,2	22,1	22,7	22,3	22,425
voll	4.2.	0/63	4.2.- 0/63	24,2	23,6	23,4	24,5	18,8	19,1	20,9	21,8	23,925	20,15
voll	4.3.	0/63	4.3.- 0/63	23,4	22,1	21,8	23,1	26	25,8	25,1	25,7	22,6	25,65
voll	5.1.	16/63	5.1.- 16/63	17,2	15,8	15,8	15,4	19,5	19,9	20,6	23,3	16,05	20,825
voll	5.2.	16/63	5.2.- 16/63	26,6	25,1	26,3	26,1	25,8	25,5	25,1	25,3	26,025	25,425
voll	5.3.	16/63	5.3.- 16/63	26	28,5	30	32,1	20,7	22,3	22,5	24,6	29,15	22,525
voll	6.1.	8/32 hyd	6.1.- 8/32 hyd	27,4	26,8	27,4	30,1	38,9	36,9	37,1	37,7	27,925	37,65
voll	6.2.	8/32 hyd	6.2.- 8/32 hyd	33	33	34,4	37,1	33,2	33,9	36,1	37,8	34,375	35,25
voll	6.3.	8/32 hyd	6.3.- 8/32 hyd	32,5	34,8	35,5	37	37,3	34,9	38,3	40,4	34,95	37,725
Messung April	1	0/32		9,9	10,6	10,6	11					10,525	0
Messung April	2	8/32		6,8	8,1	8,1	8,5					7,875	0
Messung April	3	16/32		10,1	8,5	2,8	8,2					7,4	0
Messung April	4	0/63		12,5	9,7	9,3	8,7					10,05	0
Messung April	5	16/63		11,2	9,9	9,3	9,2					9,9	0
Messung April	6	4/32		8,6	6,6	6,4	6,4					7	0
Messung April	7	0/32		9	9,5	9,5	9,4					9,35	0
Messung April	8	8/32		10,5	9,1	9,4	9,3					9,575	0
Messung April	9	16/32		8,4	8,7	8,6	9					8,675	0
Messung April	10	0/63		8,8	9,1	9,6	9,9					9,35	0
Messung April	11	16/63		16	13,1	13,2	13,9					14,05	0
Messung April	12	4/32		8,8	7	7,4	7,3					7,625	0
Messung April	13	0/32		10,3	11,1	11,6	12,1					11,275	0
Messung April	14	8/32		8,2	8,7	9,3	9,9					9,025	0

Messung April	15	16/32	14,5	11,5	11,2	12,3	12,375	0
Messung April	16	0/63	18,2	16,3	15,5	14,9	16,225	0
Messung April	17	16/63	11,8	8,8	9,7	8,3	9,65	0
Messung April	18	4/32	8,1	7,2	7,7	8,1	7,775	0
Messung April	19	4/32	11	12,9	10,7	10,8	11,35	0
Messung April	20	16/63	15,9	14,5	16,1	15,4	15,475	0
Messung April	21	0/63	18,1	16,7	16,5	17	17,075	0
Messung April	22	16/32	14,9	15,7	14,7	15,5	15,2	0
Messung April	23	8/32	14,5	12,3	12,8	12,1	12,925	0
Messung April	24	0/32	16,8	17,5	19,5	19,4	18,3	0
Messung April	25	4/32	11,9	10,7	11,2	10,9	11,175	0
Messung April	26	16/63	14	14,8	14,8	15,9	14,875	0
Messung April	27	0/63	14,3	12,5	12,3	12,9	13	0
Messung April	28	16/32	15,2	14,7	14,3	14,6	14,7	0
Messung April	29	8/32	11,8	11,5	11,6	12	11,725	0
Messung April	30	0/32	12,9	13,2	14,1	16,9	14,275	0
Messung April	31	4/32	9,6	10,6	10,3	10,4	10,225	0
Messung April	32	16/63	10,4	11,9	11,8	12,9	11,75	0
Messung April	33	0/63	12,8	11,6	10,5	10,4	11,325	0
Messung April	34	16/32	9,6	10,1	11,3	11,3	10,575	0
Messung April	35	8/32	11,5	9,6	10,9	10,4	10,6	0
Messung April	36	0/32	15,9	16,3	15,6	16,8	16,15	0
Messung Oktober	1.1	0/32	28,8	28,2	28,2	28,8	28,5	0
Messung Oktober	2.1	8/32	23,5	25,7	25,6	25,9	25,175	0
Messung Oktober	3.1	16/32	22,5	22,5	22,9	22,5	22,6	0
Messung Oktober	4.1	0/63	26,4	26,5	26,8	26,3	26,5	0
Messung Oktober	5.1	16/63	23,7	25,9	26,1	25,5	25,3	0
Messung Oktober	6.1	4/32	19,3	19,9	19	19,8	19,5	0
Messung Oktober	7.1	0/32	19	21,1	21,1	21,6	20,7	0
Messung Oktober	8.1	8/32	25,1	27	28,8	30,1	27,75	0
Messung Oktober	9.1	16/32	21,7	23	23,8	25,7	23,55	0
Messung Oktober	10.1	0/63	27,2	26,4	25,7	25,6	26,225	0
Messung Oktober	11.1	16/63	20,9	21,3	23,2	24,3	22,425	0

Messung Oktober	12.1	4/32	26,3	26,1	26,2	26,2	26,2	0
Messung Oktober	13.1	0/32	23,7	22,9	22	22,2	22,7	0
Messung Oktober	14.1	8/32	19,2	21,6	24,7	25,7	22,8	0
Messung Oktober	15.1	16/32	30,4	28,4	25,9	28,7	28,35	0
Messung Oktober	16.1	0/63	24,3	25,3	26,6	27,3	25,875	0
Messung Oktober	17.1	16/63	25,4	20,8	19,5	19,3	21,25	0
Messung Oktober	18.1	4/32	19,6	17,9	18,2	18	18,425	0
Messung Oktober	19.1	4/32	20,6	18,8	18,2	19,2	19,2	0
Messung Oktober	20.1	16/63	25,9	24,3	24,6	24,1	24,725	0
Messung Oktober	21.1	0/63	27,4	29,3	26,6	25,8	27,275	0
Messung Oktober	22.1	16/32	22,8	23,7	23,9	23,1	23,375	0
Messung Oktober	23.1	8/32	25,3	23,7	23,6	37	27,4	0
Messung Oktober	24.1	0/32	27,9	27,5	26,9	27,5	27,45	0
Messung Oktober	25.1	4/32	30,3	29,6	30,3	30,5	30,175	0
Messung Oktober	26.1	16/63	36,2	36,1	34,9	35	35,55	0
Messung Oktober	27.1	0/63	24,3	22	21,4	22,6	22,575	0
Messung Oktober	28.1	16/32	27,4	29,5	28,5	30,2	28,9	0
Messung Oktober	29.1	8/32	27,3	25,8	25,6	26,9	26,4	0
Messung Oktober	30.1	0/32	23,1	22,5	21,3	21,6	22,125	0
Messung Oktober	31.1	4/32	26	24	24,5	24,7	24,8	0
Messung Oktober	32.1	16/63	25,1	21,7	21,9	21,9	22,65	0
Messung Oktober	33.1	0/63	23,1	21,8	21	21,1	21,75	0
Messung Oktober	34.1	16/32	25	22,8	22,3	23,3	23,35	0
Messung Oktober	35.1	8/32	14,1	19,9	18,7	19,4	18,025	0
Messung Oktober	36.1	0/32	28,8	25	25,1	24,4	25,825	0

## **Versicherung**

„Ich versichere, dass ich die vorstehende Arbeit selbständig angefertigt und mich fremder Hilfe nicht bedient habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß veröffentlichtem oder nicht veröffentlichtem Schrifttum entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht.“

---