Wurzelwachstum in unterschiedlichen Wegeaufbau-Substraten

Integrale Versuchsreihe zur Beschreibung von Wurzelwachstumsprozessen im Wegebau

Root growth in different sized road structure substrates

Integral test series to describe root-growth processes in road construction

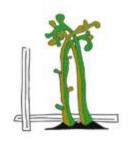
Masterarbeit

Verfasser:

Julian Erhard, Bsc.

Betreuung:

Priv.-Doz. Dipl.-Ing Dr. Hans-Peter Rauch



Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau

Department für Bautechnik und Naturgefahren

Universität für Bodenkultur Wien



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis						
Danksagung						
Zusammenfassung						
Abstract						
Abkürzungsverzeichnis						
1		Einleitung				
2		Methodik				
	2.1	2.1 V		suchsaufbau Groß Enzersdorf	11	
	2.2	2.2 Kli		na Groß-Enzersdorf	16	
	2.3	3	Erhe	ebung der ober- und unterirdischen Biomasse	17	
	2.4	4	Sieb	panalyse	23	
	2.5	5	Wui	rzelscan	24	
3		Grundlagen			26	
	3.1	1	Ver	wendeten Gehölze	26	
		3.1.	1	Populus	26	
		3.1.	2	Salix	27	
	3.2	2	Wui	rzelökologie	28	
		3.2.	1	Allgemeiner Wurzelaufbau dikotyler Pflanzen	29	
		3.2.2		Wurzelfunktionen	33	
		3.2.	3	Wurzelwachstumsfaktoren	33	
	3.3	3	We	geaufbau	34	
	3.3.1		1	Allgemeiner Schichtaufbau	34	
4		Ergebnisse 3				
	4.1	4.1 Ob		erirdische Biomasse	37	
	4.2	2	Unt	erirdische Biomasse 2019	41	
	•	4.2.	1	Pflanzstreifen 2019	42	
	•	4.2.2		Wegeaufbauboxen 2019	45	
	•	4.2.3		Substratboxen 2019	49	
	4.3	3	Wui	rzelscan	55	
	4.4	4	Sieb	panalyse	57	
	4.5	5	Ver	gleich der Ergebnisse aller drei Erhebungsjahre	60	

5	Diskussion und Ausblick				
	5.1	Beantwortung der Forschungsfragen	74		
	5.2	Ausblick	77		
6	6 Literaturverzeichnis				
7	7 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis				
8	Anh	Anhang			
	I. C	berirdische Biomasse	84		
	II. U	nterirdische Biomasse	84		
9	Ver	sicherung	88		

Danksagung

Im Zuge dieser Arbeit möchte ich mich ganz herzlich bei all jenen bedanken, welche mich tatkräftig als auch didaktisch auf meinem Weg begleitet haben. Besonderer Dank gilt dabei dem Team der Versuchswirtschaft der Universität für Bodenkultur Wien in Groß-Enzersdorf, ohne dessen Hilfe ich niemals so schnell und effizient an die erforderlichen Daten gekommen wäre.

Auch meinem Betreuer Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. Hans-Peter Rauch bin ich zu Dank verpflichtet, nachdem er mir den Abschluss des vorliegenden Forschungsprojektes anvertraut hat und mir bis zum Schluss mit theoretischen als auch praktischen Ratschlägen zur Seite stand. Nicht zuletzt auch für seine Toleranz, da ich im entsprechenden Zeitraum bereits berufstätig war und dementsprechend mehr Zeit in Anspruch nehmen musste.

Für die großartige Unterstützung meiner ehemaligen WG in Döbling will ich ebenfalls meinen Dank aussprechen, welche mir während der drei wöchigen Erhebungen in der Versuchswirtschaft einen Schlafplatz, einen fahrbaren Untersatz und den nötigen Ausgleich während dieser intensiven Arbeitszeit boten.

Da jedoch meine gesamte Studienzeit ohne die Unterstützung meiner Eltern gar nicht erst möglich gewesen wäre, möchte ich mich ganz speziell bei meinem Vater und meiner Mutter für den finanziellen als auch emotionalen Beistand bedanken. Jene sieben Jahre meines Lebens waren besonders prägend und haben mich darin gestärkt, meine Ziele zu verfolgen und meinen zukünftigen Lebensweg enthusiastisch zu beschreiten.

Zusammenfassung

Im Jahr 2015 wurde das Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau der Universität für Bodenkultur Wien von der viadonau Österreichische Wasserstraßen-Gesellschaft mbH beauftragt, ein Forschungsprojekt in Form einer mehrjährigen Versuchsreihe durchzuführen. Ziel war, den Einfluss von unterschiedlichen Wegeaufbauschichten auf das Penetrationsvermögen von Gehölzwurzeln zu untersuchen. Besonderes Augenmerk gilt dabei der vertikalen Verteilung der Wurzelmasse. Im Zeitraum von 2015 - 2019 wurde in insgesamt drei Vegetationsperioden die Wurzelmasse aus dafür angefertigten Substrat-Versuchsboxen erhoben. In dieser Arbeit werden die Ergebnisse der im Jahr 2019 durchgeführten Untersuchungen präsentiert. Des Weiteren soll die Unterteilung in Durchmesserklassen Fein (0 - 2 mm), Mittel (2 - 10 mm) und Grob (> 10 mm) als auch ein Scan mit der Software WinRHIZO eine bessere Interpretation der Ergebnisse ermöglichen. Außerdem wird das Ausmaß an Sedimentationsprozessen anhand zweier Siebanalysen ermittelt.

Das Resultat der Analyse der vertikalen Wurzelverteilung zeigt durchschnittlich eine Zunahme der Biomasse in tieferen Schichten. Zudem konnte beobachtet werden, dass in Substraten mit ausgeglichenen Anteilen an Fein- und Grobmaterial mehr Biomasse enthalten war, als in Substraten geringerer Kantkorn-Größenunterschiede. Im Substrat 0/32 hs wurde mit Abstand am wenigsten Wurzelmasse erhoben, wohingegen im Substrat 16/63 am meisten Biomasse enthalten war. Die Ergebnisse der Siebanalyse zeigen in beiden Substratproben eine Verlagerung von Feinpartikeln in den Layer 3 sowie einen leicht erhöhten Anteil an Grobanteilen im Layer 1. Den Ergebnissen des Wurzelscans zufolge, konnte der größte Anteil an Wurzeln der Durchmesserklasse sehr feine Wurzeln (0 - 1 mm) zugeschrieben werden. Im Substrat 16/63 konnte von jener Durchmesserklasse die mit Abstand größte Länge von 201.543 cm enthalten waren, wohingegen im Substrat 16/32 mit 50.382 cm die geringste Länge gemessen wurde.

Abstract

In 2015 the Institute of Soil Bioengineering and Landscape Construction of the University of Natural Resources and Life Sciences Vienna was commissioned by viadonau Österreich Wasserstraßen-Gesellschaft mbH to carry out a research project over a period of five years. The objective was to investigate the influence of different sized road structure substrates on the penetration of roots. Between 2015 and 2019 the root mass therefore was collected in a total of three survey periods from specially crafted test boxes. This master thesis presents the results of the studies carried out in 2019. Particular attention is paid to its vertical distribution. Furthermore the subdivision into diameter classes of fine (0 - 2 mm), medium (2 - 5 mm) and coarse (5 - 10 mm) roots as well as a scan with WinRHIZO software divided into 4 diameter classes (very fine 0 - 1, fine 1 - 2, medium 2 - 5 and coarse 5 - 10 mm). Furthermore the extent of sedimentation processes is also determined using two sieve analyses.

The result of the analysis of the vertical root distribution shows on average an increase in biomass in deeper layers. In addition it could be observed that substrates with a balanced proportion of fine and coarse material also contained more biomass then substrates with smaller proportion. In the substrate 0/32 hs the least root biomass was collected by so far, whereas the substrate 16/63 contained the most. The results of the sieve analysis show a shift of fine particles in Layer 3 in both substrate samples as well as slightly increased proportion of coarse particles in Layer 1 which occurred as a result of sedimentation over the period of 5 years. According to the results of the root scan the largest proportion of roots could be found in diameter class very fine roots (0 - 1 mm). In substrate 16/63 by far the largest length of 201.543 cm could be analyzed, whereas substrate 16/32 resulted the smallest length of 50.382 cm within the same diameter class of very fine roots. With regard to the vertical distribution of fine root architecture the largest length of roots was observed in layer 3 of all substrates.

Abkürzungsverzeichnis

hs hydraulisch stabilisierte Tragschicht

L1, 2 und 3 Layer eins, zwei und drei

PS Pflanzstreifen

SB Substrat-Versuchsbox

WB Wegeaufbau-Versuchsbox

m.ü.A. Meter über Adria

Masse der getrockneten Blätter

M_{ST} Masse der getrockneten Äste und Stämme

Masse der getrockneten Wurzeln

Masse der Wurzeln aus den Wegeaufbau-Versuchsboxen

Masse der Wurzeln aus den Substrat-Versuchsboxen

Masse der Wurzeln aus den Pflanzstreifen

Mob Masse der oberirdischen Pflanzenteile

Musse der unterirdischen Pflanzenteile

1 Einleitung

Entlang von Gewässern sind häufig ausgedehnte Vegetationsflächen zu finden. Speziell im Rithral und im Potamal, also dem Mittel- und Unterlauf eines ausgedehnten Fließgewässers, wird die Uferzone meist von einem üppigen und artenreichen Auwald gesäumt, welcher von den stetig wiederkehrenden Hochwassern sowie den darin gelösten Sedimenten genährt wird. Als Hotspots der Biodiversität versorgen große Ströme wie die Donau nicht nur Flora und Fauna mit Wasser und Nährstoffen, auch der Mensch profitiert von dieser Fülle des Lebens. Neben der Forstwirtschaft, Fischerei und der landwirtschaftlichen Nutzung fruchtbarer Auböden wurden die offenen Wasserflächen auch für den Warentransport genutzt. Insbesondere vor der industriellen Revolution bzw. der Erfindung der Dampfmaschine Anfang des 18. Jhdt. wurden Frachtschiffe noch von Zugtier und Mensch über ein weitführendes Wegenetz entlang der Uferzonen gezogen und so in die nächstgelegene Stadt oder Ortschaft transportiert. Diese sogenannten Treppelwege stellten daher für den Waren- und Ressourcenaustausch wichtige Verbindungsachsen zwischen Städten und Regionen dar (Patt, 2009; viadoanau, 2020b).

Nachdem dieses Warentransportmodell Revolution von Dampfschiffen und Eisenbahn abgelöst wurde und die Uferbegleitwege immer mehr verwahrlosten, war deren Benutzung in Österreich bis 1980 nur auf eigene Gefahr gestattet. Heute erleben jene Wege eine Renaissance und werden als Teil des 430 km langen österreichischen Abschnittes des internationalen Radweges EuroVelo 6 vom Atlantik zum Schwarzen Meer genutzt. Mit jährlich rd. 1,8 Millionen Radfahrern und Radfahrerinnen zwischen Passau und Bratislava, liegt die Verantwortung bei der viadonau Österreichische Wasserstraßen-Gesellschaft mbH jenes Radwegenetz entlang dieser Strecke laufend instand zu halten. (viadonau, 2020a).

Da jene Treppelwege entlang der Donau in unmittelbarer Nähe zum umliegenden Auwald angelegt wurden, kommt es seit ihrer Nutzungsänderung aufgrund des natürlichen Pflanzenwachstums bzw. Wurzelwachstums vermehrt zu Konflikten zwischen Infrastruktur und Umwelt. Vor allem die durch sekundäre Wachstumsprozesse verursachten Belagsschäden entlang der Streckenabschnitte mit gebundener Deckschicht, stellen für die Verwaltung viadonau, Österreichische Wasserstraßen-Gesellschaft mbH ein finanzielles und haftungstechnisches Risiko dar (viadonau, 2020b).

Um die Verkehrssicherheit und die Erhaltungskosten entlang des Radweges in Zukunft zu optimieren, wurde das Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau (IBLB) der Universität für Bodenkultur Wien daher im Jahr 2015 mit einem Forschungsprojekt beauftragt. Neben umfangreiche Untersuchungen entlang der Treppelwege wurde im Jahr 2015 eine Versuchsreihe konzipiert (Weissteiner, 2015). Über mehrere Jahre hinweg sollte

das Wurzelwachstum in unterschiedlichen Substraten beobachtet und analysiert werden. Die erste und zweite Versuchsreihe wurde in den Jahren 2015 und 2016 durchgeführt. In dieser Arbeit werden die Ergebnisse der im Jahr 2019 durchgeführten Untersuchungen präsentiert. Auf dem Gelände der Versuchswirtschaft der Universität für Bodenkultur Wien in Groß-Enzersdorf wurden anhand eines Wegeaufbau- und Substratversuches das Wachstumsverhalten zweier typischer Uferbegleitgehölze der Arten Salix und Populus über mehrere Jahre hinweg untersucht. Der Fokus liegt hierbei speziell auf dem Penetrationsvermögen der Wurzelmasse in unterschiedlichen Substratbedingungen. Daher wurden Versuchsboxen mit Kantkornsubstraten der Durchmesserklassen 0/32, 04/32, 08/32, 16/32, 0/63, 16/63 (mm) sowie mit einem hydraulisch stabilisierten Kantkornsubstrat 08/32 hs befüllt. Bei jeder Versuchsbox wurde ein Pflanzstreifen mit Steckhölzern angelegt. Die Versuche gliedern sich in einen Wegebaufbau- und einen Substrat-Versuch. Beim Wegeaufbau-Versuch wurden die Oberflächen mit einer Deckschicht aus Beton versiegelt, um die Bedingungen eines systematischen Wegeaufbaus zu simulieren. Hier werden vor allem die Auswirkungen der Bildung von Kondenswasser zwischen Substrat und Deckschicht beobachtet, wohingegen die Versuchsboxen des Substratversuches ohne derartige Deckschicht ausgeführt wurden. Der genaue Versuchsaufbau wird im Kapitel 2 näher erläutert.

Das Erhebungsjahr 2019 stellt den Abschluss dieser Versuchsreihe dar. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wird die Methodik der beiden vorhergehenden Masterarbeiten von Müllner (2016) und Gruber (2017) beibehalten. Untersuchungen zur Bodenfeuchtigkeit sowie die von Müllner (2016) durchgeführten Lastplattenversuche wurden nicht adaptiert. Diese Arbeit konzentriert sich auf die Erhebung und Analyse der ober- und unterirdischen Biomasse des Wegeaufbau- und Substratversuches, wobei am Ende die Ergebnisse aller drei Erhebungsjahre gegenübergestellt und miteinander verglichen werden. Ziel ist es, mögliche Zusammenhänge zwischen einer erhöhten Wurzelwachstumsaktivität und dafür verantwortlichen Standortfaktoren zu analysieren und unter Berücksichtigung der vorhergehenden Ergebnisse Empfehlungen für den Wegebau abzuleiten. Die beiden ersten Untersuchungsergebnisse haben gezeigt, dass es durch stattfindende Sedimentationsprozesse zu einem erhöhten Feinanteil tieferen Schichten und eine damit verbundene, Wasserspeicherfähigkeit des Substrates kommt. Durch diese Prozesse kann es in jenen Schichten zu einer erhöhten Bildung von Wurzelmasse kommen.

Daraus ergeben sich folgende Forschungsfragen:

- Wie hat sich die Wurzelmasse der unterschiedlichen Substrate im Untersuchungszeitraum 2019 entwickelt?
- Haben die Substrate mit unterschiedlichen Kantkorngrößen Auswirkungen auf das Wurzelwachstum?
- Wie entwickelt sich die Wurzelmasse über den Versuchszeitraum von fünf Vegetationsperioden?

2 Methodik

In den folgenden Kapiteln wird zunächst der Versuchsaufbau in Groß-Enzersdorf sowie dessen Rahmenbedingungen erläutert. Dabei wird der Fokus insbesondere auf die für das Wachstum der Pflanzen wichtigen Parameter Niederschlag und Temperatur gelegt.

In weiterer Folge widmen sich die Kapitel 2.2 bis 2.4 der Erhebung und Analyse der oberund unterirdischen Biomasse, wobei eine Siebanalyse des Versuchsboxen-Substrates sowie Wurzelscans für eine bessere Interpretation der Ergebnisse dienen. Die Erhebungen fanden im Zeitraum vom 7. bis zum 31. Oktober 2019 in der Versuchswirtschaft Groß-Enzersdorf statt.

2.1 Versuchsaufbau Groß Enzersdorf

Der Versuch in Groß-Enzersdorf wurde im Jahr 2015 im Zuge der Beauftragung des Institutes für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau an der Universität für Bodenkultur durch die viaddonau Österreichische Wasserstraßen-Gesellschaft mbH angelegt und durch Weissteiner und Müllner (2016) errichtet. Das Feldexperiment gilt der Ermittlung eines annähernd bis wurzelresistenten Wegeaufbaus bzw. dafür geeigneter Kantkornfraktionen für das rd. 430 km lange (Rad-)Wegenetzes entlang der Donau. Grund der Beauftragung stellen die zunehmenden Belagsschäden der asphaltierten Uferbegleit- bzw. Treppelwege durch Wurzelwachstum und die dadurch verursachten Sanierungskosten sowie haftungstechnischen Risiken dar (viadonau, 2015).

Das Hauptaugenmerk des Versuchs liegt auf dem Wurzel-Wachstumsverhalten der gepflanzten Gehölze (*Salix* und *Populus*) hinsichtlich sechs Kantkornsubstraten unterschiedlicher Korngrößenmischung (0/32, 04/32, 08/32, 16/32, 0/63 und 16/63 mm) und einer hydraulisch stabilisierten Korngrößenmischung (08/32 mm hs) (Müllner, 2016). Die hydraulisch stabilisierte Tragschicht wurde mit 3 % Zementzugabe verfestigt. Bei diesem Versuch werden beginnend mit Müllner, 2016 (1. Vegetationsperiode) und Gruber, 2017 (2. Vegetationsperiode) die Daten der 4. Vegetationsperiode erhoben. Die Untersuchungen gliedern sich in die Wegeaufbau-Versuche und Substrat-Versuche (Abbildung 1).



Abbildung 1. Errichtung der Wegeaufbau-Versuchsboxen mit dazugehörigem Pflanzstreifen, die Substrate wurden mit Eisenstangen, Maschendraht und Kokosmatten vom Pflanzstreifen-Substrat getrennt (Müllner, 2016)

Die Wegeaufbau-Versuchsboxen mit der Bemaßung L x B x H = 1,5 x 1 x 0,5 m simulieren dabei den systematischen Aufbau einer Wegeanlage (Untergrund, Tragschicht und Deckschicht), in den Tragschichten mit fünf unterschiedlichen wurden Korngrößenmischungen (0/32, 08/32, 16/32, 0/63 und 16/63) sowie einer hydraulisch stabilisierten Mischung (08/32 hs) ausgeführt und wie in Abbildung 2 a) zu sehen mit einer Beton-Deckschicht versiegelt. Die dazugehörigen Pflanzstreifen wurden jeweils seitlich der entsprechenden Wegeaufbau-Boxen errichtet und durch Eisenstangen, Maschendraht und Kokosmatten getrennt. Dies verhindert Großteils die Durchmischung der beiden Substrate, gewährt jedoch die Penetration der Wurzelmasse in das jeweilige Kantkorngemisch. Dieser Versuch liefert Informationen über die Auswirkung der Substratmischungen auf das Wurzelwachstum sowie unter Bildung von Kondensationswasser zwischen oberer Tragschicht und Deckschicht (Gruber, 2017).



Abbildung 2: a) Versiegelung der Wegeaufbau-Versuchsboxen mit einer Betondeckschicht, b) Substrat-Versuchsboxen mit dazugehörigem Pflanzstreifen (Müllner, 2016)

Die mit L x B x H = 0,5 x 0,5 x 0,5 m bemessenen Substrat-Versuchsboxen dienen dazu, generelle Aussagen über das Wachstumsverhalten von Wurzeln in unterschiedlichen Korngrößen (0/32, 08/32, 16/32, 0/63, 16/63 und 04/32) machen zu können. Diese wurden daher wie in Abbildung 2 b) zu sehen ohne Deckschicht ausgeführt. Hier kam anstatt des hydraulisch stabilisierten Substrates 08/32 hs die Korngrößenmischung 04/32 zur Anwendung, wobei pro Kantkorngemisch zwei Substratboxen errichtet und in der Mitte durch einen Pflanzstreifen getrennt wurden.

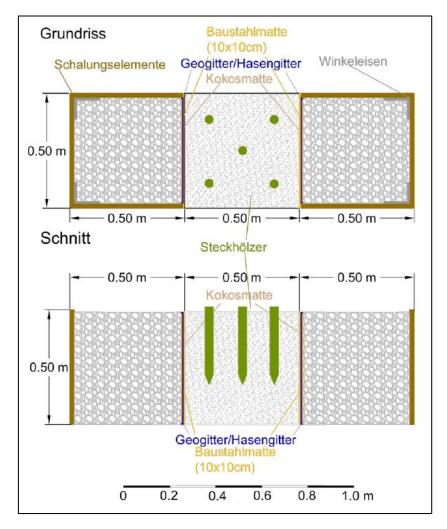


Abbildung 3: Grundriss und Schnittansicht des Substrat-Versuches (Gruber, 2017)

Für das Feldexperiment wurde daher im Versuchsgarten Groß-Enzersdorf eine Versuchsfläche von 9 x 6 x 0,8 m (Länge x Breite x Höhe) errichtet und mit zwei unterschiedlichen Tragschichten sowie einer Geo-Membran ausgestattet. Nach Fertigstellung des Grundgerüsts wurde die Fläche in drei identen Aufbauschemas unterteilt, welche abwechselnde Streifen aus Wegeaufbau-Versuchsboxen und Pflanzreihen sowie Substrat-Versuchsboxen mit dazugehörigen Pflanzreihen enthalten (vgl. Abbildung 4). Laut Müllner (2016) wurden der Aufbau und die Anordnung der Versuchsboxen bzw. Pflanzstreifen in allen drei Wiederholungen exakt gleich ausgeführt, um eine Vergleichbarkeit der in Folge erhobenen Daten gewährleisten zu können.

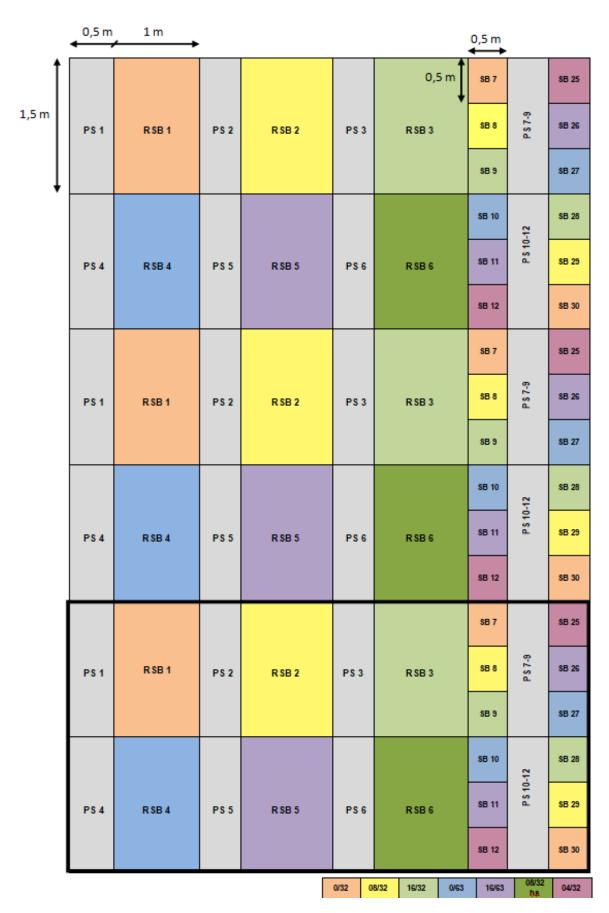


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Versuchsfläche, Wegeaufbauboxen und Substratboxen mit dazugehörigem Pflanzstreifen des Jahres 2019 schwarz umrahmt (Gruber, 2017)

2.2 Klima Groß-Enzersdorf

Die Versuchswirtschaft der Universität für Bodenkultur Wien in Groß-Enzersdorf liegt im pannonisch geprägten Gebiet Österreichs und zeichnet sich daher durch relativ heiße und niederschlagsarme sowie kalte und schneearme Winter aus.

Für die Beschreibung der wichtigsten Standortfaktoren wurden die Klimadaten im Zeitraum von 1971 - 2000 der ZAMG Wetterstation Groß-Enzersdorf (153 m.ü.A.) herangezogen. Diese umfassen die statistischen Werte der jährlichen Lufttemperatur sowie des jährlichen Niederschlagswerte.

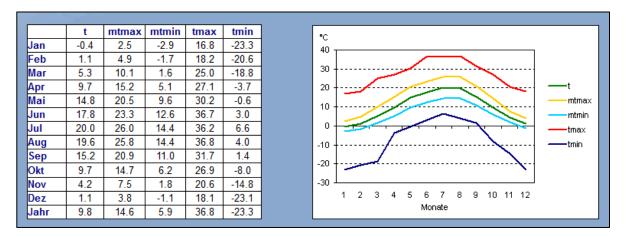


Abbildung 5: Lufttemperaturstatistik Groß-Enzersdorf im Zeitraum 1971 - 2000 mit t = Tagesmittel, mtmax = Mittel der tägl. Maxima, mtmin = Mittel der tägl. Minima und tmax bzw. tmin = absolutes Maximum bzw. Minimum (Zamg, 2020)

Das Jahresmittel der Lufttemperatur liegt dort wie in Abbildung 5 zu sehen bei rd. 9,8 °C und erreicht in den Sommermonaten Maximaltemperaturen von über 36 °C. Die jährliche Niederschlagssumme beträgt 520 mm (Abbildung 6), wobei vor allem in den Monaten Mai bis Juli die meisten Regenfälle zu verzeichnen sind. Diese liegen im Durchschnitt bei 60,6 mm und fallen im Vergleich im alpin beeinflussten Westen Österreichs deutlich geringer aus. Vergleichsweise liegt die jährliche Niederschlagssumme in der Landeshauptstadt Innsbruck bei 883,1 mm, wobei hier der durchschnittliche Niederschlag der Monate Mai - Juli bei 120,3 mm liegt, also im Vergleich zu Groß Enzersdorf rund doppelt so hoch ausfällt (Zamg, 2020).

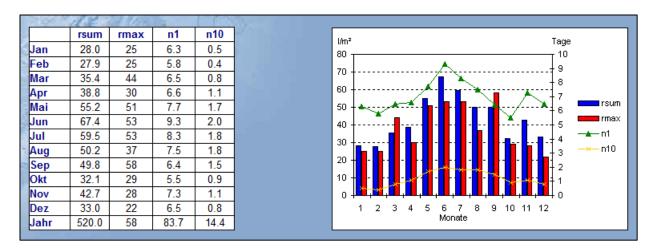


Abbildung 6: Niederschlagsstatistik Groß-Enzersdorf im Zeitraum 1971 - 2000 mit rsum = Niederschlagssumme, rmax = Größter Tagesniederschlag, n1 = Zahl der Tage mit Niederschlagssumme \geq 1 mm/m² und n10 = Zahl der Tage mit Niederschlagssumme \geq 10 mm/m² (Zamq, 2020)

2.3 Erhebung der ober- und unterirdischen Biomasse

Die Biomassenerhebung der letzten Versuchsperiode konnten vom 7. bis 31. Oktober 2019 durchgeführt werden. Dabei wurden die Zeiträume der ersten beiden Erhebungen im Oktober der Jahre 2015/16 berücksichtigt. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu garantieren, wurde neben dem Erhebungszeitraum zudem auch die Erhebungsmethode im Wesentlichen beibehalten und nur geringfügig adaptiert. Hier galt es die jeweilige, dreidimensionale Unterteilung der Pflanzstreifen und Versuchsboxen in drei Ebenen (Layer) einzuhalten. Zudem wurden die Pflanzstreifen zusätzlich in Reihen R (quer) und Säulen S (längs) gegliedert, um die spätere räumliche Zuordnung der oberirdischen Pflanzenteile zu ermöglichen.

Im Zuge der oberirdischen Biomassenerhebung der Pflanzstreifen PS1 bis PS6 der Wegeaufbau-Boxen kam ein Pflanzraster mit den Maßen 16,6 x 16,6 x 16,6 cm zum Einsatz, welches sich von der Rasterunterteilung der Pflanzstreifen PS7 - 9 bzw. PS10 - 12 der Substrat-Boxen mit 25 x 25 x 25 cm aufgrund der unterschiedlichen Dimensionierung der Versuchsboxen unterscheidet.

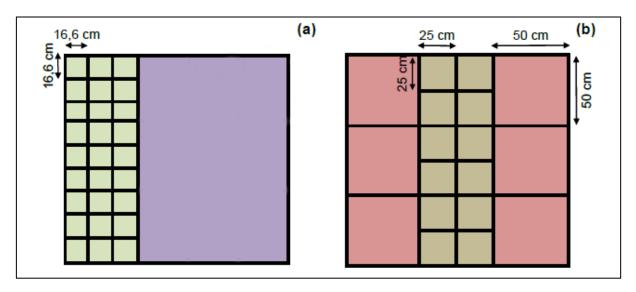


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Rasterunterteilung; links die jene des Wegeaufbau-Versuches, rechts die Unterteilung des Substrat-Versuches (Gruber, 2017)

Nachdem die oberirdischen Gehölze die Entfernung der Betondeckschicht der Wegeaufbau-Boxen behinderten, wurden diese zu Beginn geerntet sowie deren Vitalität beurteilt. Dafür wurden die Anzahl der Haupt- und Nebentriebe, deren Durchmesser als auch das Feucht- und Trockengewicht der Stamm- und Blattmasse herangezogen und analysiert Die Gehölze wurden dafür nach der Rastereinheit beschriftet (siehe Abbildung 9), um deren exakte Zuordnung gewährleisten zu können. Für die Ermittlung des Trockengewichts wurden 10 % der jeweiligen Gesamtmasse (Blatt & Stamm) bei 80 °C in einem Trockenschrank auf Gewichtskonstanz gebracht, anschließend gewogen und als Referenz der ursprünglichen 100 % mit dem Wert 10 multipliziert. Bei einigen Individuen fiel die geerntete Biomasse jedoch so gering aus, sodass die Gesamtmasse herangezogen wurde.

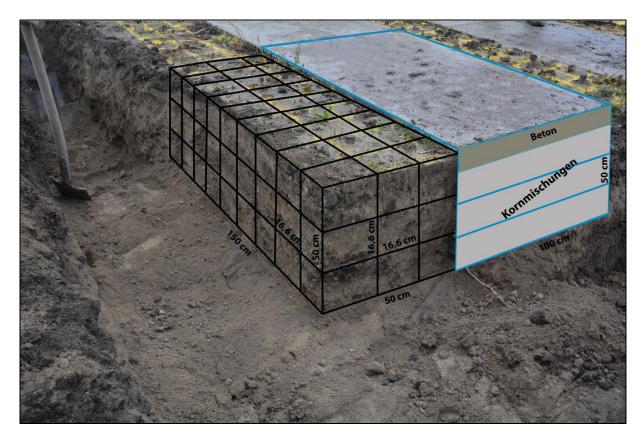


Abbildung 8: Drei-dimensionale Unterteilung des Pflanzstreifens und der Wegeaufbau-Boxen des Wegeaufbau-Versuches (Müllner, 2016)

Nach der Biomassenernte der Pflanzstreifen konnten in relativ kurzer Zeit die Betonplatten mit Hilfe des Vorort zu Verfügung stehenden Bobcat-Baggers (Abbildung 11) sowie einem Vorschlaghammer in kleinere Stücke zerschlagen und entfernt werden, um schließlich die Wurzeln aus den Wegeaufbau-Boxen zu ernten. In den letzten beiden Erhebungsperioden wurde hierfür ein Betonschneider verwendet, was jedoch zum Zeitpunkt dieser Untersuchung nicht möglich war.



Abbildung 9: Beschriftung der Gehölze nach Rastereinheit, wobei die Abkürzung R für Reihe und S für Säule verwendet wurde (Foto: Erhard, 2019)



Abbildung 10: Ermittlung der frischen Biomasse der Blätter einer Pappel (Foto: Erhard, 2019)

Die Wurzelernte der Wegeaufbau-Boxen wurde in drei Ebenen zu jeweils 13,3 cm Mächtigkeit abgetragen. Grund dieser Maße war die 10 cm dicke Betondeckschicht, welche über die Erhebungen hinaus keine weitere Rolle spielt, jedoch einen Teil des Gesamtaufbaus ausmachte. Die Substrat-Boxen wurden ebenfalls in drei Ebenen zu je 16,6 cm Mächtigkeit abgetragen. Zur Veranschaulichung kann das Rasterschema in Abbildung 7 als Draufsicht und in Abbildung 8 Ansicht betrachtet werden. Die jeweiligen Pflanzstreifen der Versuchsboxen und die Versuchsboxen selbst wurden separat in folgenden Arbeitsschritten bearbeitet:

- 1. Pflanzstreifen des beider Versuche
 - Oberirdische Biomassenernte
- 2. Wegeaufbau-Boxen
 - o Entfernung der Betondeckschicht
- 3. Pflanzstreifen des Wegeaufbau-Versuches
 - Wurzelernte
- 4. Wegeaufbau-Boxen
 - Wurzelernte
- 5. Pflanzstreifen des Substrat-Versuches
 - Wurzelernte
- 6. Substrat-Boxen
 - o Wurzelernte



Abbildung 11: Entfernung der Betondeckschicht der Wegeaufbau-Versuchsboxen mit Hilfe eines Gabelaufsatzes und Vorschlaghammers (Foto: Erhard, 2019)

Die Wurzeln konnten mit Spaten und Gartenschaufel problemlos aus den jeweiligen Schichtebenen geerntet, vom restlichen Substrat getrennt und in separat beschrifteten Behältern verstaut werden. Die Wurzeln wurden nach deren Freilegung gewaschen und in codierten Säcken bei 80 °C im Trockenschrank ebenfalls auf Gewichtskonstanz gebracht. Anschließend wurde die Wurzelmasse nach deren Durchmesser unterteilt sowie die Ermittlung der jeweiligen Gewichtsanteile vorgenommen. Dabei musste genau darauf geachtet werden, dass sämtliche Substratrückstände von den Wurzeln entfernt werden, da sonst besonders bei den Feinwurzeln eine Verfälschung des wahren Durchmessers auftrat.



Abbildung 12: Wurzelernte der Pflanzstreifen, zur Trennung von Wurzelmasse und Pflanzsubstrat wurden Analysesiebe unterschiedlicher Maschenweite verwendet (Foto: Erhard, 2019)

Die Unterteilung erfolgte nach:

- Feinwurzeln (< 2 mm)
- Mittelwurzeln (2 10 mm)
- Grobwurzeln (> 10 mm)

2.4 Siebanalyse

Nachdem im Jahr 2016 die Tendenz einer Biomassenzunahme in den untersten beiden Layern beobachtet werden konnte, soll eine Siebanalyse Aufschluss über mögliche Verlagerungen von Feinmaterial geben. Daher wurde aus den Wegeaufbau-Versuchsbox der Substrate 0/32 und 0/63 jeweils eine Substratprobe aus dem ersten und dritten Layer entnommen, anschließend im Trockenschrank bei 105 °C auf Gewichtskonstanz gebracht und im Siebturm des Modells HAVER UWL 400 (Abbildung 13) gesiebt. Dieser enthält 12 Analysesiebe unterschiedlicher Maschenweite, welche sich von grob bis sehr fein wie folgt zusammensetzt: 0,063 mm, 0,125 mm, 0,25 mm, 0,5 mm, 1 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm, 16 mm, 31,5 mm, 45 mm und 63 mm.



Abbildung 13: a) Verwendeter Siebturm HAVER UWL 400 und b) Analysesieb mit gesiebten Substratanteil (Gruber, 2017)

2.5 Wurzelscan

Nachdem die erhobene Wurzelbiomasse bereits nach Feinwurzen (< 2mm), Mittelwurzeln (2 - 10 mm) und Grobwurzeln (> 10 mm) unterteilt wurden, wurde ein Wurzelscan zum besseren Aufschluss über die Feinwurzelarchitektur durchgeführt. Mit der Bildanalyse-Software WinRHIZO konnte die Feinwurzelmasse in mindestens 20 weitere Kategorien unterteilt und die jeweiligen Längenanteile ermittelt werden.

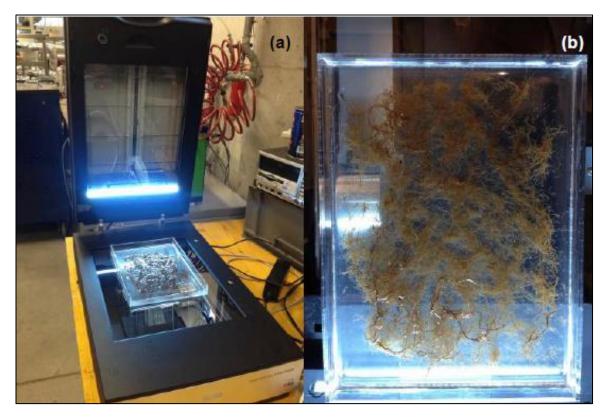


Abbildung 14: a) Wurzelscanner mit eingesetztem Plexiglasbehälter und b) Feinwurzelmasse in destilliertem Wasser (Gruber, 2017)

Dafür wurde aus den Wegeaufbau-Versuchsboxen jeweils Wurzelbiomasse aller drei Layer als Referenz entnommen und behutsam gewaschen. Um einer Verfälschung der Ergebnisse durch Feinpartikel vorzubeugen, wurden die Wurzeln zudem in einen Plexiglas-Behälter mit destilliertem Wasser gegeben und anschließend gescannt. Einige Feinwurzeln mussten vor dem Scan mit einer Pinzette behutsam voneinander getrennt werden.

3 Grundlagen

Für ein besseres Verständnis zum gegenständlichen Forschungsthema werden im folgenden Kapitel entsprechende Grundlagen behandelt, wobei neben der Beschreibung der im Versuch verwendeten Gehölzarten auch der allgemeine Schichtaufbau von Wegen näher erläutert wird. Hier stehen vor allem die Eigenschaften sowie Funktionen der einzelnen Schichten, als auch deren Eignung als potentielles Wurzelhabitat im Fokus.

3.1 Verwendeten Gehölze

Um schnelle Ergebnisse zu garantieren, wurden im gegenständlichen Versuch entsprechend schnell wachsende Arten der Gattung *Populus* (Pappeln) und *Salix* (Weiden) aus der Familie der Weidengewächse (*Salicaceae*) verwendet, welche aus einer Energieholzplantage stammen. In jenen sogenannten Kurzumtriebsplantagen kommen hauptsächlich schnell wachsende und ausschlagfähige Baumarten zu Anwendung. Unter den Pappeln zählen vor allem die Balsampappel (*Populus balsamifera*, Synonym: *Populus tacamahaca*) sowie deren Hybride und Kreuzungen zwischen Balsam- und Schwarzpappel zu den dafür geeigneten Arten. Bei den Weiden werden zudem verbuschende Arten wie die Korb-Weide (*Salix viminalis*), die Kübler- oder Kätzchen-Weide (*Salix smithiana*) und die Filzast-Weide (*Salix dasyclados*) verwendet. Neben der erhöhten Biomassenproduktion zeichnen sich jene Gehölze durch spezielle Züchtung auch durch eine verbesserte Schädlingsresistenz, Akzeptanz gegenüber höherer Pflanzdichte sowie reduzierten Lichtansprüchen aus, (Isebrands & Richardson, 2014). Eine genaue Beschreibung der beiden Gattungen wird in den folgenden zwei Unterkapiteln vorgenommen.

3.1.1 Populus

Die in den gemäßigten Gebieten der Nordhalbkugel weit verbreiteten Pappeln (*Populus*) stellen eine Pflanzengattung der Familie der Weidengewächse (*Salicaceae*) dar. Zu den in Österreich heimischen Arten gehören einerseits die Schwarz-Pappel (*Populus nigra*), Silber-Pappel (*Populus alba*), Grau-Pappel (*Populus x canescens*) sowie die Zitterpappel (*Populus tremula*). Sie wachsen vor allem entlang der Uferzone von Fließgewässern und bilden dort einen wesentlichen Bestandteil der dort vorkommenden, gewässernahen Auwälder. Diese sogenannte Weichholzaue ist durch häufige Überschwemmungen, regelmäßiger Feuchtigkeit und mechanischen Belastungen ausgesetzt, woran sich die dort vorkommenden Gehölzarten wie die Schwarzpappel (*Populus nigra*) durch entsprechende Wuchseigenschaften und Toleranzen angepasst haben. Man spricht von Pioniervegetation, welche meist die Erstbesiedelung "gestörter" Lebensräume dem Konkurrenzdruck herkömmlicher Habitate

bevorzugen. Im konkreten Fall eines Fließgewässers stellen solche Standorte Schotterbänke, Flussinseln und Uferböschungen bzw. der unmittelbare Uferbereich dar, welche der ständigen Dynamik des Wassers unterliegen. Neben fluvialen Standorten sind Pappeln zudem auf temperaten, borealen und montanen Standorten beheimatet, wo sie wiederum als aggressive Kolonisten auf Pionierstandorten anzutreffen sind (Isebrands & Richardson, 2014).

Ihr bis zu 45 Meter hoher, meist breitkroniger Habitus wird von lang gestielten Laubblättern bestückt. Sie wachsen bevorzugt auf sonnigen bis halbschattigen, feuchten Standorten und bilden dort weitläufige Herzwurzel- und Horizontalwurzelsysteme mit senkrecht austreibenden Schösslingen (Stamm) und Senker (Wurzel) aus. Über erstere kann sich der Baum zusätzlich zur generativen Vermehrung durch Flugsamen, vegetativ vermehren. Dies geschieht vor allem bei Beschädigungen des Haupttriebes bzw. nach dessen Fällung. Wird der Wurzelstock im Boden belassen, bildet sich ringsum in gewisser Zeit ein regelrechter Schösslings Wald. Das Feinwurzelsystem der Pappeln ist gegenüber anderen Gattungen recht dünn und wenig verzweigt ausgeprägt, erreicht dafür aber ein überdurchschnittliches Längenwachstum (Stettler et al. 1996).

Zu den im mitteleuropäischen Raum bedeutendsten Schädlingen und Fraßfeinden gehören diverse Pilz- und Bakterienarten wie der Pappelkrebs (*Xanthomonas popului*), der Rindenbrand (*Dothichiza populae*) oder Blattrost (*Melampsora spp.*). An Insekten ist vor allem der Große und Kleine Pappelbock (*Saperda charcharias, Saperda populnea*) sowie der Moschungsbock (*Aromia moschata*) zu nennen. Letzterer ist zwar hauptsächlich auf Weiden zu finden, befällt aber auch andere Weichholzarten wie die Pappel oder Erlen und wurde auch in jenen Weiden und Pappeln nachgewiesen, welche für den gegenständlichen Versuch gepflanzt wurden (Isebrands et al. 2014).

3.1.2 **Salix**

Die Pflanzengattung Weide (*Salix*) gehören, wie der Name bereits verrät, ebenfalls zu den Weidengewächsen (*Salicaceae*) und umfasst dort die mit Abstand größte Gruppe. Sie kommen überwiegend in den nördlichen, gemäßigten und kühleren Breiten vor. Die in Österreich heimischen Weiden umfassen rd. 32 Arten sowie zahlreiche Hybriden, wobei eine für die Ingenieurbiologie wichtigsten Vertreter die Purpur-Weide (*Salix purpurea*), Silber-Weide (*Salix alba*) und die Korb-Weide (*Salix viminalis*) darstellen. Ähnlich wie die Gattung Populus sind Weiden als Pionierpflanzen bekannt. Sie bilden ausgeprägte Bestände entlang von Flussufern und nehmen noch vor anderen Vertretern der Weichholzaue Extremstandorte wie Schotterbänke und regelmäßig überflutete Uferabschnitte ein. Ihre hohe Anpassungsfähigkeit erlaubt es ihnen zudem auch feuchte Steinbrüche, Schotterhalden

oder Felsfluren zu besiedeln. Auf Grund ihrer hohen Toleranz und guten Wurzeleigenschaften ist sie zudem ein sehr wichtiges Gehölz in der Ingenieurbiologie, wo sie für Ufer- und Hangbefestigungen Verwendung findet (Florineth, 2012).

Ihre Wuchsform ist je nach Art strauch- oder baumförmig anzutreffen, wobei baumförmige Vertreter wie die Silber-Weide bis zu 35 Meter hoch werden können. Die Blätter wachsen meist lanzettlich bis eiförmig und besitzen teilweise Nebenblätter, welche am Blattstielende positioniert sind. Neben ihrer Großteils guten vegetativen Vermehrbarkeit, pflanzen sich Weiden auch generativ fort, wobei sie zur Gruppe der getrenntgeschlechtigen oder zweihäusigen (diözischen) Pflanzen gehören. Ihr im Verhältnis zu anderen Arten stark ausgeprägtes Wurzelsystem gehört zur Gruppe der Flachwurzler. Dabei wachsen die Hauptwurzeln neben kleineren, vertikalen Wurzelsträngen vorwiegend horizontal in den oberen Bodenschichten, was die Besiedlung flachgründiger Standorte erleichtert. Das gut ausgebildete Wurzelsystem der Weiden trägt zudem zur überdurchschnittlich hohen Transpirationsleistung (Verdunstungsleistung) der Pflanzen bei, wobei sich die einzelnen Wurzeln neben ihrer stabilisierenden Dübel- und Ankerfunktion positiv auf den Bodenwasserhaushalt auswirken. Die Fähigkeit zur Ausbildung adventiver Wurzelanlagen hilft den Weiden außerdem auf Überschüttungen oberirdischer Pflanzenteile zu reagieren. Demnach können sich nach Verletzungen der Epidermis (äußeres Abschlussgewebe) bzw. bestimmten Reizen des Kambiums an bereits differenzierten Pflanzenteilen neue Wurzelanlagen ausbilden (Weissteiner & Rauch, 2015).

Neben Pilzerkrankungen wie dem Echten Mehltau (*Erysiphaceae*) stellen der breite Weidenblattkäfer (*Plagiodera versicolora*), die Weidenblattwespe (*Nematus pavidus*), Weidengallenblattwespe (*Pontania proxima*) sowie der Weidenbohrer (*Cossus cossus*) die am weitest verbreiteten Schädlinge dar. Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Arten der Gattung *Salix* reicht das Spektrum an Fraßfeinden jedoch sehr weit, wobei unter anderem auch Arten wie der Moschusbock (*Aromia moschata*), welche vorwiegend Pappeln befällt, auf Weiden zu finden ist (Isebrands & Richardson, 2014).

3.2 Wurzelökologie

Um ein besseres Verständnis zur gegenständlichen Problematik zu erlangen, widmet sich folgendes Kapitel den unterirdischen Wurzelsystemen von Pflanzen, der allgemeinen Wurzelanatomie, Wurzelmorphologie und diversen Wurzelwachstumsprozessen sowie der Interaktion zwischen Pflanze und Umwelt. Mit dem Fokus auf durch unterschiedliche Reize ausgelöste Wachstumsreaktionen, soll speziell der Hydrotropismus, also die Reaktion auf Feuchtigkeitsgradienten, anhand des Wurzelwachstums näher beschrieben werden.

3.2.1 Allgemeiner Wurzelaufbau dikotyler Pflanzen

Die Wurzel zählt neben der Sprossachse und dem Blatt zu den drei Grundorganen der Kormophyten, jenen Pflanzen, welche durch den Besitz derselben gekennzeichnet sind. Die Systematik der Kormophyten umfasst die Gruppe der Samenpflanzen (Spermatophyta) sowie der Farnpflanzen (Pteridophyta). Als einziges unterirdisches Pflanzenorgan dienen Wurzeln primär der Aufnahme von Wasser und darin gelösten Nährstoffe wie Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) bzw. der Speicherung von Reservestoffen. Neben der Funktion als Nährstoff- und Wasserlieferanten übernehmen Wurzeln zudem die Stabilisation der oberirdischen Pflanzenteile, welche je nach Standort unterschiedlich starken, mechanischen Belastungen ausgesetzt sind. Als Gesamtheit der unterirdischen Pflanzenteile werden Wurzeln unter den Begriffen Wurzelsystem, Wurzelwerk bzw. Wurzelstock zusammengefasst. Je nach Pflanzeneigenschaften unterscheidet man dabei drei Grundtypen:

- a) Flachwurzelsystem
- b) Herzwurzelsystem
- c) Pfahlwurzelsystem

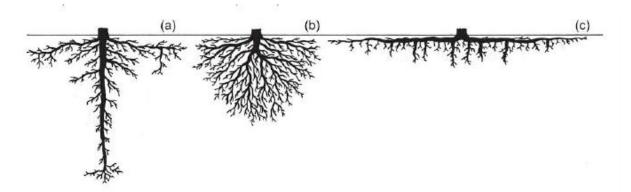


Abbildung 15: Wurzelsysteme dikotyler Pflanzen a) Pfahlwurzler, b) Herzwurzler und c) Flachwurzler (Roloff, 2016; Gruber, 2017)

Betrachtet man die Wurzelanatomie dikotyler (zweikeimblättriger) Pflanzen ist zu erwähnen, dass sich die drei Primärmeristeme der Wurzel, wie bei der Sprossachse, aus dem Apikalmeristem des Embryos bilden und in das Leitgewebe (Prokambium), Grundgewebe (Grundmeristem) und Abschlussgewebe (Protoderm) unterteilt werden. Sie dienen dem Primärwachstum der Wurzel und der weiteren Zelldifferenzierung. Um eine Schädigung der durch Teilung neu gebildeten Zellen zu verhindern, ist die sogenannte Zellteilungszone durch eine Wurzelhaube (Calyptra) geschützt (vgl. Abbildung 3). Hier wird mit der Zugabe von Tochterzellen aus der Zellteilungszone dem ständigen Abschliff durch das Vordringen im Boden vorgebeugt. Zudem sondern deren Mittellamellen eine schleimartige Substanz ab, welche neben der erleichterten Penetration der Wurzel, ebenfalls eine Rolle bei der Aufnahme von Nährstoffen spielt (Roloff, 2016).

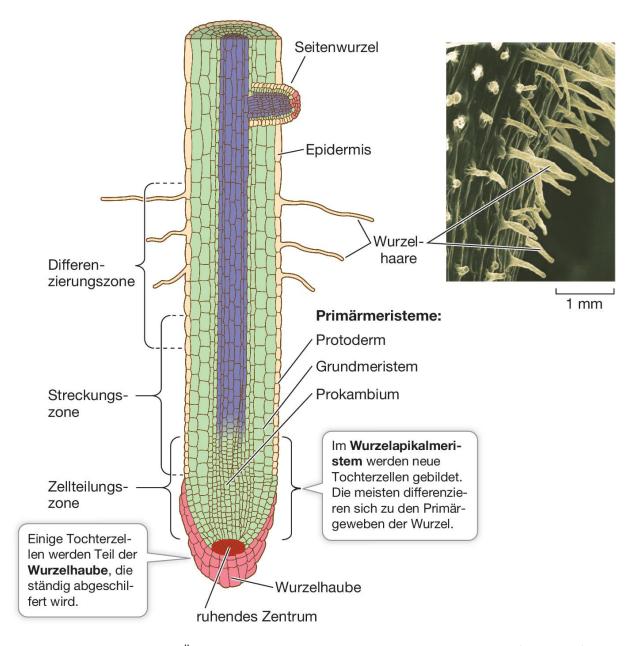


Abbildung 16: Schematische Übersicht einer Wurzelspitze nach Funktionszonen und Zelltyp (Beck, 2010)

Neben der Zellteilungszone wird zudem wie in Abbildung 2 zu sehen in eine Streckungszone und Differenzierungszone unterschieden. In ersterer passiert die Dehnung von Zellen, wobei sich die Zellwand der neugebildeten Zellen durch Aufnahme von Wasser in der Vakuole plastisch verformt und es so zu einer Zunahme der Zelllänge kommt. Hier erhalten die Zellen ihre endgültige Größe. In der Differenzierungszone wird das Bildungsgewebe schließlich in Dauergewebe umgewandelt. Dies passiert einerseits durch die eben erwähnte Streckung sowie Verdickung bzw. chemische Umwandlung der Zellwände und spezifische Ausstattung der Zellinhalte. Nach deren Differenzierung verlieren die meisten Zellen ihre Teilungsfähigkeit, womit das Primäre Wachstum abgeschlossen ist (Beck, 2010).

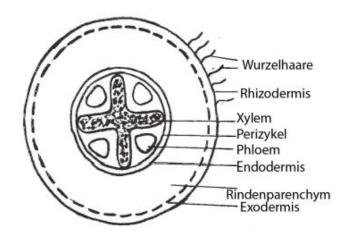


Abbildung 17: Querschnitt einer dikotylen Wurzel (Müllner, 2016; Hietz et al. 2009)

Nach einem Querschnitt der Wurzel nimmt man dessen Einteilung nun in Rhizodermis, primäre Rinde und Zentralzylinder vor. Eine genaue Unterteilung der differenzierten Gewebetypen von dikotylen Pflanzen ist in Abbildung 3 zu sehen. Demnach bildet die Rhizodermis das primäre Abschlussgewebe einer Wurzel, wobei sich aus ihren Zellen, welche der Aufnahme von Substanzen aus dem Boden dienen, im Verlauf des Wachstums feine Wurzelhaare ausbilden. Jene Haare dienen der Oberflächenvergrößerung und somit zusätzlicher Aufnahmefähigkeit, können aber schon nach wenigen Tagen bereits wieder absterben. Die darunter gelegene, primäre Rinde unterteilt sich in Exodermis, Rindengewebe und Endodermis. Die Exodermis bildet das sekundäre Abschlussgewebe der Wurzel und schützt nach dem Absterben der Rhizodermis das darunterliegende Gewebe vor äußeren Einwirkungen. Sie besteht daher fast ausschließlich aus Zellen mit verdickter Zellaußenwand. Darunter liegt das Rindengewebe, welches zwischen Exo- und Endodermis lokalisiert ist und den Transport von Wasser und darin gelösten Stoffe erlaubt. Die Endodermis bildet hier eine Sperre für schädliche Stoffe, welche nicht weiter in den Zentralzylinder eindringen können. Das Zentrum der Wurzel, der Zentralzylinder, setzt sich aus einem radialen Leitbündelsystem, den dazwischenliegenden Parenchymzellen und dem Perizykel zusammen (Jurzitza, 1987).

a) <u>Leitgewebe</u>

Das Leitgewebe differenziert sich in Xylem und Phloem, welche dem Transport von Wasser und darin gelösten, anorganischen Salzen (Xylem) sowie von Kohlenhydraten (Phloem) dienen. Ersteres bildet den Kern der Wurzel und besteht aus hohlen, verholzten Zellen und wird zum Phloem durch den sogenannten Perizykel abgegrenzt.

b) Perizykel

Dieses Gewebe schließt den Zentralzylinder zur Endodermis ab. Es dient hauptsächlich der Bildung von Seitenwurzeln (vgl. Abbildung 2), der Anlage von Peridemen (tertiäres Abschlussgewebe nach Aufreißen der Endodermis) und ist an der Bildung des im sekundären Dickenwachstum auftretenden Kambiums beteiligt. Aus letzterem gehen durch Zellteilung neue Leitbündel hervor, wobei das sekundäre Phloem nach außen, das sekundäre Xylem nach innen abgegrenzt wird.

c) Parenchymzellen

Die zwischen Xylem und Phloem liegenden Parenchymzellen beginnen sich im sekundären Dickenwachstum ebenfalls zu teilen. Es entstehen wie im Perizykel Kambiumzellen, welche sich nach außen hin zu Bastzellen (sekundäres Phloem) und nach innen Holzzellen (sekundäres Xylem) bilden (Jurzitza, 1987).

In der folgenden Abbildung 18 wird das sekundäre Dickenwachstum einer Wurzel anhand von drei Stadien geschildert:

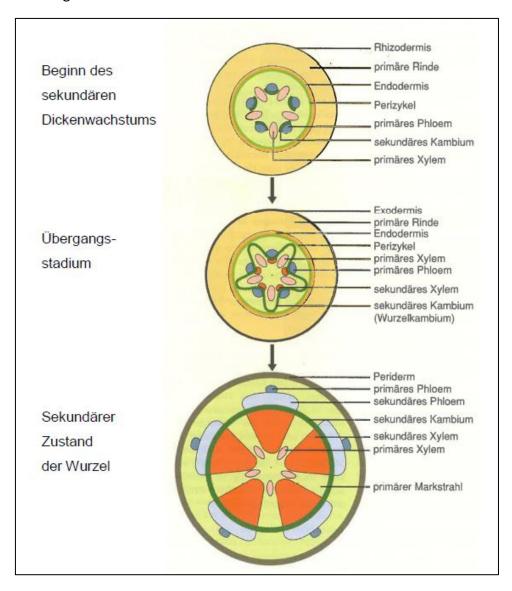


Abbildung 18: Wurzelquerschnitt im Sekundären Dickenwachstum (Müllner, 2016; Lüttge und Kluge, 2012)

3.2.2 Wurzelfunktionen

Die Wurzel ist neben Blatt und Spross das dritte Hauptorgan der Pflanzen und kann vielfältige Aufgaben übernehmen. Neben der Verankerung am jeweiligen Standort, dienen sie der Aufnahme von Wasser und Mineralen sowie der Speicherung von Reservestoffen. Auch bei verschiedenen Formen der Symbiose mit Pilzen (Mykorrhiza) oder Algen (Korallenwurzel) übernehmen sie eine wichtige Rolle. Laut Weller (1965) können viele Funktionen erst durch entsprechende Anpassungen (Metamorphosen) wahrgenommen werden:

- Aufnahme von Wasser und N\u00e4hrsalzen (Mineralien) durch die Wurzelhaare an den Spitzen der feinen Seitenwurzeln.
- Befestigung im Boden mit unterschiedlichen Anpassungen je nach Standort, z.B.
 Brettwurzeln tropischer Bäume.
- Speicherung von Reservestoffen z.B. bei der Karotte oder Kartoffel.
- Atemwurzeln zur Belüftung des Wurzelsystems an sehr feuchten Standorten, z.B.
 Atemknie bei einigen Zypressenarten.
- Luftwurzeln epiphytischer (aufsitzender) Pflanzen, wie z.B. bei den Orchideen oder Feigenbäumen.
- o Wurzeldornen zur Verteidigung vor Fressfeinden, z.B. bei einigen Palmenarten.
- Haustorien zum "Anzapfen" der Leitbahnen eines Wirtes, z.B. bei den Misteln.
- o Zugwurzeln zum Positionieren des Sprosses, z.B. bei vielen Zwiebelpflanzen.
- Symbiosen mit Wurzelknollen wie bei den Lupinen oder Korallenwurzeln bei einigen Palmfarnen.

3.2.3 Wurzelwachstumsfaktoren

Das Wachstum und die Metamorphose einer Wurzel werden neben der genetischen Veranlagung einer Pflanze sehr stark von den vorherrschenden Umweltbedingungen beeinflusst. Ist es einer Pflanze mangels entsprechender Standortbedingungen nicht möglich ihr veranlagtes Wurzelsystem auszubilden, kommt es zu arteigenen Wachstumsbewegungen. Diese hängen in der Regel von Umweltfaktoren wie Bodendichte bzw. Substrat, Temperatur, Feuchtigkeit und Licht ab und werden Tropismen genannt. Schopfer & Brennicke (2010) unterscheiden hinsichtlich Wurzeln folgende Tropismus-Typen:

o 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.
- o Thermotropisums: Die Wachstumsbewegungen richten sich nach Wärmegradienten.
- o Hydrotropismus: Die Wachstumsbewegungen orientieren sich an Feuchtegradienten.
- Phototropismus: Bei Wurzeln eine negative, vom Licht weg orientierte Wachstumsbewegung.

(Decker E., Frank W. et al. 2006)

3.3 Wegeaufbau

Generelle Grundlagen für die Wege- und Straßenbauausführungen sind die vorgesehenen Belastungstypen sowie der Frostempfindlichkeit unterschiedlicher Böden. In Österreich basieren die Planungen auf den Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (RVS) Sie gewährleisten ein einheitliches Qualitätsniveau bei Planung, Bau und Betrieb von Verkehrswegen und werden von Arbeitsausschüssen laufend inhaltlich aktualisiert. Dies umfasst neben wesentlichen Baugrundsätzen zu Konstruktion und Ausführung auch die Definition der verschiedenen Belastungstypen, welche für die Mächtigkeit der unterschiedlichen Aufbauschichten maßgebend sind (RVS, 2020).

3.3.1 Allgemeiner Schichtaufbau

Grundsätzlich lässt sich der allgemeine Schichtaufbau von Wegen in Untergrund, Unterbau und Oberbau gliedern. Auch hier werden die Schichten je nach Belastungsart und Frostempfindlichkeit unterschiedlich dimensioniert.

a) Untergrund

Als Untergrund wird der anstehende Baugrund definiert, welcher Boden bzw. Fels einschließlich aller Inhaltsstoffe (z.B. Grundwasser und Kontaminationen) darstellt. Je nach dessen Beschaffenheit kann er belassen, mit Zusatzstoffen wie Kies und Sand aufgebessert werden oder muss aufgrund unzureichender Eigenschaften ausgetauscht werden (Seipel, 2011).

b) Unterbau

Der Unterbau dient der Anpassung an die örtlichen Gegebenheiten und wird bei unzureichendem Niveau des Untergrundes als künstlich hergestellter Dammkörper ausgeführt. Er ist als solcher den Belastungen entsprechend zu verdichten und mit einem

Planum (Oberfläche des Untergrundes bzw. Unterbaus) im Gefälle zu erstellen (Seipel, 2011).

c) Oberbau

Als Oberbau wird die eigentliche Wegekonstruktion bezeichnet, welche sich aus Frostschutzschicht(en), Tragschicht(en), der Bettung und der abschließenden Deckschicht zusammensetzt. Frostschutzschichten funktionieren dabei wie Tragschichten, bestehen aus frostunempfindlichen, ungebundenen Mineralstoffen, sind im verdichteten Zustand kapillarbrechend, ausreichend wasserdurchlässig und wirken aufgrund ihrer stabilen, mechanischen Eigenschaften ebenfalls lastverteilend. Daher werden sie als Synonym auch 1. bzw. 2. Tragschicht genannt. Die eigentliche Tragschicht, auf welcher in weiterer Folge als Bettung und Deckschicht gefertigt wird, bildet den abschließenden Layer und besteht meist aus Kies-, Schotter- oder Recyclingmaterialien. Sie kann entweder durch Zugabe von Zement oder Kalk als gebundene oder ohne Zusatzstoffe als rein verdichtete, ungebundene Tragschicht ausgeführt werden. Als Bettung wird jene Schicht bezeichnet, welche das Deckmaterial aufnimmt und kann je nach Anforderungen der Deckschicht aus Splitt, Sand, Epoxidharz, Bitumen oder Mörtel hergestellt werden. Die Deckschicht wiederum bildet den abschließenden Layer und kann in vielen unterschiedlichen Varianten ausgeführt werden. Entscheidend für die Wahl der Materialien ist die spätere Funktion des Weges, also die Art und Häufigkeit der folgenden Belastung. Im Wesentlichen sind folgende Varianten gebräuchlich:

- Asphaltdecke
- Betondecke
- Plattenbelag
- Pflasterdecke
- Tragdeckschicht

(Seipel, 2011)

Dabei unterscheidet man ebenfalls gebundene und ungebundene Varianten. Ungebundene bzw. wassergebundene Decken nennt man auch unbefestigte Wege oder Schotterstraßen und sind vorwiegend im land- und forstwirtschaftlichen Raum gebräuchlich. Sie eignen sich vor allem für Verkehrswege mit geringer bis mittlerer Belastung und geringer Fahrgeschwindigkeiten. Die entlang der Donau gelegenen Treppelwege gehören größtenteils zur unbefestigten Wegebauvariante, wobei auch Abschnitte in gebundener Deckschicht vorliegen. Generell wurden Treppelwege während ihrer Verwendung als Güterwege jedoch nicht einheitlich, sondern vielmehr sektoral betreut. Demnach ist deren Schichtaufbau auch regional unterschiedlich ausgeführt worden, wobei meist Materialien wie Bauschutt aus der

näheren Umgebung, vor allem aber Schotter und Kies aus dem Flussbett der Donau Verwendung fanden (viadonau, 2020).

Mit dem vorliegenden Versuch soll nun auf diverse Fragestellung zum diesbezüglichen Wurzelwachstumsverhalten in verschiedenen Kantkornmischungen und die dafür zugrunde liegenden Einflussfaktoren näher eingegangen werden.

4 Ergebnisse

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der Datenauswertung in Form von Diagrammen dargestellt und beschrieben. Dabei gliedert sich die Auswertung in oberirdische und unterirdische Biomasse. Zudem werden die jeweils in den Jahren 2015, 2016 und 2019 erhobenen Daten gegenübergestellt und miteinander verglichen

4.1 Oberirdische Biomasse

Die oberirdische Biomasse gliedert sich in Blatt- und Stammmasse. Dazu werden die Daten der Pflanzstreifen des Wegeaufbau-Versuches (PS1 - 6) mit denen des Substrat-Versuches (PS7 - 9 und PS10 - 12) zusammengefasst, jedoch teilweise separat beschrieben. Im Zuge der Biomassenernte wurde die Anzahl an Gehölzen, die jeweilige Art sowie abgestorbene Triebe und Pflanzen erhoben. Seit dem Versuchsaufbau im Jahr 2015 sind ganze Individuen als auch Teile davon abgestorben. Diese wurden jedoch als abgestorbene Triebe zusammengefasst, was in Summe 48 Stk. von den erhobenen 132 ausmacht. Dies ergibt rd. 37 (36,9) % der Gesamtanzahl. Die restlichen 84 Individuen unterteilen sich in 16 Pappeln (12 %) sowie 58 Weiden (44 %). Deren Verteilung ist in Abbildung 19 zu sehen.

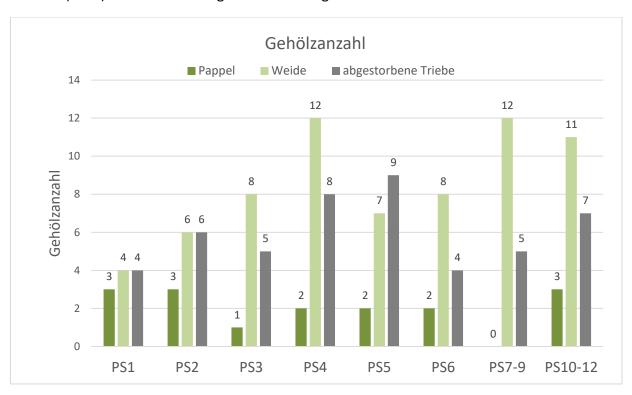


Abbildung 19: Gehölzanzahl und deren Verteilung nach Pflanzstreifen und Art, sowie Anzahl der abgestorbenen Triebe (Eigene Bearbeitung, 2019)

Bei der Analyse der Blattbiomasse ist zu auffällig, dass rd. 9.767 g (75 %) der gesamten 12.919 g Trockenbiomasse von den 16 Pappeln stammen, wovon wiederum 6.239 g (64 %) auf 6 Individuen (PS1 und PS 10 - 12) zurückzuführen ist. Lediglich die restlichen 3.152 g (25 %) stammen von den Weiden, welche jedoch 69 % der gesamten, noch lebenden Gehölze ausmachen. Wie in Abbildung 20 zu sehen, waren die größten Pappelblattmassen im Pflanzstreifen 1 sowie im Pflanzstreifen 10 - 12 zu finden. Die erhobene Blattbiomasse der Pflanzstreifen PS 2 - 6 bzw. PS 7 - 9 fiel vergleichsweise deutlich geringer aus.

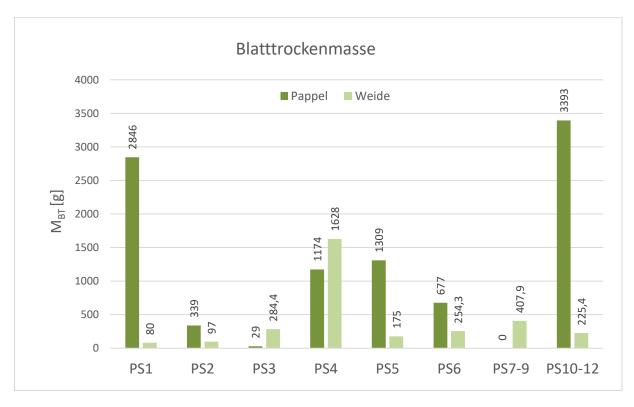


Abbildung 20: Verteilung der erhobenen Blatttrockenmasse $M_{BT}[g]$ nach Pflanzstreifen und Gehölzart (Eigene Bearbeitung, 2019)

Bei der Auswertung der Stammasse wurde ebenfalls ersichtlich, dass der Hauptteil (rd. 67 %) von den Pappeln stammt. Von den rd. 64.251 g (100 %) Gesamtmasse sind 42.765 g (rd. 67 %) den Pappeln und lediglich 21.486 g (rd. 33 %) den Weiden zuzuschreiben. Speziell auf den Pflanzstreifen PS1 sowie PS10 - 12 ist der Hauptanteil der Pappelstammmasse auszumachen, wohingegen auf PS4 ein ausgeprägter Pappelbestand jedoch auch der größte Weidenzuwachs zu beobachten war. Dabei ist zu erwähnen, dass dies einigen großen Individuen zuzuschreiben ist. Der restliche Bestand wurde vor allem in der Ausbildung der oberirdischen Biomasse durch den Befall des Moschusbockes (*Aromia Moschata*) beeinträchtigt.

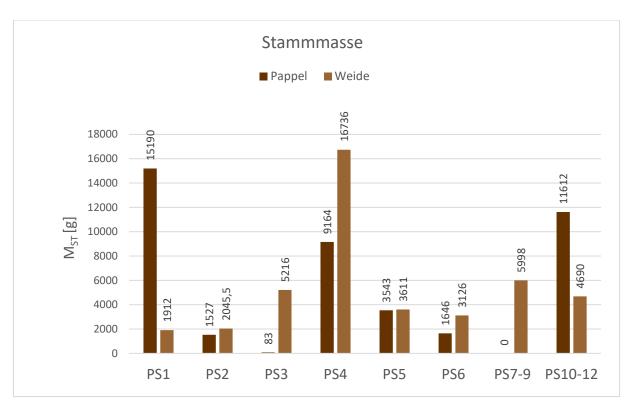


Abbildung 21: Verteilung der Stammtrockenmasse M_{ST} [g] nach Pflanzstreifen und Gehölzart (Eigene Bearbeitung, 2019)

Des Weiteren wurden alle drei Biomassenanteile (Blatt, Stamm und Wurzel) pro Pflanzstreifen zusammengefasst und gegenübergestellt. Dabei ist auf Abbildung 22 zu erkennen, dass die Pflanzstreifen PS1, PS4 des Wegeaufbau-Versuches sowie PS10 - 12 des Substrat-Versuches die mit Abstand meiste Biomasse aufweisen, wobei dafür trotz erhöhter Blatt- und Wurzelmasse hauptsächlich die Stammbiomasse verantwortlich ist. Auf den gleichen Pflanzstreifen wurden zudem die größten Individuen der jeweiligen Art geerntet. Neben den erhöhten Stammmassen jener Pflanzstreifen konnte ebenfalls eine recht homogene Massenverteilung zwischen Blatt und Wurzelmasse beobachtet werden.

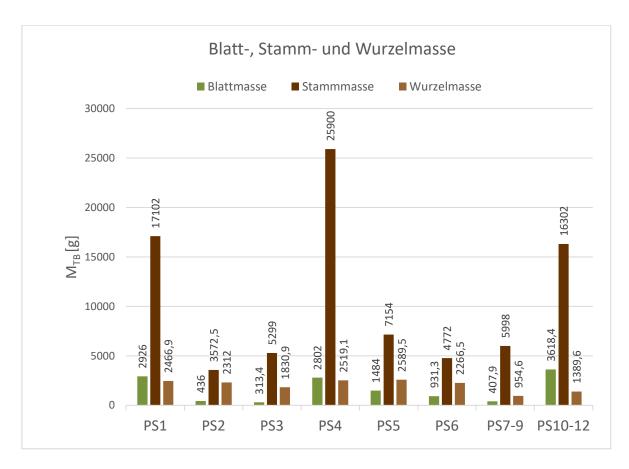


Abbildung 22: Vergleich der Trocken-Biomassenanteile M_{TB} [g] nach Blatt, Stamm und Wurzel je Pflanzstreifen (Eigene Bearbeitung, 2019)



Abbildung 23: Larve des Moschusbockes (Aromia moschata) im Wurzelgewebe einer Weide, (Foto: Erhard, 2019)

4.2 Unterirdische Biomasse 2019

Das folgende Kapitel umfasst die Auswertung der erhobenen, unterirdischen Wurzelbiomasse. Diese wird nach Pflanzstreifen, Wegeaufbauversuch und Substratversuch unterteilt und in Form von Diagrammen dargestellt. Zusätzlich wird die Biomasse der Versuchsboxen mit jener der dazugehörigen Pflanzstreifen in Relation gebracht, um das jeweilige Masseverhältnis zu untersuchen sowie die Anzahl der Gehölze pro Versuchsbox dargestellt.

4.2.1 Pflanzstreifen 2019

Bei der Auswertung der Wurzelbiomasse auf PS1 - 6 ergab sich eine relativ homogene Massenverteilung (vgl. Abbildung 24), wobei PS5 und PS4 mit jeweils über 2.500 g die höchsten Biomassewerte enthielten, dicht gefolgt von PS1, PS2 und PS6. Einzig die Werte PS3 lag mit 1.830,9 g unterhalb der 2.000 g Grenze. Aus den Pflanzstreifen des Substratversuches wurde mit 954,6 und 1.398,6 g hingegen deutlich weniger Wurzelbiomasse erhoben, wobei dort neben PS4 die meisten Gehölze erhoben wurden.

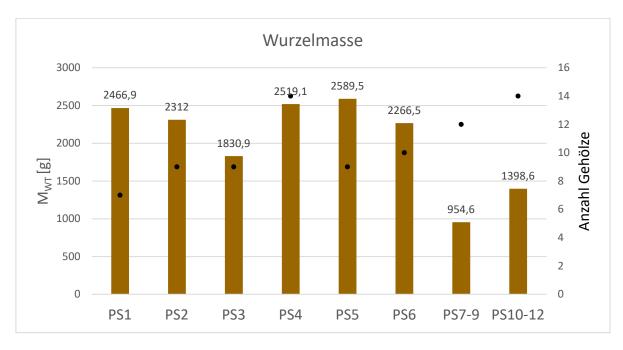


Abbildung 24: Verteilung der erhobenen Wurzelmasse $M_{WT}[g]$ pro Pflanzstreifen und Gehölzanzahl 2019 (Eigene Bearbeitung, 2019)

Neben der Gesamtbiomasse wurde zudem die vertikale Verteilung der Wurzelmasse nach Layern analysiert. Dabei ergab sich in den meisten Fällen ein Massenzuwachs in den tieferen Schichten bzw. im Layer 2 und 3. Lediglich die Werte von Layer 1 des PS4 (Wegeaufbauversuchs) sowie jene der Pflanzstreifen des Substrat-Versuches sind höher als die Wurzelmassewerte im Layer 2. Grundsätzlich weist Layer 3 den mit Abstand größten Anteil an Wurzelbiomasse auf, wobei Unterschiede bei der Gesamtmasse zwischen den Pflanzstreifen des Wegeaufbau-Versuches (PS1 - 6) und jenen des Substrat-Versuches (PS 7 - 9 und 10 - 12) ersichtlich sind.

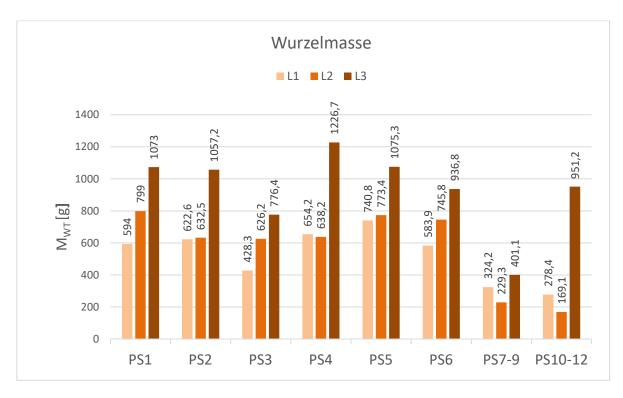


Abbildung 25: Vertikale Verteilung der Wurzeltrockenmasse $M_{WT}[g]$ Parameter angegeben nach Layer und Pflanzstreifen (Eigene Bearbeitung, 2019)

Wie in Abbildung 26 zu sehen, wurde die erhobene Wurzelmasse nach Durchmesserklassen und Layer unterteilt. Der Hauptanteil der Feinwurzeln (< 2 mm) wurden in den Layer 1 und 3 verortet, wobei sich der Trend eines Biomassenzuwachses in tieferen Schichten lediglich bei den Mittelwurzeln (2 - 10 mm) und den Grobwurzeln (> 10 mm) zeigte. In Abbildung 26 ist zudem zu erkennen, dass die aus den Pflanzstreifen des Substratversuches erhobene Wurzelbiomasse wiederum deutlich geringer ausfiel, als jene der Pflanzstreifen des Wegeaufbauversuches.

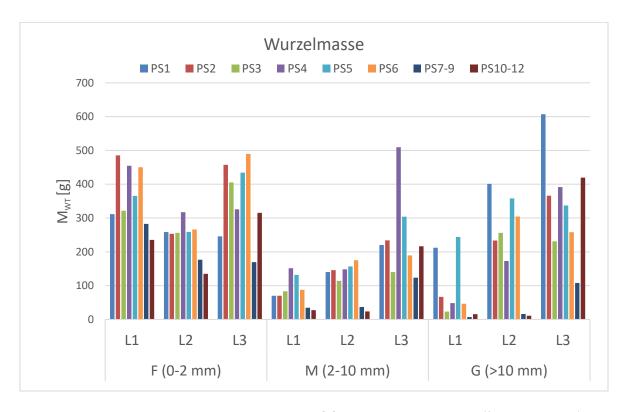


Abbildung 26: Unterteilung der Wurzelmasse $M_{WT}[g]$ nach Durchmesserklassen (fein, mittel, grob), Layer und Pflanzstreifen (Eigene Bearbeitung, 2019)

4.2.2 Wegeaufbauboxen 2019

Die Wegeaufbau-Versuchsboxen wurden nach einem vereinfachten Prinzip des Wegebaus mit einem Basis-Layer aus der jeweiligen Korngrößenmischung und einer Deckschicht aus Beton ausgeführt. Somit konnten mögliche Effekte von Kondenswasserbildung zwischen den beiden Layern analysiert werden. Die Nummerierung WB1 - 6 stimmt mit der Nummerierung der Pflanzstreifen überein.

Abbildung 27 zeigt die erhobene Wurzelmasse sowie die Anzahl an Gehölze pro zugehörigen Pflanzstreifen (1 - 6) nach Wegaufbaubox und Korngrößenmischung unterteilt. Die geringste Wurzelmassenbildung mit 135,1 g weisen die Wegeaufbaubox 6 (WB6) mit dem hydraulisch stabilisierten (hs) Substrat 08/32 dicht gefolgt von 157,6 g der WB3 des 16/32 Substrates auf. Am meisten Biomasse war in der WB5 mit der Korngrößenmischung 16/63 zu finden, welche mit 293,2 g mehr als die doppelte Menge der im hydraulisch stabilisierten Substrat erhobenen Biomasse ausmacht.

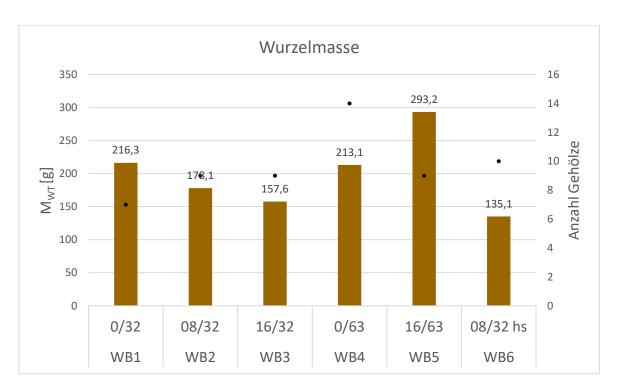


Abbildung 27: Verteilung der Wurzeltrockenmasse $M_{WT}[g]$ und Anzahl an dazugehörigen Gehölzen pro Wegeaufbau-Versuchsbox bzw. Substrattyp (Eigene Bearbeitung, 2019)

Bei der Betrachtung der vertikalen Verteilung der Biomasse zeigt sich bei drei von sechs Substraten die Tendenz einer Biomassenzunahme in tieferen Schichten. Neben den Substrattypen 08/32 und 16/32 ist mit 229 g (= rd. 78 % der dort erhobenen Gesamtmasse) vor allem im Kantkorngemisch 16/63 ein deutlicher Anstieg der Wurzelmasse im Layer 3 zu beobachten. Aus den restlichen Substarten 0/32, 0/63 und 08/32 hs konnte jeweils in Layer 1 der Großteil der Wurzelmasse ausgemacht werden, wobei im hydraulisch stabilisierten Kantkorngemisch 08/32 hs mit 135,1 g am deutlich geringsten enthalten war.

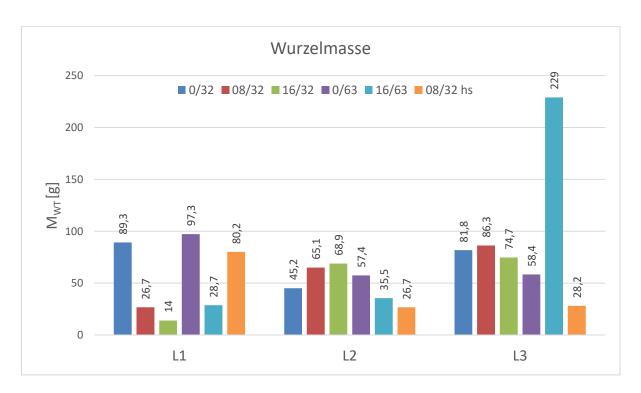


Abbildung 28: Vertikale Verteilung der Wurzelmasse M_{WT} [g] des Wegeaufbau-Versuches pro Substrattyp (Eigene Bearbeitung, 2019)

Die Unterteilung der Wurzelbiomasse nach Durchmesserklassen (fein = < 2, mittel = 2 - 10 und grob = < 10 mm) wird in der folgenden Abbildung 29 dargestellt. Dabei konnte die meiste Biomasse im Substrat 16/63 erhoben werden, wobei hier auch der größte Anteil (57%) der gesamten Grobwurzeln enthalten sind. Deren Biomasse liegt hier deutlich über jener des Feinwurzelanteils. Die restlichen Pflanzstreifen zeigen eine gegengesetzte Tendenz, wobei hier der Massenanteil der Feinwurzeln Großteils bei über 50% liegt. Im hydraulisch stabilisierten Substrat wurde am wenigsten Wurzelmasse erhoben, wobei hier das Verhältnis zwischen den Durchmesserklassen relativ homogen ausfällt. Im Korngrößengemisch 0/63 konnten hingegen nur Fein- und Mittelwurzelanteile erhoben werden, wobei der Feinwurzelanteil am höchsten war.

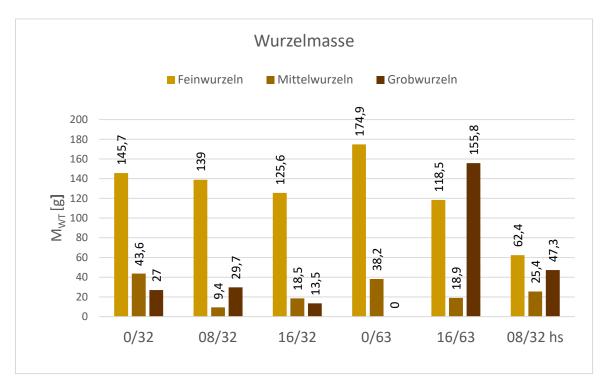


Abbildung 29: Verteilung der Wurzeltrockenmasse $M_{WT}[g]$ nach Durchmesserklasse (fein, mittel, grob) und Substrattyp (Eigene Bearbeitung, 2019)

Durch die zusammenfassende Darstellung der Wurzeltrockenmasse nach Wurzel-Durchmesserklassen und deren vertikaler Verteilung wird ersichtlich, dass der Anteil an Feinwurzeln über alle drei Ebenen recht homogen verteilt liegt, jedoch in tieferen Schichten eine leichte Zunahme zu erkennen ist. Die Anteile an Mittel- und Grobwurzeln liegen hauptsächlich auf Layer 1 und 3 verteilt, wobei sie in einigen Substraten gänzlich fehlen. Vor allem im Substrat 16/63 konnte mit 155,8 g im Layer 3 mit Abstand der größte Anteil an Grobwurzeln entnommen werden.

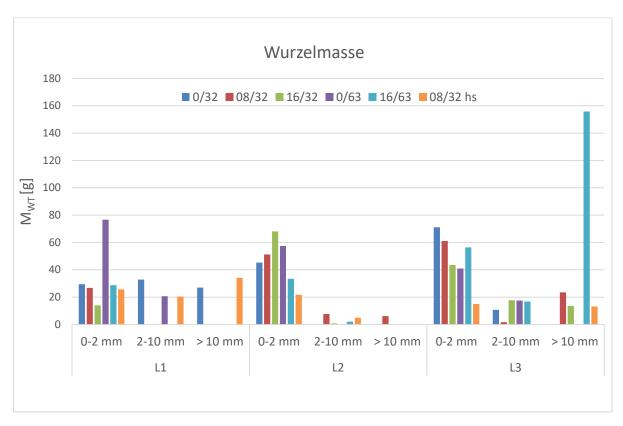


Abbildung 30: Vertikale Verteilung der Wurzeltrockenmasse $M_{WT}[g]$ nach Durchmesserklassen (fein, mittel, grob) und Layer (Eigene Bearbeitung, 2019)

Bei der Analyse der relativen Wurzelmasse pro Layer und Korngrößengemisch zeigt sich im Layer 1 eine relativ eindeutige Gliederung in zwei Gruppen. Hier liegt die größte Verhältniszahl bei 0,15 (Substrat 0/32 und 0/63), wobei für das hydraulisch stabilisierte Substrat 0,14 errechnet wurde. Die restlichen 3 Substrattypen weisen mit 0,03 bzw. 0,04 einen relativ großen Unterschied zwischen den Biomassen auf. Im Layer 2 zeigt das hydraulisch stabilisierte Substrat die geringste Verhältniszahl, dicht gefolgt von 16/63 und 0/32. Auch im dritten Layer liegt 08/32 hs mit 0,03 deutlich vor den restlichen Substraten, wobei hier im 16/63 Substrat mit 0,21 die mit Abstand größte Verhältniszahl errechnet wurde.

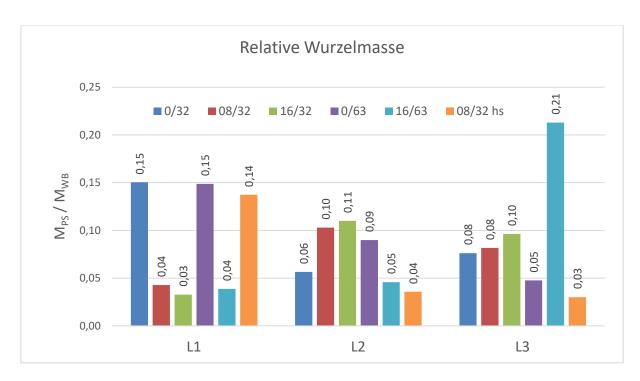


Abbildung 31: Vertikale Verteilung der relativen Wurzeltrockenmasse M_{PS} / M_{WB} nach Layer und Substrattyp (Eigene Bearbeitung, 2019)

4.2.3 Substratboxen 2019

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse des Substratversuches zusammengefasst und analysiert. Hierfür wird die erhobene Wurzelmasse der jeweils gleichen Korngrößengemische gegenübergestellt, als auch untereinander verglichen. Zudem wird die vertikale Verteilung der Wurzelmasse pro Korngrößengemisch und Durchmesserklasse sowie dessen Verhältnis mit der Wurzelmasse des jeweiligen Pflanzstreifens untersucht.

Abbildung 32 zeigt die gesamte, erhobene Wurzeltrockenmasse pro Versuchsbox bzw. Substrattyp sowie die Anzahl an Gehölzen pro dazugehörigen Pflanzstreifen. Die mit Abstand meiste Biomasse konnte im Substrat 16/63 der Versuchsboxen 11 und 26 erhoben werden, wobei diese zusammengefasst 380,3 g ausmacht und von insgesamt 6 (jeweils 3) Gehölzen des dazugehörigen Pflanzstreifens stammt. In der Substratbox 28 des Korngrößengemisches 16/32 wurde hingegen die größte, einzeln erhobene Wurzelbiomasse von 196 g ausgemacht, wobei in der Substratbox 9 des gleichen Korngrößengemisches eine relativ geringe Wurzelmasse von 87,9 g zu finden war. Auch hier lag die Anzahl an Gehölzen des dazugehörigen Pflanzstreifens bei 6 Individuen. Die geringste Biomasse konnte hingegen im Substrat 0/63 der Versuchsboxen 10 und 27 erhoben werden, wobei auch hier eine relativ hohe Anzahl an Gehölzen (4 Stk.) erhoben wurde. Dicht gefolgt vom Substrat 0/32 der Versuchsboxen 7 und 30, auf deren dazugehörigem Pflanzstreifen 3 Gehölze entnommen wurden. Die Massenanteile der Versuchsboxen gleichen Substrates stehen, mit Ausnahme des Substrates 16/32, generell in einem relativ homogenen Verhältnis.

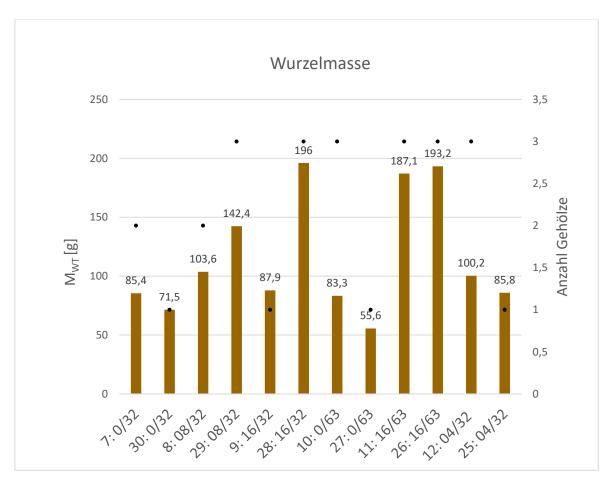


Abbildung 32: Verteilung der Wurzeltrockenmasse $M_{WT}[g]$ und die Anzahl der dazugehörigen Gehölze pro Substrat-Versuchsbox (Eigene Bearbeitung, 2019)

Bei der Betrachtung der vertikalen Verteilung der Biomasse setzt sich der aus dem Wegeaufbau-Versuch beobachtete Trend einer Zunahme der Biomasse in tieferen Schichten fort, wobei hier der größte Anteil im Layer 2 enthalten war. Speziell im Substrat 08/32, 16/32 und 16/63 konnte deutlich am meisten Wurzelmasse nachgewiesen werden. Mit 184,4 g hebt sich das Substrat 16/63 vor allem im Layer 3 hervor, nachdem mit 81,4 g im Substrat 16/32 und rd. 100 g Unterschied am zweitmeisten Wurzelmasse enthalten war. Das Substrat mit der geringsten Streuung stellt jenes der Kantkorngröße 0/32 dar, wonach die Wurzelmasse mit 60,1 g (Layer 1), 46,1 g (Layer 2) und 50,7 g (Layer 3) relativ homogen verteilt lag.

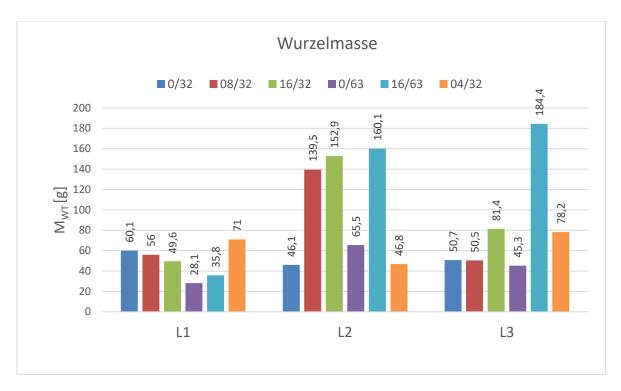


Abbildung 33: Vertikale Verteilung der Wurzeltrockenmasse $M_{WT}[g]$ pro Substrat-Versuchsbox (Eigene Bearbeitung, 2019)

Betrachtet man die nach Substraten zusammengefassten Wurzeltrockenmasse und unterteilt sie in Durchmesserklassen fällt auf, dass jene im 0/63 Korngrößengemisch mit rd. 138 g die geringste Biomasse aufweist, wobei hier keine Grobwurzeln enthalten waren. Die mit Abstand meiste Biomasse (380,3 g) konnte aus 16/63 erhoben werden. Hier ist zudem mit 71,8 g der größte Anteil an Mittelwurzeln auszumachen, wobei auch 43,5 g Grobwurzeln erhoben wurden. Dies zeigt außerdem eine Korrelation mit den Ergebnissen der Wegeaufbauboxen, wo ebenfalls im Substrat 16/63 die größte Biomasse sowie im Substrat 0/63 ebenfalls keine Grobwurzeln erhoben werden konnten.

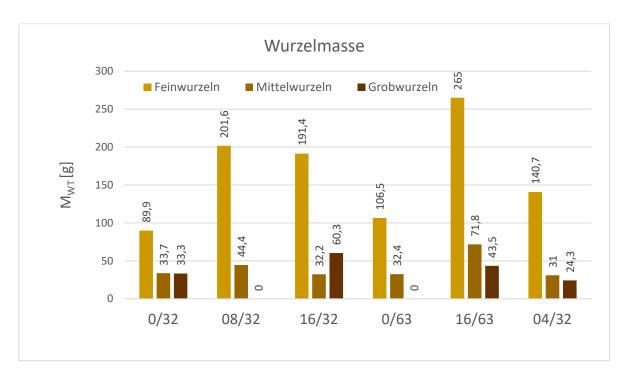


Abbildung 34: Verteilung der Wurzeltrockenmasse $M_{WT}[g]$ nach Durchmesserklassen (fein, mittel, grob) und Substrattyp (Eigene Bearbeitung, 2019)

Des Weiteren wurde die Wurzeltrockenmasse der Substratboxen wiederum nach Korngrößen sowie Durchmesserklassen zusammengefasst und ihre vertikale Verteilung untersucht. Hier ergab sich ebenfalls eine Korrelation mit den Ergebnissen des Wegeaufbauversuches, wonach mit zunehmender Tiefe (hier vor allem im Layer 2) eine Zunahme der Biomasse zu erkennen ist. Speziell der Anteil an Mittel- und Grobwurzeln (2 - 10 und > 10 mm) ist im Layer 2 und 3 deutlich über den Werten des Layer 1. Der größte Gesamtanteil an Feinwurzeln wurde im Layer 2 erhoben, verteilt sich jedoch auch auf die übrigen zwei Layer. Die aus dem Substrat 16/63 entnommene Biomasse liegt mit 380,22 g deutlich über den restlichen Anteilen, wobei hier 262,2 g (68 %) der Gesamtmasse auf Feinwurzeln zurückzuführen ist. Am wenigsten Gesamtmasse konnte mit 138,9 g hingegen aus dem Substrat 0/63 erhoben werden, dicht gefolgt vom Substrat der Kantkornmischung 0/32 mit rd. 157 g.

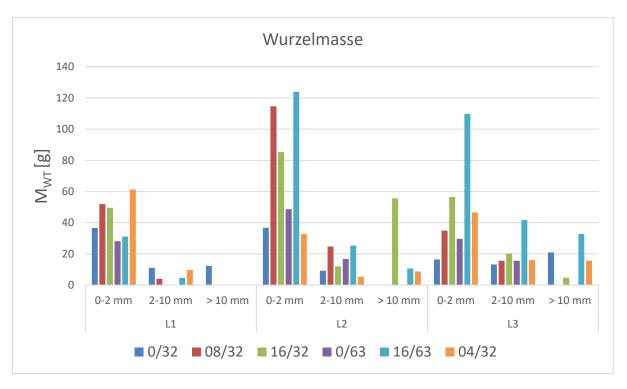


Abbildung 35: Vertikale Verteilung der Wurzeltrockenmasse $M_{WT}[g]$ nach Durchmesserklassen (fein, mittel, grob) und Layer (Eigene Bearbeitung, 2019)

Die Betrachtung der vertikalen Verteilung der relativen Wurzelmasse sind vor allem die Verhältniszahlen im Layer 2 auffällig hoch. Hier liegt jene Zahl bei den Korngrößengemischen 16/63 (2,91), 08/32 (2,70), 16/32 (1,67) und 0/63 (1,17) jeweils über dem Wert 1, was wiederum bedeutet, dass hier mehr Biomasse aus den Versuchsboxen als aus dem Layer des dazugehörigen Pflanzstreifen erhoben wurde. Einzig bei den Substraten 0/32 und 04/32 lag jene Verhältniszahl unter 1. In Layer 1 und 3 lagen die Verhältniszahlen bei allen Substrattypen wiederum unter dem Wert 1, wobei diese mit Ausnahme des Substrates 16/63 im Layer 3 zudem relativ homogen ausfielen.

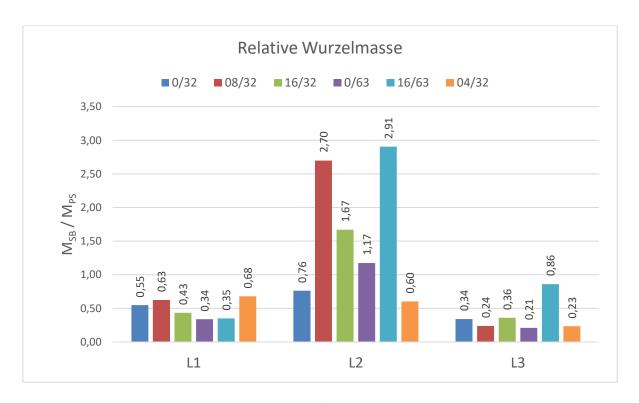


Abbildung 36: Relative Wurzeltrockenmasse M_{SB} / M_{PS} nach Layer und Substrattyp (Eigene Bearbeitung, 2019)

Zudem wurde hier der Zusammenhang zwischen der Ausbildung von Fein- und Mittelwurzeln bzw. Fein- und Grobwurzeln betrachtet. Das Bestimmtheitsmaß R² liegt hier bei beiden Regressionen oberhalb von 10 %. Die Regressionsgerade der Fein- und Mittelwurzeln konnte mit 66,38 % eine bessere Anpassung an die entsprechenden Daten liefern als jene der Fein- und Grobwurzeln, welche mit 11,76 % deutlich ungenauer ausfällt. Bei beiden ist durch die jeweils relativ steil ausgeprägte Steigung der Regressionsgeraden eine Zunahme der Mittelals auch Grobwurzeln bei zunehmendem Feinwurzelanteil zu beobachten.

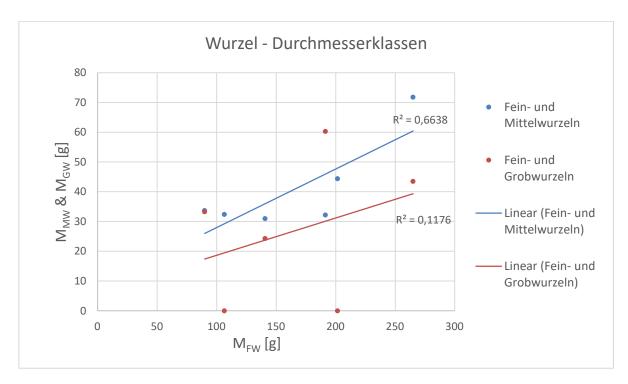


Abbildung 37: Lineare Regression der Wurzeldurchmesser-Klassen des Wegeaufbau-Versuches, unterteilt in Fein- und Mittelwurzeln sowie Fein- und Grobwuzeln (Eigene Bearbeitung, 2019)

4.3 Wurzelscan

Mit Hilfe des Wurzelscans konnte die Unterteilung der Wurzelmasse in Durchmesserklassen noch genauer analysiert werden. Hier wurden Wurzelproben aller drei Layer der Wegeaufbau-Versuchsboxen (WB1 - WB6) entnommen und gescannt. Für eine bessere Übersicht werden die im WinRHIZO (2020) festgelegten dreißig Durchmesserklassen in der folgenden Abbildung 38 als sehr feinen Wurzeln (0 - 1 mm), Feinwurzeln (1 - 2 mm), Mittelwurzeln (2 - 5 mm) und Grobwurzeln (5 - 10 mm) zusammengefasst.

Demnach fällt in allen Wegeaufbau-Versuchsboxen der größte Anteil an Wurzeln in die Kategorie der sehr feinen Wurzeln. Stellt man die verschiedenen Substrattypen gegenüber, konnte aus der Wurzelprobe des Substrates 16/63 der mit 201.543 cm Länge größte Anteil an sehr feinen Wurzeln erfasst werden. Auch in den restlichen Kategorien liegt der Wurzelanteil desselben Substrates weit vorne, was im Jahr 2016 ebenfalls beobachtet werden konnte. Trotz des erhöhten Anteils an sehr feinen Wurzeln (80.423 cm), fällt jener der restlichen drei Durchmesserklassen im hydraulisch stabilisierten Substrat 08/32 hs am geringsten aus. Der kleinste Anteil an sehr feinen Wurzeln konnte hingegen mit 43.269 cm in der Wurzelprobe des Substrates 16/32 bzw. mit 55.382 cm in jener des Substrates 0/63 gefunden werden. Mit zunehmendem Durchmesser ist jedoch bei allen Wurzelproben eine deutliche Abnahme der Wurzelanteile zu erkennen, was jedoch wenig über die Massenverhältnisse aussagt.

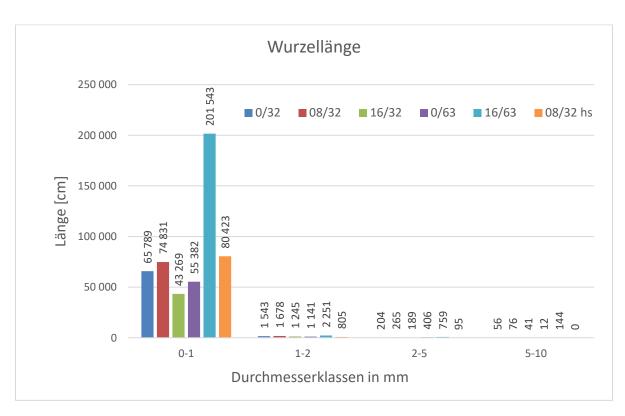


Abbildung 38: Längenanteil der Wurzeltrockenmasse nach Durchmesserklasse und Wegeaufbau-Versuchsbox bzw. Substrattyp (Eigene Bearbeitung, 2019)

Mit Ausnahme des hydraulisch stabilisierten Substrates 08/32 hs im Layer 1 sowie des Substrates 16/63 im Layer 2, konnte bei der Analyse der vertikalen Verteilung der größte Anteil an Wurzeln im Layer 3 verortet werden. Hier als auch im Layer 2 konnten mit 147.261 cm bzw. 41.655 cm wiederum am deutlich meisten Wurzelanteile im Substratgemisch 16/63 beobachtet werden, wohingegen im Substrat 16/32 mit 32.722 cm die geringsten Anteile zu finden waren. Im Layer 1 wurden im hydraulisch stabilisierten Substrat 08/32 hs mit 34.657 cm die meisten Wurzelanteile erfasst, gefolgt vom Substrat 16/63 mit 15.781 cm.

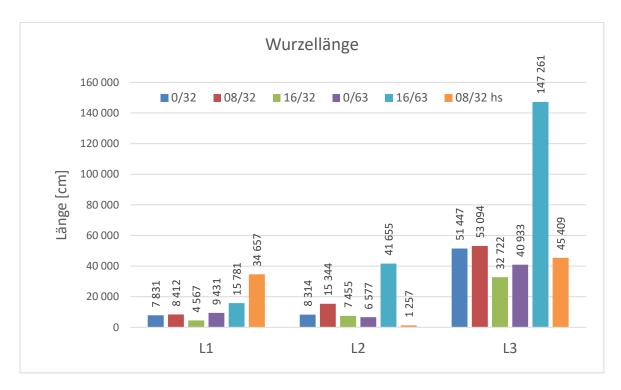


Abbildung 39: Vertikale Verteilung der Wurzellängen-Anteile nach Layer und Substrattyp (Eigene Bearbeitung, 2019)

4.4 Siebanalyse

Das Ergebnis der Siebanalyse des Wegeaufbau-Versuches soll zusätzlichen Aufschluss über das Ausmaß der Sedimentation seit der Errichtung des Versuches geben. Dazu wurden zwei Referenzproben aus dem Layer eins und drei der Substrate 0/32 und 0/63 des Wegeaufbau-Versuches entnommen, auf Gewichtskonstanz gebracht und anschließend im Siebturm HAVER UWL 400 gesiebt. Die Wahl der Stichproben fiel jeweils auf die Substrate der größten Anzahl unterschiedlicher Kantkornfraktionen. Die Massenanteile unterteilen sich hier in neun unterschiedliche Kantkorngrößen, welche in den jeweiligen Tabellen 1 und 2 ersichtlich sind.

Das Ergebnis der Siebanalyse des Substrates 0/32 zeigte im Layer 3 eine Verlagerung der Massenanteile in kleinere Korngrößenfraktionen. Vor allem im Bereich der Korngrößen 0,063 - 1 mm konnte ein höherer Prozentanteil als in Layer eins ausgemacht werden. Der größere Anteil an grobkörnigem Substrat der Fraktion 31,5 - 2 mm konnte hingegen in Layer eins ermittelt werden.

Sieblinie Substrat 0/32

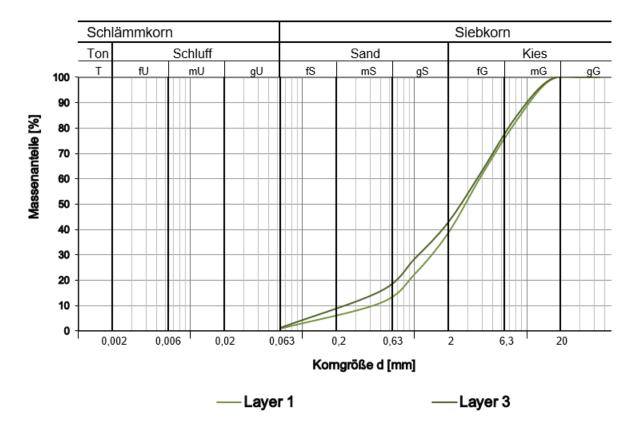


Abbildung 40: Ergebnis der Siebanalyse des Substrates 0/32 nach Korngröße und Prozentanteil

Tabelle 1: Korngrößenanteile (%) der Siebanalyse des Substrates 0/32

d [mm]	L1 [%]	L3 [%]
0,063	0,89	1,05
0,5	10,18	14,56
1	11,25	12,68
2	16,28	14,42
4	22,91	20,22
8	20,77	21,18
16	16,24	14,76
31,5	1,48	1,13
45	0	0

Wie in Abbildung 41 zu sehen, konnte im Substrat 0/63 (WB2) gegenüber dem Layer eins wiederum ein leicht erhöhter Anteil an Feinpartikeln der Kantkorngröße 0,063 - 1 mm im Layer drei beobachtet werden. Zudem war im Layer eins der Kantkorngröße 8 - 45 mm ein leicht erhöhter Anteil an grobkörnigem Material zu finden, was ebenfalls auf Sedimentationsprozesse zurückzuführen ist.

Sieblinie Substrat 0/63

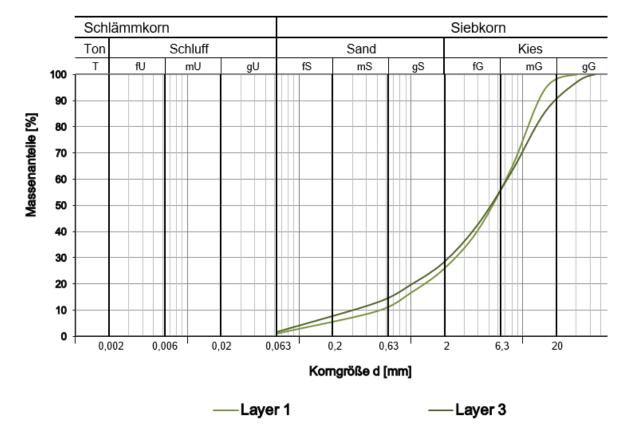


Abbildung 41: Ergebnis der Siebanalyse des Substrates 0/63 nach Korngröße und Prozentanteil

Tabelle 2: Korngrößenanteile (%) der Siebanalyse des Substrates 08/32

d [mm]	L1 [%]	L3 [%]
0,063	1,14	1,72
0,5	8,56	11,27
1	6,97	6,73
2	9,31	8,78
4	14,64	14,3
8	23,77	20,07
16	30,13	22,89
31,5	5,48	11,61
45	0	2,63

4.5 Vergleich der Ergebnisse aller drei Erhebungsjahre

Im folgenden Kapitel werden die erhobenen Wurzelmassen aller drei Erhebungsjahre miteinander verglichen. Dabei wird die Auswertung in mehreren Schritten vorgenommen, wobei zuerst die Ergebnisse aller drei Erhebungen in oberirdische und unterirdische Biomasse zusammengefasst und gegenübergestellt werden. Folgend soll eine Übersicht der aus den jeweiligen Substraten gewonnenen Biomassen erstellt werden, wobei hier wiederum die Ergebnisse aller drei Erhebungen nach Substraten zusammengefasst dargestellt werden. Anschließend folgt die separate Betrachtung der Wurzelmassen-Entwicklung in den unterschiedlichen Substraten des Wegeaufbau- und Substrat-Versuches. Die Wurzelmasse der jeweils zwei Versuchsboxen gleicher Substratmischung werden hinsichtlich des Substrat-Versuches zudem nach Korngrößengemisch zusammengefasst, um bei der Analyse der Ergebnisse eine bessere Übersicht zu gewähren. Nachdem die erste Erhebung 2015 bereits nach einem Jahr abgeschlossen war und zwischen der zweiten und dritten Erhebung ein Zeitabstand von 3 Jahren stattfand, soll außerdem die Analyse der Wurzelmasse ohne Layer 3 eine bessere Vergleichbarkeit der Resultate ermöglichen. Grund dafür ist der in einer Vegetationsperiode relativ geringe Anteil an Grob- und Mittelwurzeln in tieferen Schichten sowie die allgemeine Tendenz einer Biomassenzunahme in tieferen Schichten, was besonders in den Erhebungsjahren 2016 und 2019 deutlich wurde.

Erhebungsjahr 2015

Nach der Errichtung des Feldversuches durch Weissteiner und Müllner sowie der Auswertung der Ergebnisse im Jahr 2015, konnten bereits erste Aussagen über die Eignung der jeweiligen Substratgemische gemacht werden. Hierbei wurde die Biomassenerhebung vertikal unterteilt und in drei Layern mit je 16,6 cm vorgenommen. Das Ergebnis zeigt in allen Substraten eine Biomassenzunahme in tieferen Schichten, wobei der Hauptanteil in Layer 3 lokalisiert wurde. Die größte Wurzelbiomasse konnte nach der ersten Vegetationsperiode bei beiden Versuchen im Substrat 08/32 und 0/63 gefunden werden, wobei sich der allgemeine Trend einer erhöhten Wurzelbiomasse in Substraten mit ausgeglichenen Anteilen an Fein- und Grobmaterial (≤ 0,1 mm bzw. ≥ 32 mm) zeigte. Grund dafür stellten der durch Feinmaterial erhöhte Anteile an wasserspeicherfähigem Substrat als auch die durch Grobkorn geschaffenen und mit Luft gefüllten Hohlräume dar (Müllner, 2016).

Zudem wurden neben der Beobachtung der ober- und unterirdischen Biomassenentwicklung Untersuchungen zu den Bodenfeuchtigkeitsverhältnissen in den unterschiedlichen Pflanzstreifen unternommen. Diesbezügliche Information konnte mithilfe der Messsensoren Hydra-Probe II der Firma Stevens gewonnen werden, welche in verschiedenen Tiefen im

Bodenkörper der Gehölzpflanzstreifen eingebaut wurden (Müllner, 2016). Da Ergebnis zeigte bei Zunahme des volumetrischen Wassergehaltes ebenfalls eine Zunahme der Wurzelbiomasse in jenen Pflanzstreifen, welche vollständig vom umgebenen Erdreich umgrenzt wurden. Im Pflanzstreifen PS1 und PS4, welche auf einer Seite mit dem umgebenden Erdreich verbunden waren, konnte durch ständige Porenwasserabgabe hingegen eine reduzierte Wurzelbildung beobachtet werden (Müller, 2016).

Zur Ermittlung der Verformbarkeit und Tragfähigkeit des Bodens sowie der Substrate führte Müller 2015 außerdem dynamische Lastplattenversuche durch. Hierbei fiel ein genormtes Gewicht aus bestimmter Höhe auf einen Druckplattensensor, welcher aus den Setzungswerten die Maximalbelastung in MN/m² errechnete. Das Ergebnis der durchschnittlich höchsten Setzung zeigte das hydraulisch stabilisierte Substrat 08/32 hs, wobei kein eindeutiger Trend einer dadurch reduzierten Wurzelmassenbildung erkennbar war (Müller, 2016).

Erhebungsjahr 2016

Den Ergebnissen der vorhergehenden Erhebung folgend, beschreibt Gruber (2017) die Tendenz einer erhöhten Wurzelmasse in tieferen Schichten der Versuchsboxen und unterstreicht hier das vermehrte Auftreten von Mittel- und Grobwurzeln. Als Grund dafür gibt sie die Ausbildung der rd. 30 cm tiefen Initialwurzeln der Stecklinge sowie den dort beobachteten, durch Sedimentationsprozesse und Geomembran erhöhten Feuchtigkeitsgehalt des Substrates an.

Hinsichtlich Wurzelmassenproduktion konnte im hydraulisch stabilisierten Substrat der Kantkornmischung 08/32 hs mit 84 g am geringste und im Substrat der Kantkornmischung 16/63 mit 224 g am meisten Wurzelbiomasse erhoben werden. Verglichen mit den Wegeaufbau-Versuchsboxen, beschreibt sie zudem den vergleichsweisen hohen Anteil an Mittelwurzeln in den Substrat-Versuchsboxen. Trotz der rd. zwei Drittel kleineren Dimensionierung wurden hier speziell im Layer zwei und drei erhöhte Anteile an Wurzelmasse beobachtet. Laut Gruber (2017) spielen dabei die im Substrat-Versuch erhöhte Anzahl an gepflanzten Gehölzen als auch organischer Nährstoffeintrag durch das Fehlen einer Deckschicht eine Rolle. Zudem wird vermutet, dass die im Gegensatz zum Wegeaufbau-Versuch manuelle (händische) Verdichtung des Substrates weniger effektiv und die Wurzelmassenproduktion durch das Auftreten größerer Poren-Volumina dadurch verstärkt wurde.

Bei der Betrachtung der Entwicklung der unterirdischen Biomasse ist zu erkennen, dass vor allem zwischen den ersten zwei Vegetationsperioden ein deutlicher Zuwachs der Wurzelmasse von rd. 1.180 g stattgefunden hat, wobei dies rd. 42 (42,23) % der gesamten erhobenen Wurzelmasse ausmacht. Über die restlichen drei Jahre konnte ebenfalls ein Zuwachs von 1.056 g beobachtet werden, wobei die Wachstumskurve merklich abflacht. Die oberirdische Biomassenentwicklung zeigt hingegen nach den ersten beiden Erhebungen eine recht spärliche Biomasse von 19.510,8 g (16,43 %) und zwischen zweiter und dritter Erhebung einen Zuwachs von rd. 86.000 (85.954,34) g, welcher mehr als 83 (83,57) % der Gesamtmasse ausmacht.

Vergleich Ober- und Unterirdische Biomassenentwicklung

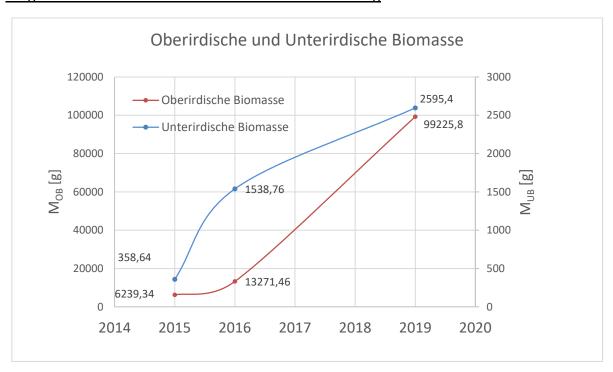


Abbildung 42: Oberirdische (M_{OB} [g]) und Unterirdische (M_{UB} [g]) Biomassenentwicklung über den gesamten Versuchszeitraum von 2015 - 2019

Wegeaufbau-Versuch

Im hydraulisch stabilisierten Substrat 8/32 hs konnte mit rd. 313 g Gesamtmasse die geringste Wurzelbiomasse erhoben werden, wobei im Jahr 2016 trotz dreijährigem Abstand mehr Biomasse enthalten war, als im Jahr 2019. An zweiter Stelle liegt das Substrat 16/32, welches mit 334,75 g Gesamtmasse nur gering vor dem Substrat 0/63 mit rd. 377 g liegt. Merklich ist jedoch, dass im Korngrößengemisch 16/32 nach relativ kurzer Zeit im Jahr 2015 bereits 50,48 g Biomasse enthalten war, was in diesem Erhebungsjahr den größten Anteil an Wurzelmasse ausmacht. Am deutlich meisten Biomasse konnte jedoch aus den Versuchsboxen des Korngrößengemisches 16/63 entnommen werden. Hier wurden insgesamt rd. 538 g Wurzelmasse erhoben, wobei in den Erhebungsjahren 2016 und 2019 aus jenem Substrat die meiste unterirdische Biomasse enthalten war.

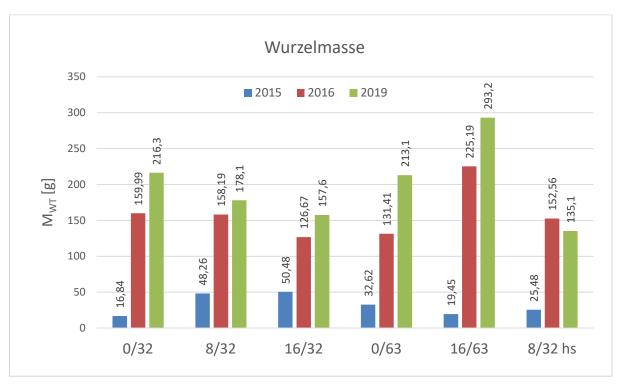


Abbildung 43: Vergleich der Wurzeltrockenmasse $M_{\rm WT}$ [g] je Wegeaufbau-Versuchsbox bzw. Substratgemisch und Erhebungsjahr

Auf Abbildung 44 sind die Wurzelmassen aller drei Erhebungsjahre ohne Layer 3 abgebildet. Besonders auffällig gestaltet sich der Vergleich des Substrates 16/63. Trotz der hier mit Abstand am meisten entnommenen Biomasse, ist bei Ausschluss des dritten Layer eine drastische Abnahme der Gesamtbiomasse zu erkennen. Demnach sind lediglich rd. 25 % der im Jahr 2016 und 22 % der im Jahr 2019 erhobenen Wurzelmasse in Layer eins und zwei zu finden. Allgemein ist zudem ersichtlich, dass der Wurzelmassenanteil des Layer 3 in den meisten Versuchsboxen über 40 % ausmacht.

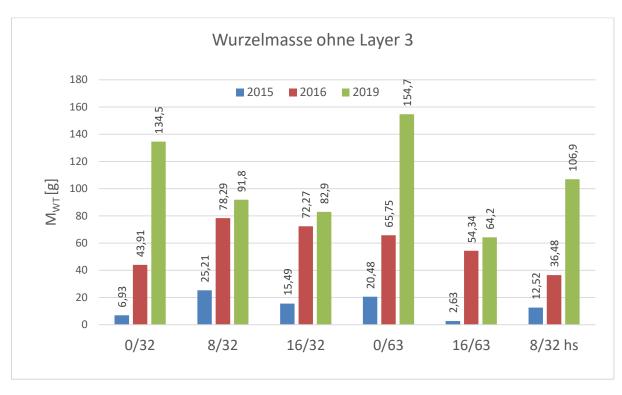


Abbildung 44: Vergleich der Wurzeltrockenmasse M_{WT} [g] je Substratgemisch und Erhebungsjahr, mit Ausschluss von Layer drei

Die Analyse der vertikalen Verteilung der Wurzelmasse nach Layer und Korngrößengemisch bestätigt jene Annahme einer Biomassenzunahme in tieferen Schichten. Hier sticht vor allem Layer 3 hervor, welcher in allen drei Erhebungsperioden die mit Abstand meiste Biomasse aufwies, gefolgt von Layer 2. Auffällig ist zudem, dass der Wurzelmassenanteil des Korngrößengemisches 16/63 im Layer drei der Jahre 2016 und 2019 weit über jenen der anderen Substrate liegt, in den anderen beiden Schichten jedoch relativ gering ausfiel. Im hydraulisch stabilisierten Substrat 8/32 hs konnte mit Ausnahme der erhöhten Anteile im Layer 1 (2019) und Layer 3 (2016) am wenigsten Wurzelmasse extrahiert werden.

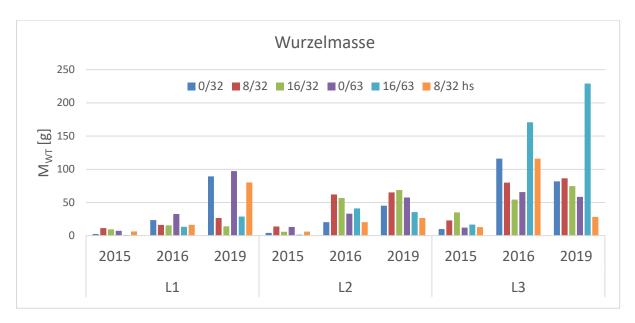


Abbildung 45: Vertikale Verteilung der jeweils erhobenen Wurzeltrockenmasse M_{WT} [g] nach Layer und Erhebungsjahr (Müllner, 2016; Gruber, 2017)

Substrat-Versuch

Der Vergleich der aus den Substratboxen erhobenen Wurzelmasse zeigt, dass im Substrat 16/63 gesamt mit rd. 489 g wiederum am deutlich meisten Biomasse enthalten war. Vor allem die im Jahr 2019 extrahierte Wurzelmasse übersteigt mit Abstand jene aller anderen desselben Jahres bzw. der Jahre 2015/16 und konnte im Substrat 16/32 mit 283,9 g nur annähern erreicht werden. Allgemein konnte in den Substrat-Versuchsboxen ein relativ großer Unterschied der Biomasse zwischen den einzelnen Erhebungsjahren beobachtete werden, wobei jene des Jahres 2019 den mit Abstand größten Anteil ausmacht. Die mit 224,07 g geringste Gesamtwurzelmasse konnte aus dem Substrat 0/32 erhoben werden, gefolgt von der Versuchsbox des Substrates 0/63 mit 265,66 g.

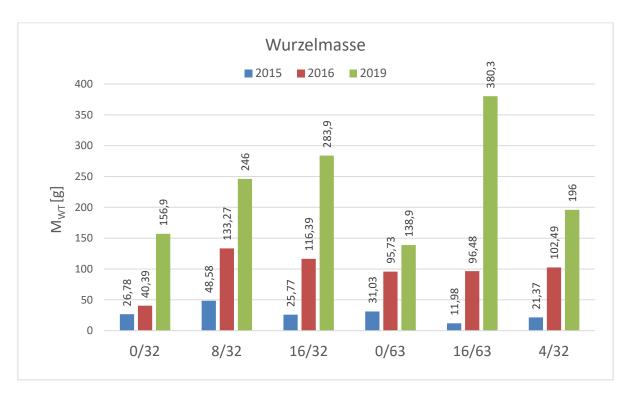


Abbildung 46: Vergleich der Wurzeltrockenmasse M_{WT} [g] nach Substrat-Versuchsboxen bzw. Substratgemisch und Erhebungszeitraum ()

In der Abbildung 47 wurde die aus den Versuchsboxen des Substrat-Versuches erhobene Wurzelmasse aller drei Erhebungsjahre ohne Layer drei gegenübergestellt. Das Ergebnis zeigt vor allem eine deutliche Biomassenabnahme im Substrat 16/63, wobei hier ein Defizit von rd. 264 g der ursprünglichen 489 g Gesamtmasse zu beobachten ist. In den Substratboxen der Korngrößenmischung 16/32 und 8/32 ist ebenfalls eine sichtliche Abnahme der Gesamtwurzelmasse zu erkennen. Der geringste Unterschied war in den Versuchsboxen des Substrates 0/32 auszumachen, wobei hier lediglich 82 g der gesamten 224,07 g im Layer drei zu finden war. Allgemein ist zudem wiederum zu erkennen, dass die im Jahr 2019 erhobene Wurzelmasse deutlich über jener der Erhebungsjahre 2015 bzw. 2016 liegt.

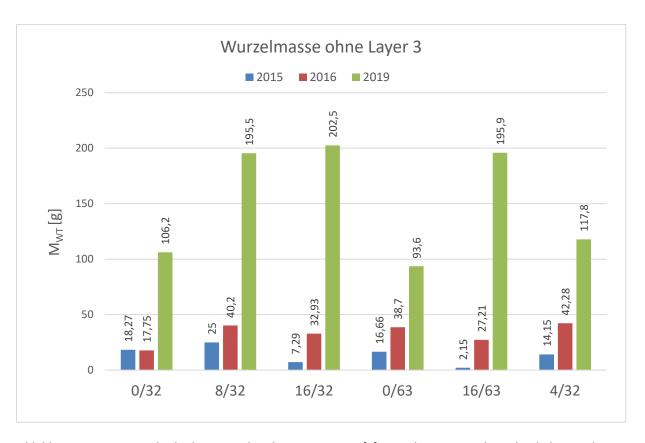


Abbildung 47: Vergleich der Wurzeltrockenmasse M_{WT} [g] je Substratgemisch und Erhebungsjahr, mit Ausschluss von Layer drei (Müller, 2016; Gruber, 2017)

Die vertikale Verteilung der Wurzelmasse zeigt auch im Substrat-Versuch in allen drei Erhebungsjahren eine wesentliche Steigerung des Biomassenanteils in tieferen Schichten. Speziell im Substrat des Kantkorngemisches 16/63 konnte 2019 im Layer 2 und 3 der jeweils mit Abstand größte Anteil an Wurzelbiomasse entnommen werden, wohingegen dieser Trend im Erhebungsjahr 2015 nicht eindeutig zu erkennen ist. Zudem liegt der im Jahr 2019 erhobene Wurzelmassenanteil des Substratgemisches 8/32 und 16/32 im Layer 2 ebenfalls weit über dem Durchschnitt, während der größte Biomassenanteil der Jahre 2015 und 2016 in derselben Substratmischungen, jedoch im Layer 3 zu finden war.

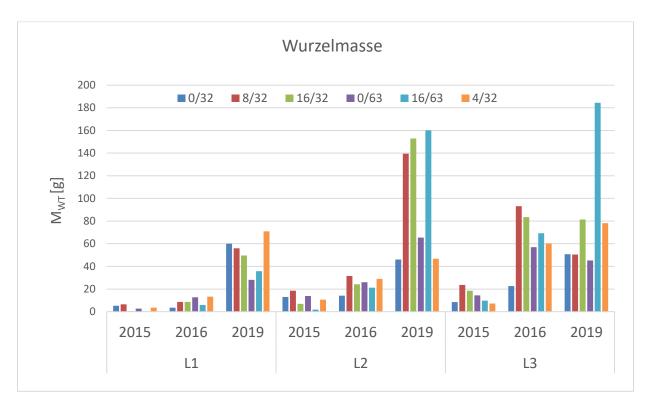


Abbildung 48: Vertikale Verteilung der Wurzeltrockenmasse $M_{WT}[g]$ nach Layer und Erhebungsjahr (Müller, 2016; Gruber, 2017)

Vertikale Biomassenverteilung

Die vertikale Verteilung der Wurzelmasse in den einzelnen Substraten zeigte bei allen Erhebungen die Tendenz einer allgemeinen Zunahme der Biomasse in tieferen Schichten. Bis auf das Substrat der Kantkorngröße 0/32 und 8/32 hs ist in den restlichen Kantkornmischungen bereits ab Layer 2 eine Biomassenzuwachs zu verzeichnen, wobei hier durchschnittlich mit zunehmender Kantkorngröße der jeweiligen Substrat-Typen (0/32-16/32 und 0/63 - 16/63) auch eine Biomassenzunahme zu beobachten ist. Vor allem im Substrat der größten Körnung 16/63 fällt diese besonders deutlich aus und übersteigt mit 682,32 g im Layer drei alle restlichen Werte bei weitem. Die zwei Substrate mit der geringsten Biomasse stellen jene der Kantkornmischung 8/32 hs und 4/32 dar.

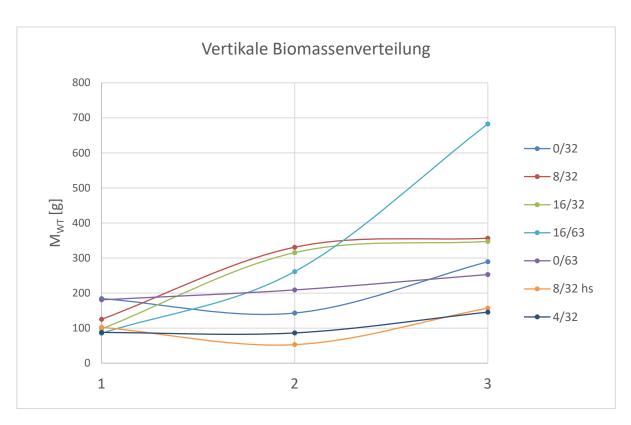


Abbildung 49: Vertikale Verteilung der Wurzelbiomasse $M_{WT}[g]$ aller drei Erhebungsjahre nach Layer (1, 2 und 3) in den einzelnen Substraten (Müllner, 2016; Gruber, 2017)

5 Diskussion und Ausblick

Die vorliegende Arbeit stellt den Abschluss einer seit dem Frühjahr 2015 dokumentierten Versuchsreihe Ermittlung möglicher Präventivmaßnahmen hinsichtlich Penetrationsvermögen von Wurzeln in Wegeaufbauschichten unterschiedlicher Kantkorngrößen dar. Spezieller Fokus wurde hierbei auf das Wurzelwachstumsverhalten von Weiden und Pappeln in Substraten unterschiedlicher Kantkorngrößen gesetzt, wobei zusätzlich die dafür verantwortlichen Faktoren analysiert wurden. Laut Decker et al. (2006) werden Wurzelwachstumsbewegungen von gewissen Umweltreizen initialisiert, welche je nach Pflanzenart Feuchtigkeits- oder Nährstoffgehalt, Temperatur, Verdichtungen des Bodenmaterials etc. darstellen können. Im konkreten Fall der Weide bzw. Pappel betrifft dies hauptsächlich den Feuchtigkeitsgehalt im Boden, man spricht von Hydrotropismus. Die Zusammensetzung des Bodenmaterials sowie ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen Porenluft und Porenwasser spielen dabei eine wichtige Rolle und beeinflussen die Ausprägung unterschiedlicher Wurzeltypen. Die im Versuch verwendeten Substrate unterscheiden sich in ihrer Kantkorngrößen-Zusammensetzung und besitzen somit unterschiedliche Eigenschaften hinsichtlich Drainage-Vermögen, Wasserspeicherfähigkeit und mechanischer Stabilität. Die Ausprägung von Wurzelmasse fiel daher relativ heterogen aus, was im Folgenden anhand der Ergebnisse beschrieben wird.

Das Wurzelwachstum der jeweiligen Pflanzstreifen gestaltete sich relativ homogen, wobei in allen Pflanzstreifen das gleiche Substrat verwendet wurde. Bis auf den Pflanzstreifen PS3 und PS7 - 9 bzw. 10 - 12 liegt die extrahierte Wurzelmasse jeweils deutlich über 2.000 g. Vor allem der geringe Anteil an Grob- und Mittelwurzeln der Pflanzstreifen PS3 und jener der Pflanzstreifen des Substrat-Versuches trägt hier zu deutlichen Massenunterschieden bei. Speziell entlang der Pflanzstreifen PS7 - 9 und 10 - 12 konnten Setzungen bzw. Verformungen beobachtet werden, welche aufgrund der fehlenden Schalung der Pflanzstreifen und durch Erd-Druck des umliegenden Erdreiches verursacht wurden. Der dadurch verringerte Wurzelraum führte zu erhöhten Konkurrenzverhältnissen zwischen den einzelnen Pflanzen, was in einem reduzierten bzw. veränderten Wurzelwachstum resultierte. Zudem fiel die Gehölzanzahl der Pflanzstreifen des Substrat-Versuches, wie in Abbildung 24 zu sehen, mit 12 (PS7 - 9) bzw. 14 (PS10 - 12) verhältnismäßig hoch aus, was jene Konkurrenzverhältnisse noch weiter verschärfte. Hinsichtlich der vertikalen Verteilung der Wurzelmasse konnte in allen Pflanzstreifen eine Zunahme der Wurzelmasse in tieferen Schichten, speziell im Layer 3 beobachtet werden. Die über den Versuchszeitraum fortschreitenden Sedimentationsprozesse und die damit verbundene Verlagerung von Feinmaterial in Layer 2 und 3 kann hierzu beigetragen haben. Zudem wurde nahe dem Geomembran eine erhöhte Bodenfeuchtigkeit beobachtet. Eine mögliche Erklärung dafür wäre die erhöhte Wasserspeicherfähigkeit jenes Feinmaterials sowie die Barrierewirkung der Geo-Membran und des verdichteten Untergrundes.

Aus dem Substrat 0/32 konnte in den Versuchsboxen des Wegeaufbau-Versuch 216,3 g, aus jenen des Substrat-Versuches 156,9 g Wurzelmasse extrahiert werden. Die Gesamtmasse beträgt somit 373,2 g und fällt im Vergleich zu den restlichen Substraten durchschnittlich aus. Vor allem der erhöhte Anteil an Feinwurzeln wird hier gleich dem Substrat 0/63 auf die ausgeglichenen Bestandteile aus Fein- bis Grobmaterial zurückgeführt, welche rd. 63 % der in beiden Versuchen erhobenen Gesamtmasse ausmacht. Die vertikale Verteilung der Wurzelmasse zeigt eine recht homogene Aufteilung auf alle drei Layer, wobei die meiste Biomasse im Layer 1 und 3 lokalisiert werden konnte. Die Ergebnisse der Siebanalyse jenes Substrates zeigt in beiden Layer zudem eine relativ gleichmäßige Verteilung der Kantkornfraktionen, wodurch sich in allen drei Ebenen annähernd gleiche Bedingungen für die Ausbildung unterschiedlicher Wurzeltypen ergaben. Hinsichtlich der relativen Wurzelmasse konnte im Wegeaufbau-Versuch lediglich 8,7 % der aus dem dazugehörigen Pflanzstreifen erhobenen Wurzelmasse extrahiert werden. Im Vergleich dazu lag jener Prozentsatz im Substrat-Versuch in Versuchsbox 7 bei 66 % und in Versuchsbox 30 desselben Substrates bei 38 %, was wiederum auf die veränderte Dimensionierung der Pflanzstreifen zurückzuführen ist.

Im Substrat 4/32 waren 196 g Wurzelmasse enthalten, wobei jenes Substrat nur im Substrat-Versuch verwendet wurde und somit nicht mit jenen Ergebnissen des Wegeaufbau-Versuches gesamtheitlich verglichen werden kann. Im Verhältnis zu den restlichen Substraten des Substrat-Versuches fällt das Ergebnis jedoch durchschnittlich aus, wobei lediglich im Substrat 0/32 sowie 0/63 weniger Biomasse erhoben werden konnte. Die Unterteilung in Durchmesser-Klassen lässt wiederum den Rückschluss auf erhöhte Anteile an Feinwurzeln aufgrund ausgeglichener Verhältnisse zwischen Fein- bis Grobmaterial zu. Bei der Betrachtung der vertikalen Verteilung der Wurzelmasse zeigt sich wiederum eine recht homogene Verteilung in alle drei Layer und lässt ähnlich dem Substrat 0/32 einen erhöhten Biomassenanteil im Layer 1 und 3 erkennen. Mit 27 % (0,27) relativer Wurzelmasse in der Versuchsbox 12 des Substrat-Versuches liegt jener Prozentsatz rd. doppelt so niedrig wie in der zweiten Versuchsbox desselben Substrates (58 %) und stellt zudem den niedrigsten Prozentsatz aller hier verwendeten Substrate dar.

Im Kantkorngemisch **8/32** konnten insgesamt 424,1 g Wurzelmasse erhoben werden, während 178,1 g aus der Versuchsbox des Wegeaufbau-Versuches und 246 g aus jener des Substrat-Versuches stammen. In ihrer Gesamtheit liegt die Biomasse des Substrates 8/32 im Verhältnis zu den restlichen wiederum im Mittelfeld und macht im Wegeaufbau-Versuch am drittmeisten, im Substrat-Versuch am viertmeisten aus. Hinsichtlich der Differenzierung nach

Durchmesser-Klassen stellen 340,6 g der 424,1 g Feinwurzeln dar, was rd. 80 % der Gesamtmasse ausmacht und 17 % mehr beträgt, als im Substrat 0/32. Die Betrachtung der vertikalen Verteilung der Wurzelmasse lässt erkennen, dass der Großteil (rd. 77 %) jener Feinwurzeln in Layer 2 und 3 zu finden war und dort ein erhöhter Feuchtigkeitsgehalt aufgrund möglicher Verlagerungen des Feinmaterials in tiefere Schichten herrschte. Der relative Anteil an Wurzelmasse beträgt im Wegeaufbau-Versuch 7,7 % und in der Versuchsbox 8 des Substrat-Versuches 74 % bzw. 67 % in der Versuchsbox 29. Der Prozentsatz des Wegeaufbau-Versuches liegt dabei an zweiter Stelle und konnte lediglich von jenem des Substrates 8/32 hs mit 5,9 % unterschritten werden. Im Substrat-Versuch liegt das Verhältnis wie in allen Substraten deutlich darüber und kann wiederum durch den reduzierten Wurzelraum aufgrund von Setzungsvorgängen im Substrat des Pflanzstreifens erklärt werden.

Das hydraulisch stabilisierte Substrat 8/32 hs wurde, wie jenes der Größenfraktion 4/32 im Substrat-Versuch, lediglich in einem der beiden Versuche, dem Wegeaufbau-Versuch angewandt. Mit Zugabe von Zement als hydraulisches Bindemittel konnte hier mit 135,1 g Wurzelmasse deutlich am wenigsten Biomasse erhoben werden. Damit wurden dort rd. 22,5 g weniger Wurzelmasse erhoben werden, als im Substrat 16/32, welches im Wegeaufbau-Versuch am zweitwenigsten ausmacht. Betrachtet man die Ausbildung der unterschiedlichen Durchmesserklassen fällt auf, dass im Vergleich zu den restlichen Substraten relativ viel Mittel- und Grobwurzeln enthalten waren. Mit 47,3 g konnte aus jenem Substrat im Vergleich zu den restlichen Boxen beider Versuche am drittmeisten Grobwurzel-Biomasse erhoben werden. Der Anteil an Mittelwurzeln fiel mit 25,4 g durchschnittlich aus, wobei 62,4 g zu den Feinwurzeln gezählt wird. Vor allem mit der Zugabe von Zement als Stabilisationsmittel im obersten Layer liegt die Vermutung nahe, dass hier ebenfalls die Ausprägung von massereichen Wurzeln mit stabilisierender Funktion begünstig wurde. Mit einem ansonsten relativ ausgeglichenen Verhältnis an Fein- und Grobmaterial erklärt sich daher das ebenfalls ausgeglichene Verhältnis an Fein- bis Grobwurzeln. Die vertikale Verteilung der Wurzelmasse unterstreicht dabei jene Vermutung, nachdem der Großteil der Wurzelmasse (hier vor allem Grobwurzeln) in jenem ersten, hydraulisch stabilisierten Layer zu finden war. Aus den restlichen zwei Layer konnte mit 26,7 g aus Layer 2 bzw. 28,2 g aus Layer 3 lediglich 40,6 % der Gesamtmasse erhoben werden. Die relative Wurzelmasse liegt in jenem Substrat bei 5,9 %, was verglichen mit den restlichen Prozentsätzen aller Substrate am wenigsten ausmacht.

Des Weiteren wurde in der Kantkornmischung **16/32** des Wegeaufbau-Versuches mit 157,6 g am zweitwenigsten Biomasse, in jener des Substrat-Versuches mit 283,9 g jedoch am zweitmeisten Wurzelmasse entnommen. Bei dem Vergleich der Substrate beider Versuche

fällt auf, dass vor allem im Substrat-Versuch ein erhöhter Anteil an Grob- und Mittelwurzeln zu finden war. Mit 60,3 g konnte aus jenen zwei zusammengefassten Versuchsboxen am zweitmeisten Grobwurzel-Biomasse erhoben werden, wohingegen jener Anteil im Wegeaufbau-Versuch nur bei 13,5 g liegt. Es wird angenommen, dass auch hier aufgrund erhöhter Anteile an Mittel- bis Grobmaterial, speziell im Substrat-Versuch ebenfalls die Ausbildung von Mittel- und Grobwurzeln begünstigt wurde. Bei der Betrachtung der vertikalen Verteilung der Wurzelmasse ist eine Zunahme in tieferen Schichten zu beobachten. Dies betrifft alle drei kategorisierten Durchmesserklassen, wobei der Anteil an Mittel- und Grobwurzeln ausschließlich in Layer 2 und 3 zu finden war. Der erhöhte Feinwurzelanteil im Layer 2 und 3 beider Versuche ist zudem sehr wahrscheinlich der Verlagerung von wasserspeicherfähigem Feinmaterial zuzuschreiben, was bereits als Sedimentation beschrieben wurde. Die relative Wurzelmasse konnte im Wegeaufbau-Versuch mit 8,6 % und im Substrat-Versuch in der Versuchsbox 9 mit 47 % bzw. in Versuchsbox 28 mit 80 % errechnet werden. Der relativ hohe Prozentsatz im Substrat-Versuch ist wiederum dem reduzierten Wurzelraum im Pflanzstreifen zuzuschreiben, was die Penetration der Wurzeln in die umliegenden Versuchsboxen attraktiver gestaltete.

Aus dem Substrat der Kantkornmischung 0/63 konnte mit 138,9 g Wurzelmasse im Substrat-Versuch am wenigsten, im Wegeaufbau-Versuch mit 213,1 g jedoch am drittmeisten Wurzelmasse erhoben werden. Das ausgeglichene Verhältnis der Anteile an Fein- bis Grobmaterial konnte hier ebenfalls die Ausprägung der Wurzelmasse unterschiedlich beeinflussen. Das Feinmaterial in jenem Substrat scheint bei Betrachtung der Wurzel-Durchmesserklassen vor allem durch dessen erhöhte Wasserspeicherfähigkeit die Ausprägung von Feinwurzeln begünstigt zu haben, welche rd. 80 % der Gesamtmasse ausmachen. Die restlichen 20 % fallen auf die Durchmesserklasse Mittelwurzeln, wobei in beiden Versuchen keine Grobwurzeln enthalten waren. Bei der vertikalen Ausprägung der Wurzelmasse ist wie im Substrat 0/32, welches ebenfalls ein ausgeglichenes Verhältnis von Fein- bis Grobmaterial aufweist, eine relativ homogene Verteilung der Biomasse in allen drei Layer zu beobachten. Das Ergebnis der Siebanalyse jenes Substrates lässt ebenfalls keine nennenswerte Verlagerung von Feinanteilen erkennen, was die homogene, vertikale Verteilung wiederum erklärt. Mit 8,4 % relativer Wurzelmasse fällt das Substrat 0/63 im Wegeaufbau-Versuch durchschnittlich aus. Im Substrat-Versuch konnte hingegen mit 48 % in Versuchsbox 10 und 30 % in Versuchsbox 27 der geringste Prozentsatz an relativer Wurzelmasse erreicht werden. Im Hinblick auf die allgemein erhöhten Relativ-Werte scheint das nicht sonderlich wenig, ist jedoch aufgrund der gleichen Ausgangssituation dennoch nennenswert.

Die abschließende Betrachtung des Substrates 16/63 lässt im Verhältnis zu allen anderen Substrat-Typen die mit Abstand größte Ausbildung unterirdischer Biomasse erkennen. Mit 293,2 g im Wegeaufbau-Versuch und 380,3 g im Substrat-Versuch und insgesamt 673,5 g liegt die hier erhobene Wurzelmasse sogar 232 g vor jener des Substrates 16/32, welches mit rd. 441,5 g am zweitmeisten ausmacht. Vor allem der Anteil an Mittel- und Grobwurzeln ist hier überdurchschnittlich hoch. Im Wegaufbau-Versuch umfasst dieser 18,9 g Mittel- bzw. 155,8 g Grobwurzeln, im Substrat-Versuch 71,8 g Mittel- und 43,5 g Grobwurzeln. Ähnlich dem Substrat 16/32 kann dies durch die erhöhten Anteile an Mittel- bzw. Grobmaterial erklärt werden, worin die Wurzeldifferenzierung vermehrt in Richtung der Ausbildung massereicher Stabilisationswurzeln aufgetreten ist. Zudem konnte der größte Teil der Biomasse im Layer 3 der Versuchsbox des Wegeaufbau-Versuches und in Layer 2 und 3 des Substrat-Versuches erhoben werden, was die Ankerfunktion jener Wurzeln noch weiter ausprägte. Trotzdem konnten in allen Layer der drei Versuchsboxen auch Feinwurzeln entnommen werden, was vor allem auf Layer 2 und 3 der Versuchsboxen des Substrat-Versuches zutrifft. Die relative Wurzelmasse liegt zudem in beiden Versuchen über 10 % und macht im Wegeaufbau-Versuch 11,3 % und im Substrat-Versuch in Versuchsbox 11 89 %, in Versuchsbox 26 mit 115 % sogar mehr aus, als im dazugehörigen Pflanzstreifen entnommen wurde. Das ist insofern bemerkenswert, als dass trotz wachstumsfreundlicheren Bedingungen im Substrat des Pflanzstreifens die erhöhten Konkurrenzverhältnisse ausgereicht haben, die Penetration der Wurzelmasse in das Substrat 16/63 vorzuziehen.

5.1 Beantwortung der Forschungsfragen

Nach der Analyse der einzelnen Ergebnisse lassen sich nun allgemeine Aussagen hinsichtlich der Biomassenausprägung in unterschiedlichen Substraten aller drei Erhebungsjahre zusammenfassen. Dabei soll die Beantwortung der Forschungsfragen unter Berücksichtigung der Ergebnisse durch Müllner (2016), Gruber (2017) und Erhard (2019) entsprechende Schlussfolgerungen und Empfehlungen für den zukünftigen Wegebau ermöglichen:

Wie hat sich die Wurzelmasse der unterschiedlichen Substrate im Untersuchungszeitraum 2019 entwickelt?

Den Ergebnissen des Untersuchungszeitraumes 2019 nach spielt das Verhältnis zwischen Porenwasser und -luft bzw. zwischen fein- und grobkörnigem Substrat in der Ausprägung von Wurzeln verschiedener Durchmesserklassen eine wesentliche Rolle, was wiederum zu veränderlichen Biomassenanteilen in den Substraten führte. So wurde bei zunehmender Kantkorngröße durchschnittlich ebenfalls eine Zunahme der Mittel- und Grobwurzeln bzw. eine Abnahme der Feinwurzelanteile beobachtet. Zudem konnte bei Zugabe eines hydraulischen Bindemittels in Form von Zement im Substrat 8/32 hs eine deutliche

Reduktion der Feinwurzelbildung, dafür jedoch ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen allen Wurzel-Durchmesserklassen erreicht werden. Dies ist damit zu erklären, dass etwaige Feinpartikel durch den Zement gebunden wurden und damit ihre Wasserspeicherfähigkeit verloren, wobei die neuentstandenen Konglomerate als punktuelle Masseansammlungen wiederum die Bildung von Mittel- und Grobwurzeln begünstigten. Dafür spiegelt sich vor allem die Ausbildung von Feinwurzeln in Substraten mit kleineren Kantkornfraktionen wie den Substraten 0/32 und 0/63 wider. Dabei stellt die erhöhte Wasserspeicherfähigkeit von Feinmaterial attraktive Bedingungen für die Ausprägung des Feinwurzelsystems der Pflanzen dar. Aufgrund der Barrierewirkung der in Layer 3 gelegenen Geo-Membran und dem verdichteten Untergrund, konnte zudem in Layer 3 aller verwendeten Substrate eine erhöhte Bodenfeuchtigkeit festgestellt werden, was den dort beobachteten, erhöhten Anteil an Feinwurzeln erklärt. Die Ausbildung von Mittel- und Grobwurzeln in Layer 2 und 3 der Substrate höheren Grobmaterial-Anteils, speziell im Substrat 0/63, kann hingegen dessen mechanischen Eigenschaften zugeschrieben werden. Dabei wird angenommen, dass mit zunehmender Kantkorngröße die punktuelle Verteilung der Masse im Substrat zu einer Ausprägung von ebenfalls massereicheren Stabilisationswurzeln bzw. Ankerwurzeln führt. In tieferen Schichten steigert sich dieser Effekt durch den erhöhten Auszugswiderstand. Zudem spielt die Initialbewurzelung der Steckhölzer in rd. 30 cm Tiefe ebenfalls eine Rolle, was in etwa dem Übergang von Layer 2 in Layer 3 entspricht.

Haben die Substrate mit unterschiedlichen Kantkorngrößen Auswirkungen auf das Wurzelwachstum?

In jenen Substratboxen der Kantkornfraktion 0/32 - 16/32 ist bei zunehmender Kantkorngröße durchschnittlich eine leichte Zunahme der Wurzelmasse zu beobachten, wobei hier die Ergebnisse beider Versuche aller drei Erhebungsjahre zusammenfassend betrachtet wurden. Vergleicht man die erhobene Wurzelmasse der beiden 8/32 Substrate, kann mit Zugabe von Stabilisations- bzw. Bindemitteln wie Zement zudem eine Reduktion der Wurzelmassen-Ausbildung erreicht werden. Hinsichtlich der zwei Substrate der Kantkornfraktion 0/63 - 16/63 ist bei zunehmender Kantkorngröße hingegen eine deutliche Zunahme der Wurzelmasse ersichtlich, welche jene der Substrate 0/32 bis 16/32 weit übersteigen. Zudem gestaltet sich die vertikale Verteilung der Biomasse in den verschiedenen Substraten ebenfalls unterschiedlich, kann aber allgemein mit einer Zunahme der Biomasse in tieferen Schichten beschrieben werden. Speziell jedoch in Substraten größerer Kantkornfraktionen (16/32 bzw. 16/63) ist dieser Trend deutlich sichtbarer, wobei der Großteil der darin enthaltenen Wurzelmasse in Layer 2 und 3 enthalten war. Jene massereichen Substrate eignen sich für die Ausbildung von ebenfalls massereichen

Stabilisationswurzeln, welche den oberirdischen Pflanzenteilen den nötigen Halt gegen mechanische Belastungen bietet.

Wie entwickelt sich die Wurzelmasse über den Versuchszeitraum von fünf Vegetationsperioden?

Müllner (2016) beschreibt schon nach einer Vegetationsperiode eine Zunahme der unterirdischen Biomasse in tieferen Schichten. Vor allem in Layer 3 konnte der Großteil der Fein- und Mittelwurzeln ausgemacht werden, wohingegen Grobwurzeln völlig ausblieben. In den Substraten 8/32 sowie 0/63 wurde am meisten Wurzelmasse erhoben, wobei ein Anteil an Mittelwurzeln lediglich in den Substraten 8/32, 16/32 und 0/63 beobachtet wurde und verhältnismäßig gering ausgeprägt war. Jener Trend einer Zunahme der Biomasse in tieferen Schichten setzt sich auch in den letzten beiden Erhebungen 2017 und 2019 fort. Laut Gruber (2017) fällt dabei der Anteil an Feinwurzeln mit Abstand am größten aus und konnte vor allem in Substraten ausgeglichener Anteile an Fein- und Grobmaterial ausgemacht werden. Auch hier blieb die Masse an Grobwurzeln bescheiden, wobei nur rd. 2 g im Substrat 16/32 des Substrat-Versuches erhoben wurden. Einzig in die letzte Erhebung im Jahr 2019 konnte nach fünf Vegetationsperioden ein erhöhter Anteil an Grobwurzeln ermittelt werden, was die Dauer des sekundären Dickenwachstum-Prozesses unterstreicht. Hier wurden jene Wurzeln vor allem in Substraten größerer Kantkornfraktionen erhoben, wobei der mit Abstand größte Anteil im Substrat 16/63 enthalten war.

Mit einer durchschnittlichen Initialbewurzelung in rd. 30 cm Tiefe sowie einem dort beobachteten, erhöhtem Feuchtigkeitsgehalt aufgrund der Barrierewirkung der Geo-Membran und des verdichteten Untergrundes, kann die Zunahme der Wurzelmasse in tieferen Schichten zumindest teilweise erklärt werden. Vor allem die Ausprägung der Feinwurzelanteile in feinkörnigem Material konnte über alle drei Erhebungen hinweg der dort erhöhten Wasserspeicherfähigkeit zugeschrieben werden. Nachdem jedoch lediglich im Jahr 2019 ein vermehrtes Auftreten von Grobwurzeln beobachtet wurde, beziehen sich dementsprechende Schlussfolgerungen auch Großteils auf jene Erhebung, werden aber durch die Ausbildung von Mittelwurzeln in Substraten zunehmender Kantkorngröße bzw. ausgeglichenen Größenfraktionen im Jahr 2015 und 2016 zusätzlich gestärkt. Demnach trifft die Aussage zu, dass mit zunehmender Kantkorngröße auch eine Zunahme der Mittel-Grobwurzeln einhergeht, wobei die Ausbildung massereicher Wurzeln mehrere Vegetationsperioden benötigt. Diese werden von der Pflanze aufgrund reduzierter Feuchtigkeit und nötiger Stützfunktion entsprechend differenziert, wobei mit Feinwurzel bestückte und doch massereiche Mittelwurzeln die Übergangsphase von Fein- zu Grobwurzeln darstellen.

5.2 Ausblick

Nach der abschließenden Analyse aller Ergebnisse wurde ersichtlich, dass die Ausbildung und Differenzierung der Wurzelmasse einer Pflanze gewissen Reizen unterliegt und somit von mehreren Faktoren abhängt. Einerseits fördern Feuchtigkeitsgehalt Wasserspeicherfähigkeit des Substrates den Feinwurzelanteil, wohingegen das Auftreten von massereicheren Mittel- und Grobwurzeln vor allem in grobkörnigem Material zu beobachten ist. Vor allem Substraten größerer Kantkornfraktionen wird mit Zugabe von Bindemittel das Potential zugeschrieben, den Feinwurzelanteil zu vermindern, was wiederum das Auftreten von Mittel- und Grobwurzeln reduziert, welche in jenen Feinwurzeln ihren Ursprung finden. Ohne zusätzliche Präventivmaßnahmen ist es trotzdem nur schwer denkbar, die Penetration von Wurzeln in Wegbauschichten gänzlich zu unterbinden. Eine Kombination unterschiedlicher Maßnahme könnte das Wurzelwachstum jedoch so weit einschränken, dass zumindest über einen längerfristigen Zeitraum keine Belagsschäden eintreten und entsprechend rentable Abstände zwischen den Sanierungsarbeiten gegeben werden.

Trotz der gleichen Ausgangsbedingungen aller drei Erhebungen ist dennoch zu überdenken, ob bei zukünftigen Versuchen eine bessere Standortwahl für die Simulation einer Auwald-Gesellschaft förderlich ist. Vor allem heiße und trockene Sommer können sich negativ auf das Wachstum und die Vitalität gewisser Pflanzen auswirken. Trotz der speziellen Eigenschaften von Pioniergehölzen wie der im gegenständlichen Versuch verwendeten Weiden und Pappeln, stellen jene Standortbedingungen in der Versuchswirtschaft Groß-Enzersdorf, ohne entsprechende Pflegeeingriffe, durchaus eine Herausforderung dar. Besonders das für den Nährstofftransport fehlende Wasser in den oberen Bodenschichten kann das Wachstum der Pflanzen deutlich verringern. Zudem können die durchschnittlich hohen Temperaturen der Sommermonate für Hitzestress sorgen, wobei dieser Effekt durch die reduzierte Transpirationsleistung (Verdunstungsleistung) der Pflanzen noch verstärkt wird. Neben Trockenheit und hohen Temperaturen sorgte zudem vor allem der Moschusbock (Aromia moschata) für eine reduzierter Vitalität und Biomassenproduktion der Pflanzen. Die Ergebnisse sowie entsprechende Aussagen und Empfehlungen dieser Versuchsreihe sind deshalb nur bedingt adaptierbar, tragen jedoch mit Sicherheit zu einem besseren Verständnis zur vorliegenden Problematik bei.

6 Literaturverzeichnis

ALDRICH J. (2005): *Fisher and Regression*. In: *Statistical Science*. Band 20, Nr. 4. Institute of Mathematical Statistics

BECK C. B. (2010): An Introduction to Structure and Development, Plant Anatomy for the Twenty-First Century, 2nd ed. - Cambridge University Press, Cambridge.

BRENNER E. D., STAHLBERG R. et al. (2006): Plant neurobiology: an integrated view of plant signaling. Trends in Plant Science 11 (8), p 413 - 419.

DECKER E. L., FRANK W. et al. (2006): Mossystems Biology en Route: Phytohormones in Physcomitrella Development. Plant Biology 8, 397 - 406.

FLORINETH F. (2012): Pflanze statt Beton - Sichern und Gestalten mit Pflanzen; 2. Auflage. Platzer Verlag Berlin Hannover, 340 Seiten.

GRUBER E. (2017): Development of riparian tree roots in compacted coarse gravel mixtures. Analysis of alternative measures to decrease asphalt damages caused by tree roots. Masterarbeit, Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Department für Bautechnik und Naturgefahren, Universität für Bodenkultur Wien.

HELLERSCHMID A. (2017): Untersuchungen zum Wurzelwachstum von Pappeln und Weiden unter geschlossenen Wegedecken. Bachelor thesis, Institute of Soil Bioengineering and Landscape Construction, Department of Civil Engineering and Natural Hazards, University of Natural Resources and Life Sciences Vienna [in German].

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.

ISEBRANDS J. G., RICHARDSON J. (Eds.) (2014): Poplars and willows: trees for society and the environment. CABI.

JURZITZA, G. (1987): Anatomie der Samenpflanzen. - Thieme, Stuttgart, New York.

KLEINE-VEHN, J. et al. (2019): Cytokinin functions as an asymmetric and anti-gravitropic signal in lateral roots NAT COMMUN. 2019; 10, 3540

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

MÜLLNER M. (2016): Gehölzwurzeln als Schadensverursacher von asphaltierten Wegebelägen: Das Eindringen von Wurzeln in Wegebelägen mit unterschiedlicher Korngrößenverteilung. Masterarbeit, Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Department für Bautechnik und Naturgefahren, Universität für Bodenkultur Wien

MÜLLNER M., WEISSTEINER C. RAUCH, H.P. (2016): Gehölzwurzeln als Schadensverursacher asphaltierter Wege Beläge entlang der Donau-Treppelwege. Endbericht zum Modul 2 des Forschungsprojekts. Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Department für Bautechnik und Naturgefahren, Universität für Bodenkultur Wien

PATT et al. (2009): Naturnaher Wasserbau - Entwicklung und Gestaltung von Fließgewässern; 3. Bearbeitete und aktualisierte Auflage. Springer Verlag, Berlin Heidelberg.

RIS (2016): Bundesgesetz über die Binnenschifffahrt (Schifffahrtsgesetz - SchFG). Online unter:

https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnumme r=10012703, Stand: 06.09.2019.

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.

ROLOFF, A. (2016). Urban tree management: for the sustainable development of green cities. John Wiley & Sons. p 288

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.

STETTLER R.F., ZSUFFA L., WU R. (1996): The role of hybridization in the genetic manipulation of Populus. In: R.F. Stettler et al.: Biology of Populus and its implications for management and conservation. S. 87-112

STEUBING L., FANGMEIER A. (1992): Pflanzenökologisches Praktikum. Ulmer, Stuttgart: 205. In: Traxler, A.: Handbuch des vegetationsökologischen Monitorings, Literaturverzeichnis 86 Methoden, Praxis, angewandte Projekte, Teil A: Methoden. S.126. Umweltbundesamt, Wien.

STRECKENBACH, M. und STÜTZEL T. (2010): Pfahlwurzler, Flachwurzler, Herzwurzler - Wie Substrate die Ausbreitung von Wurzeln beeinflussen. Jahrbuch der Baumpflege 2010. Haymarket Media, Braunschweig.

VIA DONAU - ÖSTERREICHISCHE WASSERSTRASSEN GESELLSCHAFT GMBH (2020a): Treppelwege. Online unter: http://www.viadonau.org/infrastruktur/betrieb-zu-land/treppelwege/, Stand: 23.01.2020

VIA DONAU- ÖSTERREICHISCHE WASSERSTRASSEN GESELLSCHAFT GMBH (2020b): Geschichte. Online unter: http://www.viadonau.org/unternehmen/organisation/geschichte, Stand: 24.01.2020

WEISSTEINER, C., KONZEL, C. (2015): Gehölzwurzeln als Schadensverursacher asphaltierter Wegebeläge an Donau-Treppelwegen. In: Ingenieurbiologie. Mitteilungsblatt für die

Literaturverzeichnis

Mitglieder des Vereins für Ingenieurbiologie, 1/2015, 84-89. Ingenieurbiologie. Neue Entwicklungen an Fließgewässern, Hängen und Böschungen, Wien.

WEISSTEINER, C., RAUCH, H. P. (2015): Gehölzwurzeln als Schadensverursacher asphaltierter Wege-Beläge entlang der Donau-Treppelwege. Endbericht zum Modul 1 des Forschungsprojekts im Auftrag der viadonau. Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Universität für Bodenkultur, Wien.

WELLER F. (1965): Die Ausbreitung der Pflanzenwurzeln im Boden in Abhängigkeit von genetischen und ökologischen Faktoren. Eine Literaturauswertung unter besonderer Berücksichtigung der Obstgehölze. Arbeiten der Landwirtschaftlichen Hochschule Hohenheim. Band 32. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.

Online Quellen:

Österreich: Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (RVS): Online unter:

http://www.fsv.at/cms/start.aspx, Stand: 17.1.2020

ZAMG (2020): Online unter:

http://www.zamg.ac.at/fix/klima/oe71-

00/klima2000/klimadaten oesterreich 1971 frame1.htm, Stand: 20.12.2019

WINRHIZO (2015): Online unter:

http://www.regentinstruments.com/assets/winrhizo about.html, Stand: 23.01.2020.

7 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

ABBILDUNG 1.	ERRICHTUNG DER WEGEAUFBAU-VERSUCHSBOXEN MIT DAZUGEHÖRIGEM PFLANZSTREIFEN, DIE SUBSTRATE WURDEN MIT EISENSTANGEN, MASCHENDRAHT UND KOKOSMATTEN VOM PFLANZSTREIFEN-SUBSTRAT GETRENNT (MÜLLNER, 2016)
ABBILDUNG 2:	A) VERSIEGELUNG DER WEGEAUFBAU-VERSUCHSBOXEN MIT EINER BETONDECKSCHICHT, B) SUBSTRAT-VERSUCHSBOXEN MIT DAZUGEHÖRIGEM PFLANZSTREIFEN (MÜLLNER, 2016) 13
ABBILDUNG 3:	GRUNDRISS UND SCHNITTANSICHT DES SUBSTRAT-VERSUCHES (GRUBER, 2017) 14
ABBILDUNG 4:	SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER VERSUCHSFLÄCHE, WEGEAUFBAUBOXEN UND SUBSTRATBOXEN MIT DAZUGEHÖRIGEM PFLANZSTREIFEN DES JAHRES 2019 SCHWARZ UMRAHMT (GRUBER, 2017)
ABBILDUNG 5:	LUFTTEMPERATURSTATISTIK GROß-ENZERSDORF IM ZEITRAUM 1971 - 2000 MIT T = TAGESMITTEL, MTMAX = MITTEL DER TÄGL. MAXIMA, MTMIN = MITTEL DER TÄGL. MINIMA UND TMAX BZW. TMIN = ABSOLUTES MAXIMUM BZW. MINIMUM (ZAMG, 2020)
ABBILDUNG 6:	NIEDERSCHLAGSSTATISTIK GROß-ENZERSDORF IM ZEITRAUM 1971 - 2000 MIT RSUM = NIEDERSCHLAGSSUMME, RMAX = GRÖßTER TAGESNIEDERSCHLAG, N1 = ZAHL DER TAGE MIT NIEDERSCHLAGSSUMME \geq 1 MM/M 2 UND N10 = ZAHL DER TAGE MIT NIEDERSCHLAGSSUMME \geq 10 MM/M 2 (ZAMG, 2020)
ABBILDUNG 7:	SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER RASTERUNTERTEILUNG; LINKS DIE JENE DES WEGEAUFBAU-VERSUCHES, RECHTS DIE UNTERTEILUNG DES SUBSTRAT-VERSUCHES (GRUBER, 2017)
ABBILDUNG 8:	DREI-DIMENSIONALE UNTERTEILUNG DES PFLANZSTREIFENS UND DER WEGEAUFBAU-BOXEN DES WEGEAUFBAU-VERSUCHES (MÜLLNER, 2016)
ABBILDUNG 9:	BESCHRIFTUNG DER GEHÖLZE NACH RASTEREINHEIT, WOBEI DIE ABKÜRZUNG R FÜR REIHE UND S FÜR SÄULE VERWENDET WURDE (FOTO: ERHARD, 2019)
ABBILDUNG 10:	ERMITTLUNG DER FRISCHEN BIOMASSE DER BLÄTTER EINER PAPPEL (FOTO: ERHARD, 2019) 20
	ENTFERNUNG DER BETONDECKSCHICHT DER WEGEAUFBAU-VERSUCHSBOXEN MIT HILFE EINES GABELAUFSATZES UND VORSCHLAGHAMMERS (FOTO: ERHARD, 2019)
ABBILDUNG 12:	WURZELERNTE DER PFLANZSTREIFEN, ZUR TRENNUNG VON WURZELMASSE UND PFLANZSUBSTRAT WURDEN ANALYSESIEBE UNTERSCHIEDLICHER MASCHENWEITE VERWENDET (FOTO: ERHARD, 2019)
ABBILDUNG 13:	A) VERWENDETER SIEBTURM HAVER UWL 400 UND B) ANALYSESIEB MIT GESIEBTEN SUBSTRATANTEIL (GRUBER, 2017)
ABBILDUNG 14:	A) WURZELSCANNER MIT EINGESETZTEM PLEXIGLASBEHÄLTER UND B) FEINWURZELMASSE IN DESTILLIERTEM WASSER (GRUBER, 2017)
ABBILDUNG 15:	WURZELSYSTEME DIKOTYLER PFLANZEN A) PFAHLWURZLER, B) HERZWURZLER UND C) FLACHWURZLER (ROLOFF, 2016; GRUBER, 2017)
ABBILDUNG 16:	SCHEMATISCHE ÜBERSICHT EINER WURZELSPITZE NACH FUNKTIONSZONEN UND ZELLTYP (BECK, 2010)
ABBILDUNG 17:	QUERSCHNITT EINER DIKOTYLEN WURZEL (MÜLLNER, 2016; HIETZ ET AL. 2009)
ABBILDUNG 18:	WURZELQUERSCHNITT IM SEKUNDÄREN DICKENWACHSTUM (MÜLLNER, 2016; LÜTTGE UND KLUGE, 2012)
ABBILDUNG 19:	GEHÖLZANZAHL UND DEREN VERTEILUNG NACH PFLANZSTREIFEN UND ART, SOWIE ANZAHL DER ABGESTORBENEN TRIEBE (EIGENE BEARBEITUNG, 2019)
ABBILDUNG 20:	VERTEILUNG DER ERHOBENEN BLATTTROCKENMASSE M _{BT} [G] NACH PFLANZSTREIFEN UND GEHÖLZART (EIGENE BEARBEITUNG, 2019)
ABBILDUNG 21:	VERTEILUNG DER STAMMTROCKENMASSE M _{ST} [G] NACH PFLANZSTREIFEN UND GEHÖLZART (EIGENE BEARBEITUNG, 2019)
ABBILDUNG 22:	VERGLEICH DER TROCKEN-BIOMASSENANTEILE M _{TB} [G] NACH BLATT, STAMM UND WURZEL JE PFLANZSTREIFEN (EIGENE BEARBEITUNG, 2019)

ABBILDUNG 23:	LARVE DES MOSCHUSBOCKES (AROMIA MOSCHATA) IM WURZELGEWEBE EINER WEIDE, (FOTO: ERHARD, 2019)41
ADDII DUNG 24.	VERTEILUNG DER ERHOBENEN WURZELMASSE $M_{WT}[G]$ PRO PFLANZSTREIFEN UND
ABBILDUNG 24:	GEHÖLZANZAHL 2019 (EIGENE BEARBEITUNG, 2019)
ABBII DUNG 25	VERTIKALE VERTEILUNG DER WURZELTROCKENMASSE $M_{WT}[G]$ PARAMETER ANGEGEBEN
7.00120011020.	NACH LAYER UND PFLANZSTREIFEN (EIGENE BEARBEITUNG, 2019)
ABBILDUNG 26:	UNTERTEILUNG DER WURZELMASSE M _{WT} [G] NACH DURCHMESSERKLASSEN (FEIN, MITTEL,
	GROB), LAYER UND PFLANZSTREIFEN (EIGENE BEARBEITUNG, 2019)
ABBILDUNG 27:	VERTEILUNG DER WURZELTROCKENMASSE M _{WT} [G] UND ANZAHL AN DAZUGEHÖRIGEN
	GEHÖLZEN PRO WEGEAUFBAU-VERSUCHSBOX BZW. SUBSTRATTYP (EIGENE BEARBEITUNG,
	2019)
ABBILDUNG 28:	VERTIKALE VERTEILUNG DER WURZELMASSE M _{WT} [G] DES WEGEAUFBAU-VERSUCHES PRO
ADDII DUNG 20.	SUBSTRATTYP (EIGENE BEARBEITUNG, 2019)
ABBILDUNG 29:	VERTEILUNG DER WURZELTROCKENMASSE M _{WT} [G] NACH DURCHMESSERKLASSE (FEIN, MITTEL, GROB) UND SUBSTRATTYP (EIGENE BEARBEITUNG, 2019)
ADDII DUNG 20.	
ARRITHONG 30:	VERTIKALE VERTEILUNG DER WURZELTROCKENMASSE M _{WT} [G] NACH DURCHMESSERKLASSEN
ADDII DUNG 31.	(FEIN, MITTEL, GROB) UND LAYER (EIGENE BEARBEITUNG, 2019)
ARRITHOURG 31:	VERTIKALE VERTEILUNG DER RELATIVEN WURZELTROCKENMASSE M _{PS} / M _{WB} NACH LAYER
ADDII DUNG 22.	UND SUBSTRATTYP (EIGENE BEARBEITUNG, 2019)
ABBILDUNG 32:	VERTEILUNG DER WURZELTROCKENMASSE M _{WT} [G] UND DIE ANZAHL DER DAZUGEHÖRIGEN
ADDII DUNG 22.	GEHÖLZE PRO SUBSTRAT-VERSUCHSBOX (EIGENE BEARBEITUNG, 2019)
ARRILDONG 33:	VERTIKALE VERTEILUNG DER WURZELTROCKENMASSE M _{WT} [G] PRO SUBSTRAT- VERSUCHSBOX (EIGENE BEARBEITUNG, 2019)
APPILDLING 24.	VERTEILUNG DER WURZELTROCKENMASSE M _{WT} [G] NACH DURCHMESSERKLASSEN (FEIN,
ABBILDUNG 34.	MITTEL, GROB) UND SUBSTRATTYP (EIGENE BEARBEITUNG, 2019)
VBBII DLING 32.	VERTIKALE VERTEILUNG DER WURZELTROCKENMASSE $M_{WT}[G]$ NACH DURCHMESSERKLASSEN
ABBILDONG 33.	(FEIN, MITTEL, GROB) UND LAYER (EIGENE BEARBEITUNG, 2019)
VBBII DLING 36.	RELATIVE WURZELTROCKENMASSE M _{SB} / M _{PS} NACH LAYER UND SUBSTRATTYP (EIGENE
ABBIEDONG 30.	BEARBEITUNG, 2019)
ARRII DI ING 37	LINEARE REGRESSION DER WURZELDURCHMESSER-KLASSEN DES WEGEAUFBAU-VERSUCHES,
ADDIEDONG 37.	UNTERTEILT IN FEIN- UND MITTELWURZELN SOWIE FEIN- UND GROBWUZELN (EIGENE
	BEARBEITUNG, 2019)
ABBII DUNG 38:	LÄNGENANTEIL DER WURZELTROCKENMASSE NACH DURCHMESSERKLASSE UND
,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	WEGEAUFBAU-VERSUCHSBOX BZW. SUBSTRATTYP (EIGENE BEARBEITUNG, 2019)
ABBILDUNG 39:	VERTIKALE VERTEILUNG DER WURZELLÄNGEN-ANTEILE NACH LAYER UND SUBSTRATTYP
	(EIGENE BEARBEITUNG, 2019)
ABBILDUNG 40:	ERGEBNIS DER SIEBANALYSE DES SUBSTRATES 0/32 NACH KORNGRÖßE UND PROZENTANTEIL
	58
ABBILDUNG 41:	ERGEBNIS DER SIEBANALYSE DES SUBSTRATES 0/63 NACH KORNGRÖßE UND PROZENTANTEIL
	59
ABBILDUNG 42:	OBERIRDISCHE (M _{OB} [G]) UND UNTERIRDISCHE (M _{UB} [G]) BIOMASSENENTWICKLUNG ÜBER
A D D U D U D C 42	DEN GESAMTEN VERSUCHSZEITRAUM VON 2015 - 2019
ABBILDUNG 43:	VERGLEICH DER WURZELTROCKENMASSE M _{WT} [G] JE WEGEAUFBAU-VERSUCHSBOX BZW.
ADDII DUNG 44.	SUBSTRATGEMISCH UND ERHEBUNGSJAHR (
ABBILDUNG 44:	VERGLEICH DER WURZELTROCKENMASSE M _{WT} [G] JE SUBSTRATGEMISCH UND
ADDITOLING 4E	ERHEBUNGSJAHR, MIT AUSSCHLUSS VON LAYER DREI
ADBILDUNG 45:	VERTIKALE VERTEILUNG DER JEWEILS ERHOBENEN WURZELTROCKENMASSE M _{WT} [G] NACH
ADDITOLING 46.	LAYER UND ERHEBUNGSJAHR (MÜLLNER, 2016; GRUBER, 2017)
ADDILDUNG 46:	VERGLEICH DER WURZELTROCKENMASSE M_{WT} [G] NACH SUBSTRAT-VERSUCHSBOXEN BZW. SUBSTRATGEMISCH UND ERHEBUNGSZEITRAUM ()

ABBILDUNG 47:	VERGLEICH DER WURZELTROCKENMASSE M_{WT} [G] JE SUBSTRATGEMISCH UND	
	ERHEBUNGSJAHR, MIT AUSSCHLUSS VON LAYER DREI (MÜLLER, 2016; GRUBER, 2017)	67
ABBILDUNG 48:	VERTIKALE VERTEILUNG DER WURZELTROCKENMASSE M_{WT} [G] NACH LAYER UND	
	ERHEBUNGSJAHR (MÜLLER, 2016; GRUBER, 2017)	68
ABBILDUNG 49:	VERTIKALE VERTEILUNG DER WURZELBIOMASSE $M_{WT}\left[G\right]$ ALLER DREI ERHEBUNGSJAHRE	
	NACH LAYER (1, 2 UND 3) IN DEN EINZELNEN SUBSTRATEN (MÜLLNER, 2016; GRUBER, 20	17)
		69
TABELLE 1:	KORNGRÖßENANTEILE (%) DER SIEBANALYSE DES SUBSTRATES 0/32	58
TABELLE 2:	KORNGRÖßENANTEILE (%) DER SIEBANALYSE DES SUBSTRATES 08/32	59

8 Anhang

I. Oberirdische Biomasse

In den folgenden zwei Tabellen wurden die Daten der oberirdischen Trockenbiomasse pro Gehölzart und Pflanzstreifen zusammengefasst. Diese gliedern sich in Gehölzanzahl, Hauptund Nebentriebe, den durchschnittlichen Durchmesser sowie die Stamm- und Blattmasse.

<u>Pappel</u>

	PS1	PS2	PS3	PS4	PS5	PS6	PS7-9	PS10-12
Gehölzanzahl	3	3	1	2	2	2	0	3
Haupttriebe	3	3	1	2	2	2	0	3
Nebentriebe	132	56	14	88	95	58	0	135
Ø mm	60	28,5	20	44	33,3	36	0	63
Stammmasse [g]	15.190	1.527	83	9.164	3.543	1.646	0	11.612
Blattmasse [g]	2.846	339	29	1.174	1.309	677	0	3.393

Weide

	PS1	PS2	PS3	PS4	PS5	PS6	PS7-9	PS10-12
Gehölzanzahl	4	6	8	12	7	8	12	11
Haupttriebe	6	12	15	23	16	12	20	18
Nebentriebe	81	178	303	483	210	202	367	269
Ø mm	33,75	30,6	23,31	41,25	21,9	21	23,27	21,37
Stammmasse [g]	1.912	2.045	5.216	16.736	3.611	3.126	5.998	4.690
Blattmasse [g]	80	97	284	1.628	175	254	408	225

II. Unterirdische Biomasse

Anhang II. stellt die Zusammenfassung der unterirdischen Biomasse pro Substrat und Versuch dar. Diese veranschaulicht den jeweiligen Anteil an Fein-, Mittel- und Grobwurzeln sowie die vertikale Verteilung der Wurzelmasse in den jeweiligen Versuchsboxen WB 1-6 und SB 7-30. Die Wurzelmasse wurde auf Gramm (g) gewogen.

Wurzelmasse Wegeaufbau-Versuch

WB1	F	М	G
L1	29,4	32,9	27
L2	45,2	0	0

L3	71,1	10,7	0
Summe	145,7	43,6	27

WB2	F	М	G
L1	26,7	0	0
L2	51,2	7,7	6,2
L3	61,1	1,7	23,5
Summe	139	9,4	29,7

WB3	F	М	G
L1	14	0	0
L2	68,1	0,8	0
L3	43,5	17,7	13,5
Summe	125,6	18,5	13,5

WB4	F	М	G
L1	76,6	20,7	0
L2	57,4	0	0
L3	40,9	17,5	0
Summe	174,9	38,2	0

WB5	F	М	G
L1	28,7	0	0
L2	33,4	2,1	0
L3	56,4	16,8	155,8
Summe	118,5	18,9	155,8

WB6	F	М	G
L1	25,7	20,4	34,1
L2	21,7	5	0
L3	15	32,6	13,2
Summe	62,4	25,4	47,3

Wurzelmasse Substrat-Versuch

SB7	F	M	G
L1	14,3	3,2	12,3
L2	29	8,8	0
L3	6,8	5	6
Summe	50,1	17	18,3

SB8	F	М	G
L1	8,7	3,5	0
L2	48,3	10,5	0
L3	25,3	7,3	0

Anhang

Summe	82,3	21,3	0
SB9	F	М	G
L1	15,2	0	0
L2	51,9	3	0
L3	17,8	0	0
Summe	84,9	3	0
SB10	F	М	G
L1	23,4	0	0
L2	20,8	16,8	0
L3	15,3	7	0
Summe	59,5	23,8	0
SB11	F	М	G
L1	18,9	0	0
L2	46	12,1	0
L3	55,7	21,6	32,8
Summe	120,6	33,7	32,8
SB12	F	M	G
L1	35,9	2,3	0
L2	11,3	5,3	8,7
L3	23,4	15,3	8
Summe	70,6	22,9	16,7
SB25	F	M	G
L1	25,4	7,4	0
L2	21,5	0	0
L3	23,2	0,7	7,6
Summe	70,1	8,1	7,6
SB26	F	M	G
L1	12,3	4,6	0
L2	78	13,3	10,7
L3	54,1	20,2	0
Summe	144,4	38,1	10,7
CDOT	-		
SB27	F 4.7	M	G
L1	4,7	0	0
L2	27,9	0	0
L3	14,4	8,6	0
Summe	47	8,6	0
CD20	Г	N.4	6
SB28	F	M	G

Summe	106,5	29,2	60,3
L3	38,7	20,2	4,7
L2	33,4	9	55,6
L1	34,4	0	0

SB29	F	М	G
L1	43,3	0,5	0
L2	66,4	14,3	0
L3	9,6	8,3	0
Summe	119,3	23,1	0

SB30	F	М	G
L1	22,4	7,9	0
L2	7,8	0,5	0
L3	9,6	8,3	15
Summe	39,8	16,7	15

9 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."