



Universität für Bodenkultur Wien
University of Natural Resources
and Life Sciences, Vienna

Masterarbeit

Vergleich der Biomasse und Wurzelarchitekturen von *Lolium perenne* und *Anthyllis vulneraria* auf Bauschuttsubstrat

verfasst von

Mirjam BLECHA, B.Sc.

im Rahmen des Masterstudiums

Landschaftsplanung und Landschaftsarchitektur

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieurin

Wien, 26.07.2021

Betreut von:

Univ.Prof.ⁱⁿ DIⁱⁿ Dr.ⁱⁿ Rosemarie Stangl

Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau

Department für Bautechnik und Naturgefahren

Mitbetreuung:

DIⁱⁿ Pia Minixhofer

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

„Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt habe. Es wurden keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Formulierungen und Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Diese schriftliche Arbeit wurde noch an keiner Stelle vorgelegt.“ (UNIVERSITÄT FÜR BODELKULTUR 2021)

Datum

Unterschrift

Danksagung

Danke an alle, die mir bei der Erstellung dieser Arbeit geholfen haben: Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Rosemarie Stangl und Dipl.-Ing. Pia Minixhofer. Danke auch an meinen besten Freund Mathias Flieder, B.Sc., M.Sc. und meiner Mutter Mag. Ulrike Zeinzinger fürs mehrmalige Korrekturlesen.

Ein besonders großes Danke geht an meinen Mann Markus Blecha, B.Sc., für seine unendliche Geduld und der Hilfe beim Entwickeln einer neuen Methode. Außerdem möchte ich einer sehr wichtigen Person in meinem Leben Danken: meine Großmutter Eva Prünster, deretwegen ich überhaupt erst maturiert und somit den Weg auf die Uni eingeschlagen habe.

„Die Angst zu fallen ist groß - doch der Wille ist größer.“

(PIZZERA und JAUS 2017)

Zusammenfassung

Bauschuttsubstrat kann als wiederverwertbares Gut für ingenieurbioologische Anwendungen wie Begrünungen oder als Schütt- und Füllmaterial von Böschungen verwendet werden. Zur Begrünung eignen sich ingenieurbioologisch relevante Pflanzenarten, wie beispielsweise *Lolium perenne* oder *Anthyllis vulneraria*.

Um eine sinnvolle Weiterverwendung und eine maximale Nutzung des Bauschuttrohstoffs zu eruieren, wurde in dieser Arbeit die ober- und unterirdische Biomasse der genannten Arten auf einem hierfür angemischten Recycling-Material-Hochbau-Substrat (RMH-Substrat) untersucht.

Punktsaat und Streusaat wurden als Ansaatmethoden in einem Feldexperiment in Groß-Enzersdorf (Niederösterreich) gewählt. Die Forschungsfragen beschäftigen sich einerseits mit der Ansaatmethode und den Unterschieden in der Biomasseentwicklung, andererseits mit der Wurzelarchitektur von *Lolium perenne* und *Anthyllis vulneraria* im Vergleich zu Aufzeichnungen aus der Literatur auf natürlichem Boden. Weiters wurde auch eine neue Screening-Methode zur Erfassung der Wurzelstrukturen mittels des Programms PyCharm entwickelt. Die per Profilgrabungen analog erfassten Wurzelarchitekturen wurden digitalisiert, und nachfolgend wurde der Durchwurzelungsgrad berechnet.

Durch die Beschaffenheit des Bauschuttsubstrates und einer beim Aufbau des Versuchs absichtlich herbeigeführten Verdichtung ab 20 cm Tiefe (Schotterrasen-Aufbau), war eine Abweichung der Wurzelbilder im Vergleich zu natürlichem Boden zu beobachten. Bei *Lolium perenne* (Durchwurzelungsgrad: 12,72%) wurde ein zusätzlicher Wurzelzylinder unterhalb der eigentlichen „Zylinder-, verkehrten Kegelform“ ausgebildet. Bei *Anthyllis vulneraria* (Durchwurzelungsgrad: 12,59%) waren vermehrt Wurzelhaare zu beobachten, als es aus Beispielen aus der Literatur zu erwarten gewesen wäre. Die Wurzeln beider Arten hielten die Grobskelette des Bauschuttsubstrates effizient zurück. Substratbereiche ohne diesen Wurzelhalt waren sehr lose.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass sich Wurzelformen unter bestimmten anthropogenen Einflüssen, wie etwa verdichtete Schichten von Bauschuttsubstrat, verändern können. Die Grobskelette im RMH-Substrat konnten durch die Wurzeln von *Lolium perenne* und *Anthyllis vulneraria* effizient zurückgehalten werden.

Abstract

Construction waste can be used for soil bioengineering applications, such as revegetation or slope construction and backfill. Suitable for revegetation purpose are plants that can be used for soil bioengineering, such as *Lolium perenne* and *Anthyllis vulneraria*.

This thesis is investigated above and belowground biomass production of *Lolium perenne* and *Anthyllis vulneraria*, with focus on root architecture, for re-use of construction waste.

A field experiment was conducted in Groß-Enzersdorf, Lower Austria. Two different sowing methods using *Lolium perenne* and *Anthyllis vulneraria* were applied and above- and belowground biomass were mapped. Research questions were defined regarding sowing methods and the root architecture of both species growing on a two-layered compacted soil intermingled with construction waste. A screening method using PyCharm was developed in this work in order to compare the root architecture of plants.

Hand drawn root architectures were digitized and the ratio of root coverage against the background was calculated using PyCharm. The observations revealed that *Lolium perenne* (root ratio: 12,72%) shifted its root shape from a cylindrical inverted cone shape to a cylindrical inverted cone shape with an additional cylinder underneath, when growing on a compressed, two-layered technical soil. This root re-arrangement was characterized by starting at the compressed zone at about 20 cm below the surface. *Anthyllis vulneraria* (rooting ratio: 12.59%) had more root hairs than would have been expected from examples in the literature.

The density of roots can change, i.e., increase when encountering impenetrable materials, like rocks, or compressed soil layers. In summary the mainly loose construction waste-based soil affected the anchor of the root system, and the growth characteristics changed. The roots of both species efficiently retained the coarse skeletons of the construction waste. Substrate areas without this root retention were very loose.

Differences in the shape of the root system from plants grown under anthropogenically altered environments, like construction waste, were determined. The roots of *Lolium perenne* and *Anthyllis vulneraria* effectively strengthened the coarse materials of the construction waste compared to volumes without plant growth.

Inhalt

1.	Einleitung.....	8
2.	Arbeitsziele, Forschungsfragen und Hypothesen.....	10
3.	Grundlagen und Experimentelle Herangehensweise.....	12
3.1.	Grundlagen.....	12
3.1.1.	Saatmaterial.....	12
3.1.2.	Wurzelformen.....	14
3.1.3.	Wurzelformen: <i>Lolium perenne</i>	14
3.1.4.	Wurzelformen: <i>Anthyllis vulneraria</i>	16
3.1.5.	Substrat.....	17
3.2.	Experimentelle Herangehensweise.....	19
3.2.1.	Versuchsort.....	19
3.2.2.	Aufbau der Versuchsbeete.....	20
3.2.4.	Saatmethode.....	25
3.2.5.	Streusaat.....	26
3.2.6.	Punktsaat.....	26
4.	Methodik und Arbeitsweisen.....	27
4.1.	Untersuchungen zur oberirdischen Biomasse.....	27
4.1.1.	Oberirdische Biomasse (OB1) – Deckungsgrad.....	27
4.1.2.	Oberirdische Biomasse (OB2) – Vergleich der Trockenbiomasse.....	29
4.2.	Untersuchungen zur unterirdischen Biomasse.....	31
4.2.1.	Material und Werkzeug für die Wurzelarbeiten.....	31
4.2.2.	Unterirdische Biomasse (UB3) - Erhebung der Wurzelrockenmasse.....	33
4.2.3.	Unterirdische Biomasse (UB4) – Analoge Erfassung der Wurzelarchitektur.....	35
4.2.4.	Unterirdische Biomasse (UB5) - Digitale Erfassung der Wurzelarchitektur mittels PyCharm.....	37
4.2.5.	Erfassung der Wurzeltiefen.....	39
4.2.6.	Unterirdische Biomasse (UB6) - Scherfestigkeit.....	40
4.3.	Statistik.....	41
4.3.1.	R-Studio: Entwicklungsumgebung für die Statistik.....	41
4.3.2.	Markdown: vereinfachte Auszeichnungssprache in R-Studio.....	42
4.3.3.	Zweiseitiger t-Test.....	42
4.3.4.	Multiple ANOVA.....	42
5.	Resultate.....	44
5.1.	Oberirdische Biomasse Resultate.....	44
5.1.1.	Oberirdische Biomasse (OB1) - Deckungsgrad.....	44

5.1.2. Oberirdische Biomasse (OB2) - Vergleich getrockneter Biomasse im Gewicht	46
5.2. Unterirdische Biomasse Resultate	50
5.2.1. Unterirdische Biomasse (UB3) - Wurzelgewicht anhand von Bodenproben	50
5.2.2. Unterirdische Biomasse (UB4) - Wurzelarchitektur (analoge Auswertung).....	51
5.2.2.1. Vergleich A - Vergleich der Wurzelbilder (analoge Darstellung) und Wurzelbilder aus der Literatur bezüglich der Wuchsform.....	52
5.2.2.2. Vergleich B - Vergleich von einzelnen Sequenzen der gezeichneten Wurzeln mit Wurzelbildern aus der Literatur	55
5.2.2.3. Vergleich C - Vergleich der Wurzelbilder: Punktsaatbeet vs. Streusaatbeet	56
.....	57
5.2.3. Unterirdische Biomasse (UB5) - Wurzelarchitektur (digitale Auswertung)	57
5.2.4. Wurzeltiefe	60
5.2.4. Unterirdische Biomasse (UB6) – Scherfestigkeit.....	60
6. Diskussion.....	62
6.1. Forschungsfrage F1: Oberirdische und unterirdische Biomasseproduktion	63
6.1.1. Oberirdische Biomasse	63
6.1.2. Unterirdische Biomasse.....	65
6.2. Forschungsfragen zur Wurzelarchitektur (F2 und F3).....	67
6.2.1. Forschungsfrage F2: Wurzelarchitektur <i>Anthyllis vulneraria</i>	69
6.2.2. Forschungsfrage F3: Wurzelarchitektur <i>Lolium perenne</i>	70
6.2.3. Auswirkungen auf die Stabilität des Substrates.....	71
6.3. Reflexion zur Methodik und Empfehlungen.....	73
6.3.1. Forschungsfrage F1: oberirdische Biomasse	73
6.3.2. Forschungsfrage F1: unterirdische Biomasse.....	73
6.3.3. Forschungsfragen F2/F3: Wurzelarchitekturen.....	73
7. Schlussfolgerung.....	76
7.1. Ausblick.....	78
8. Referenzen.....	79
9. Abbildungs- und Tabellenverzeichnis.....	83
10. Anhang.....	85

1. Einleitung

Vegetation ist von essenzieller Bedeutung für die Stabilität von Böden. Die Morphologie der Pflanze unterscheidet folgende zwei Grundorgane: den Spross und die Wurzel. Wurzelsysteme dienen unter anderem als Verankerung im Boden (SEIPEL 2007, S.8-10). Die Beschaffenheiten von Wurzel und Substrat tragen zum Erosionsschutz bei. Einige Pflanzenarten eignen sich aufgrund ihrer Eigenschaften wie etwa der Scherfestigkeit oder der Trockenheitsresistenz sehr gut für ingenieurbioologische Maßnahmen zur Hangsicherung. FLORINETH (2012, S.226-228) beschreibt eine Liste von Arten für unterschiedliche Standorte und Zwecke wie beispielsweise für Böschungssicherungen für hohe oder niedere Lagen oder verschiedene Böden wie alkalisch oder sauer. Zwei dieser Arten wurden aufgrund der Tatsache, dass sie bei den meisten Saatgutmischungen für ingenieurbioologische Zwecke verwendet werden, für diese Arbeit ausgewählt: *Lolium perenne* und *Anthyllis vulneraria*.

Beide Arten können für die Sicherung von Bodenschichten, wie etwa Begrünungsmaßnahmen durch Schotterrasenmischungen, oder in steilen Lagen zur Hang- und Böschungssicherung auf niederen und alkalischen Lagen verwendet werden. *Lolium perenne* findet auch in Sport- und Gebrauchsrasenmischungen wie Golfplätzen Verwendung. In der Ingenieurbioologie kann *Lolium* auch in Waldböschungsmischungen für steile Böschungen und hohen, schattigen Lagen sowie sauren Lagen mit und ohne Folgebepflanzung im Saatgut verwendet werden. *Anthyllis vulneraria* wird zudem auch an kurz bleibenden Flussböschungsmischungen mit alkalischen Böden eingesetzt (FLORINETH 2012, S.235; 238).

Auch die Ansaatmethode spielt hierbei eine zentrale Rolle. Als Punktsaat oder Einzelkornablage wird eine besondere Methode der Reihensaat beschrieben, bei der das Saatgut als einzelnes Korn innerhalb einer Reihe in einem gleichmäßigen Abstand zueinander per Hand ausgesät wird (JANSEN et.al. 1998, S.232). Die Breitsaat oder Streusaat beschreibt eine gleichmäßige Verteilung des Saatgutes durch z.B. händisches Auswerfen. Die Breitsaat hat den Vorteil einer besseren Standardraumverteilung gegenüber der Punktsaat (JANSEN et.al. 1998, S.233).

Vegetation spielt insofern eine wichtige Rolle, da durch die Wurzelstrukturen eine stabilisierende Wirkung auf den Boden ausgeübt wird. Dies wurde auf äolischem Sand und Sanddünen beschrieben (GLENNIE und EVAMY 1967). Ein Vergleich von sandigen Böden mit

sandig-lehmigen Böden und schluffig-lehmigen Böden legt nahe, dass vor allem faserförmige Wurzeln (vergleiche Kapitel 4.10. Wurzelformen) sehr effektiv sind, Erosionsraten in sandigen Böden zu vermindern (VANNOPPEN et.al. 2017). Wurzeln passen sich aber auch an ihre Umwelt an, so sind Wurzelarchitekturen je nach Vorhandensein unterschiedlicher Nährstoffe anders ausgeprägt (WHITE et.al. 2013). Sandige Böden lassen sich aufgrund ihrer lockeren Struktur am ehesten mit Bauschutt vergleichen. Jedoch ist zu beachten, dass Sand in der Einteilung der Korn-Fraktionen mit 2 mm – 0,063 mm als Feinboden eingeordnet wird (BLUM 2007, S.48). Das im Versuch verwendete Bauschuttsubstrat Recyclingmaterial Hochbau (siehe Kapitel 3.1.5) ist deutlich grobkörniger.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Biomasseproduktion von ingenieurbiologisch relevanten Pflanzen auf Bauschutt (RMH-Substrat). Hierfür wurden zwei Pflanzenarten, eine aus der Familie der Süßgräser (*Lolium perenne*) und eine aus der Familie der Hülsenfrüchtler (*Anthyllis vulneraria*), als Versuchspflanzen eingesetzt. Mit Hilfe unterschiedlicher Aussaatmethoden wurde untersucht, welche Auswirkungen diese auf die ober- und unterirdische Biomasseproduktion haben. Ein weiterer Forschungsfokus lag auf der Erfassung der Wurzelarchitekturen, welche sowohl analog als auch digital erfasst und ausgewertet wurde. Abschließend wird noch die Auswirkung der Durchwurzelung auf die Stabilität des Bauschuttsubstrates (RMH-Substrat) diskutiert.

2. Arbeitsziele, Forschungsfragen und Hypothesen

Das Ziel dieser Masterarbeit ist die Untersuchung und Dokumentation der ober- und unterirdischen Biomasse der ausgewählten ingenieurbologisch relevanten Pflanzenarten *Lolium perenne* und *Anthyllis vulneraria* auf Bauschuttsubstrat Recyclingmaterial Hochbau (RMH; 0/32, 0/64, Kompost 10 Vol-%). Diese beiden Arten werden häufig für ingenieurbioologische und vegetationstechnische Zwecke in Saatgutmischungen verwendet (FLORINETH 2012, S.49, 71, 72) . Durch diese Arbeit wird eine bessere Verständlichkeit von Wurzelarchitekturen und Synergien sowie das Erkennen von Zusammenhängen zwischen ober- und unterirdischer Biomasse erwartet. Folgende Forschungsfragen wurden im Zuge dieser Arbeit aufgestellt:

- F1 Ist die unterirdische und oberirdische Biomasseproduktion bei einer Streusaat höher als bei einer Punktsaat?
- F2 Lassen sich aufgrund des RMH-Substrates in der Wurzelarchitektur von *Anthyllis vulneraria* im Streusaatbeet Unterschiede zu *Anthyllis vulneraria* auf natürlichem Substrat (nach SOBOTIK 2020) erkennen?
- F3 Lassen sich aufgrund des RMH-Substrates in der Wurzelarchitektur von *Lolium perenne* Unterschiede zu *Lolium perenne* auf natürlichem Substrat (nach der Methode von KUTSCHERA 1960) erkennen?

Folgende Hypothesen werden aufgrund der Forschungsfragen in dieser Arbeit bearbeitet:

- H 1.1 Die oberirdische Biomasseproduktion ist bei einer Streusaat mit *Anthyllis vulneraria* und *Lolium perenne* höher als bei einer Punktsaat mit *Lolium perenne*.
- H 1.2 Die unterirdische Biomasseproduktion ist bei einer Streusaat mit *Anthyllis vulneraria* und *Lolium perenne* höher als bei einer Punktsaat mit *Lolium perenne*.
- H 2 Die Wurzelarchitektur von *Lolium perenne* hebt sich in Bezug auf das Wuchsverhalten auf RMH-Substrat von den Wurzelarchitekturen auf

natürlichem Substrat nach KUTSCHERA (1960) ab. Erwartet wird aufgrund der Grobkörnigkeit des RMH-Substrates eine weniger dichte Wuchsform.

H 3 Die Wurzelarchitektur von *Anthyllis vulneraria* hebt sich in Bezug auf das Wuchsverhalten auf RMH-Substrat, von den Wurzelarchitekturen auf natürlichem Substrat nach SOBOTIK (2020) ab. Erwartet wird auch hier eine weniger dichte Wuchsform auf RMH-Substrat.

Eine Übersicht aller Versuche inklusive Zuordnungen der Hypothesen und Forschungsfragen sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Zuordnung aller Methoden und Ergebnisse dieser Arbeit, eigene Erstellung

	Codierung	Versuch	Zuordnung Forschungsfragen	Zuordnung Hypothesen	Kapitel Methode	Kapitel Ergebnisse
oberirdische Biomasse (OB)	OB1	Deckungsverhältnis	F1	H1.1	4.1.1.	5.1.1.
	OB2	Vergleich der Trockenbiomasse	F1	H1.1	4.1.2.	5.1.2.
unterirdische Biomasse (UB)	UB3	Erhebung der Wurzeltrockenmasse	F1	H1.2	4.2.2.	5.2.1.
	UB4	Analoge Wurzelarchitektur	F2, F3	H1.2, H2, H3	4.2.3.	5.2.2.
	UB5	Digitale Wurzelarchitektur mittels PyCharm	F1	H1.2	4.2.4.	5.2.3.
	UB6	Scherfestigkeit	Zusatz	Zusatz	4.2.6.	5.2.4.

3. Grundlagen und Experimentelle Herangehensweise

3.1. Grundlagen

3.1.1. Saatmaterial

Im Zuge dieser Masterarbeit wurden eine Grasart und eine Kräuter/Leguminosen Art für die Begrünung der Versuchsbeete ausgewählt: *Lolium perenne* und *Anthyllis vulneraria*.

Lolium perenne

Botanischer Name: *Lolium perenne*

Deutscher Name: Deutsches Weidelgras, englisches Weidelgras, Lolch

Familie: Poaceae

Herkunft: Europa, Kaukasus, Zypern, Syrien, Libanon, Palästina, Irak, Iran, N.-Afrika, Kanarische Inseln, Madeira, Türkei

Wuchsform: Gras, Mehrjährig, Horstbildend, Ausläufer bildend, 20 cm – 60 cm Höhe, unbegrant

Standort: Gemäßigtes Klima, Tiefland bis 1500 m

Blüte: VI – X, unscheinbar

Besonderheit: Nutzpflanze im Grünland, Eignung für stark beanspruchte Flächen durch hohe Leistungsfähigkeit, wichtigstes Weidegras in Mitteleuropa, Trittrasen, wichtiger Bestandteil von Rasensaaten

(ERHARDT et.al. 2008, S.1524; BURNIE et.al. 2003, S.539; SCHWELGER 2011, S.142; FISCHER et.al. 2008, S.1165)



Abbildung 1: *Lolium perenne*, eigene Aufnahme 2019

Lolium perenne ist eines der wichtigsten Gräser für intensive Weidennutzung in Mitteleuropa und kommt bevorzugt in *Lolium-Trifolium repens* Weiden vor (SOBOTIK et al., 2020, S.249). In mittleren bis milden Lagen beheimatet ist *L. perenne* ein stark leistungsfähiges Gras, welches Ausläufer treibt (WALDAUER 2007, S.56). Für die Landwirtschaft ist das Deutsche Weidelgras die wichtigste Grasart für Wiesen, Weiden und Ackerfutterbau (MIELKE and WOHLERS 2016, S.47).

Als niederwüchsiges, ganzjährig grünes und trittfestes Gras ist das deutsche Weidelgras vor allem in Weiden des wintermilden und küstennahen Klimabereichs zu finden (HUTTER et al. 2002, S.62). Die Verbreitungsgrenze bezogen auf die Höhenzone liegt bei 600 m ü.NN. In Österreich wird das Gras vor allem im niederschlagsreichen Alpenvorland angetroffen, da *Lolium perenne* auf eine hohe Niederschlagsmenge, oder einer anderen Wasserzufuhr wie einem hohen Grundwasserstand angewiesen ist (HUTTER et al. 2002, S.62).

Lolium perenne ist ein Untergras mit einem sehr hohen Futterwert von 9 (Futterwert: 1 = giftig bis 9 = sehr wertvoll) und zeichnet sich besonders durch eine hohe Trittfestigkeit und ein gutes Nachwuchsvermögen nach der Mahd aus (MIELKE and WOHLERS 2016, S.50). Empfindlichkeiten sind gegenüber Kahlfrost, Spätfrost und lang andauernder Schneebedeckung zu erwähnen, da diese Pilzkrankheiten oder Auswinterung hervorrufen können (MIELKE and WOHLERS 2016, S.50). In der Vegetationstechnik ist *Lolium perenne* wegen seiner Schnellwüchsigkeit und dem damit verbundenen sofortigen Schutz für rohe Böden sehr geschätzt (FLORINETH 2012, S.49). Als Obergrenze gibt FLORINETH (2012, S.50) für *Lolium perenne* einen maximalen Gewichtsanteil von 5 % in einer Saatgutmischung für Wiesen-, Weide- oder Blumenrasenmischungen an. Dies wird mit der stark verdrängenden Eigenschaft des Raygrases erklärt. Das Tausendkorngewicht von *Lolium perenne* liegt bei 2,00 g (FLORINETH 2012, S.52).

Anthyllis vulneraria

Botanischer Name: *Anthyllis vulneraria*
(syn. *Vulneraria heterophylla*)

Deutscher Name: Gewöhnlicher Wundklee, Tannenklee, Katzenprankerl

Familie: Fabaceae

Herkunft: Europa, Syrien, Palästina, N.-Afrika, Äthiopien, Türkei

Wuchsform: krautig, mehrjährig, kurzlebig, Staude mit kurzem Rhizom

Standort: Magerrasen, Straßenränder, Ödland

Blüte: V -VI, gelb, orange, rot, rosa

Besonderheit: Nutzpflanze, Arzneipflanze bei offenen Wunden, Entzündungen im Mund und Rachenraum, Leguminose

Winterhärtezone: Z7 (-17,7°C bis -12,3°C)

(ERHARDT et.al. 2008, S.1209; BURNIE et.al. 2003, S.99; FISCHER et.al. 2008, S.583; HENSEL 2007, S.199)

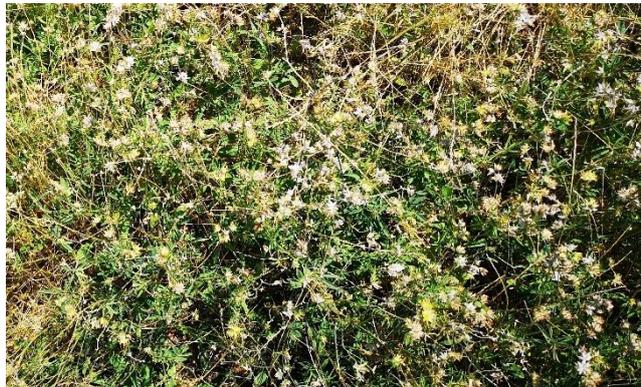


Abbildung 2: *Anthyllis vulneraria*, eigene Aufnahme, 2019

Anthyllis vulneraria ist eine charakteristische Pflanze für einen Kalk-Trocken- und Halbtrockenrasen mit flachgründigen, kalkhaltigen und trockenen Böden (HUTTER et.al. 2002, S.92). Im Gegensatz zu *Lolium perenne* bevorzugt der gewöhnliche Wundklee grundwasserfreie, flachgründige Standorte, welche in ganz Mitteleuropa zu finden sind (HUTTER et al. 2002, S.92). Das Tausendkorngewicht vom Wundklee liegt bei 2,50 g

(FLORINETH 2012, S.52). *Anthyllis vulneraria* ist in Wiesenmischungen für trockene, alkalische, niedrige und hohe Lagen, sowie in Mischungen für Begrünungen von Weinbergen (Fahrgassen) im pannonischen Klima oder Steinbrüchen zu finden (FLORINETH 2012, S.71-76). Als Leguminose bildet *Anthyllis vulneraria* Knöllchenbakterien aus, welche für die symbiotische Stickstoff-Bindung verantwortlich sind und somit eine wichtige Rolle in der Pflanzenernährung spielen (AMBERGER 1996, S.173).

3.1.2. Wurzelformen

Die Wurzel dient der Pflanze einerseits als Verankerungsmöglichkeit im Substrat, andererseits als Organ für die Nährstoff- und Wasseraufnahme (AMBERGER 1996, S.103). Die Formen aller Pflanzenwurzeln folgen einem vererbten und strengen Bauplan, welcher eine Grundform der jeweiligen Art vorgibt. Selbst bei Störungen durch Umwelteinflüsse bleibt diese Grundform großteils erhalten (KUTSCHERA 1960, S.21). Auch die Wurzeltiefe ist im Zusammenhang mit der Wurzelform zu nennen, da die maximale Wurzeltiefe die physiologische Gründigkeit, also das tatsächlich durchwurzelbare Erdreich, des Bodens definiert (POLOMSKI und KUHN 1998, S.43). Ein feinerdreicher Boden ist jedoch eine der Voraussetzungen für das Erreichen größerer Wurzeltiefen (KUTSCHERA et al. 1997, S.42).

3.1.3. Wurzelformen: *Lolium perenne*

Die Wurzeln der einkeimblättrigen *Lolium perenne* zählen zu den faserförmigen Wurzeln (ARCHER et al. 2002, S.537). Sobotik et al. und Kutschera stellten in ihren Wurzelatlanten wertvolle Veranschaulichungen der Wurzelbilder und -formen von Gräsern und Kräutern zur Verfügung, welche wertvolle und rare Einblicke in die Tiefenausdehnung und Charakteristik der Wurzelarchitektur gewähren. Die Darstellung von SOBOTIK et al. (2020) als auch die von KUTSCHERA (1960) beruhen auf natürlichen Standorten (Abbildung 3: *Genister germanica* auf schotterreicher Lockersediment Braunerde SOBOTIK et al 2020, S. 29; Abbildung 4: *Lolium perenne* auf schwach durchsteinter lehmiger Braunerde KUTSCHERA 1960, S. 29). Ein Vergleich der Wurzelformen am Beispiel *Genister germanica* (Abbildung 3, reproduziert nach SOBOTIK et al. 2020, S. 30) mit der *Lolium perenne* Zeichnung von KUTSCHERA auf natürlichem Substrat (Abbildung 4: reproduziert aus KUTSCHERA 1960, S.29)

zeigt, dass der Wurzelkörper von *Lolium perenne* am ehesten den Zylinder-, verkehrt-kegelförmigen Wurzeltypen zuzuordnen ist.

Dieser Wurzelbauplan ist eine Sonderform des zylinderförmigen Wurzelbauplans (SOBOTIK u. a. 2020, S.29). Die randständigen Wurzeln reichen hier nicht so tief hinunter wie die zentralen Wurzeln. Bei höherer Bodenfeuchtigkeit wird die Vorwüchsigkeit der Polwurzel gefördert und es kommt zu der verkehrten Kegelform (SOBOTIK et al. 2020, S.29). Diese verkehrte Kegelform ist in Abbildung 4 auch für *L. perenne* deutlich zu erkennen.

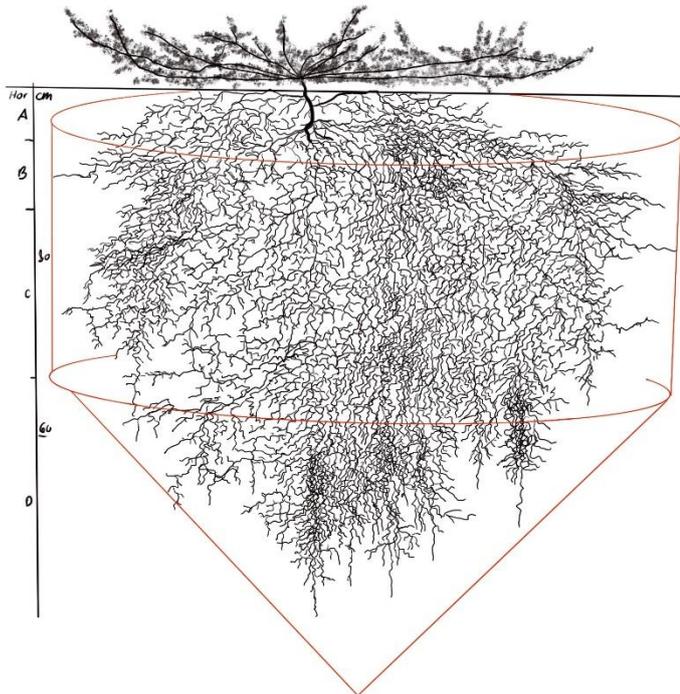


Abbildung 3: Zylinder-, verkehrt-kegelförmiger Wurzeltyp, *Genister germanica*: reproduziert (2020) aus SOBOTIK et al. 2020, S.30

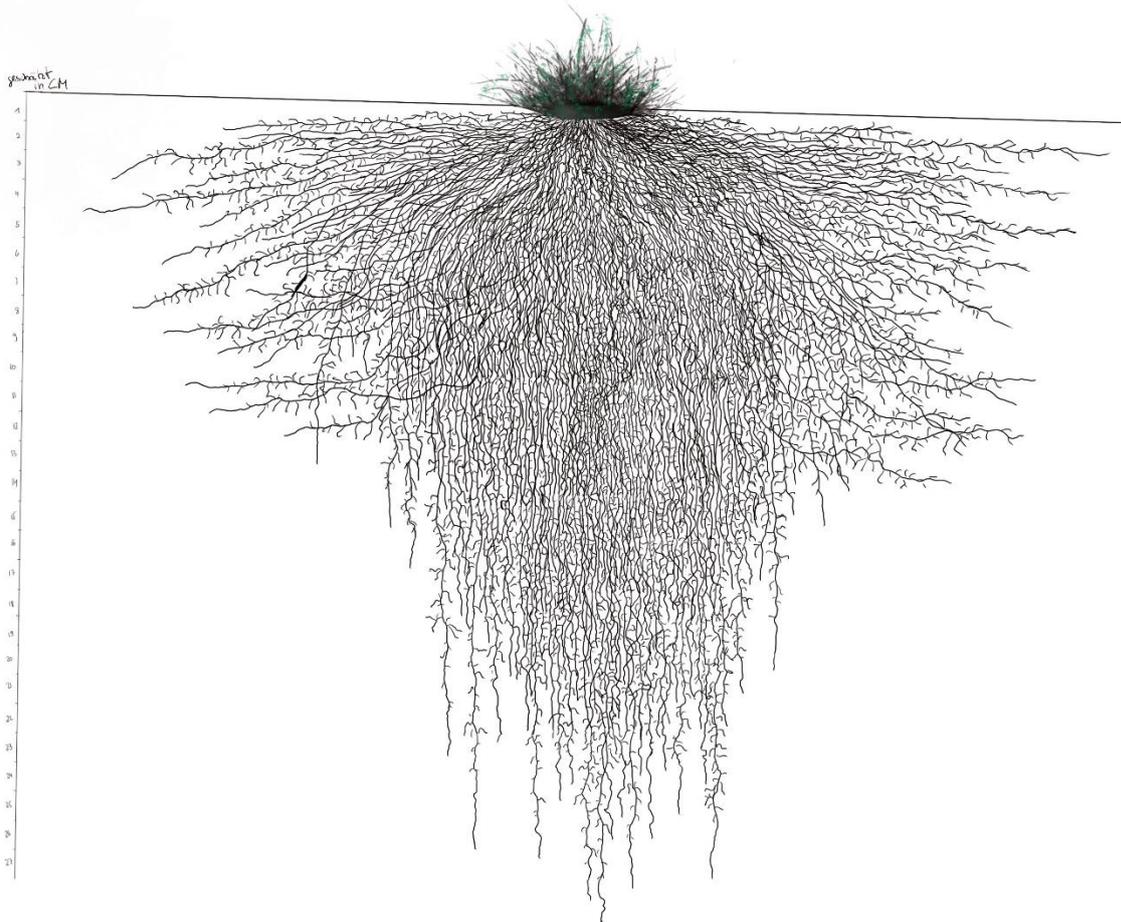


Abbildung 4: *Lolium perenne*, reproduziert und verändert (2020) aus KUTSCHERA 1960, S.29

Schwankungen in der Wurzelarchitektur, wie etwa eine eher seitliche Verankerung, können durch Feuchte- und Temperaturschwankungen hervorgerufen werden (KUTSCHERA et al. 1997, S.25).

3.1.4. Wurzelformen: *Anthyllis vulneraria*

Die Wurzeln von *Anthyllis vulneraria*, wie in Abbildung 5 (reproduziert nach SOBOTIK et al. 2020, S.30) zu erkennen, zählen zu den strangförmigen Wurzeltypen, die eine Polwurzel (Keimwurzel) mit gleichmäßiger Seitenwurzelbildung ausbildet. Der Wundklee auf Abbildung 5 wuchs in schotterreicher Lockersediment-Braunerde heran (SOBOTIK et al. 2020, S.29).

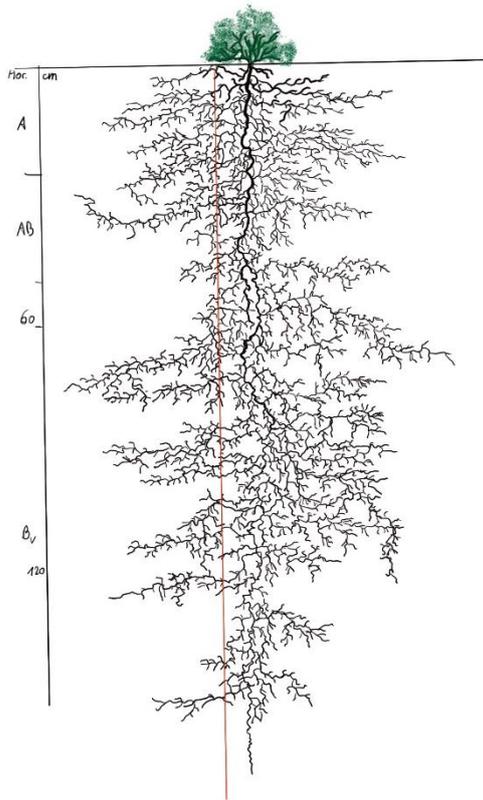


Abbildung 5: Strangförmiger Wurzeltyp von *Anthyllis vulneraria*, reproduziert (2020) aus SOBOTIC et.al. 2020, S.30

3.1.5. Substrat

Das Substrat ist ein Bauschuttsubstrat Recyclingmaterial Hochbau (RMH; 0/32, 0/64) von PORR, mit einer Zugabe von Kompost (5-10 Vol-%). Ein wesentliches Potenzial des RMH-Substrates liegt darin, dass Bauabfall (und damit Bauschutt) ein wiederverwertbares Gut darstellt und durch die Weiterverarbeitung eine maximale Nutzung eines Rohstoffes erzielt werden kann (QIN et al. 2020). Durch die Wiederverwertung des Bauschuttes durch das RMH-Substrat entstehen neue Ressourcen, welche für gewöhnlich sonst auf der Deponie ineffizient gelagert werden. YUNFU (2018) empfiehlt außerdem ein einheitliches Erfassen von Daten mit Hilfe von Computertechnologien, um ein Management in Bezug auf die Verwendung von Bauschutt zu vereinfachen (YUNFU et al. 2018). Auf den Ansatz des Zuziehens von Technologie wird in dieser Arbeit besonderer Wert gelegt.

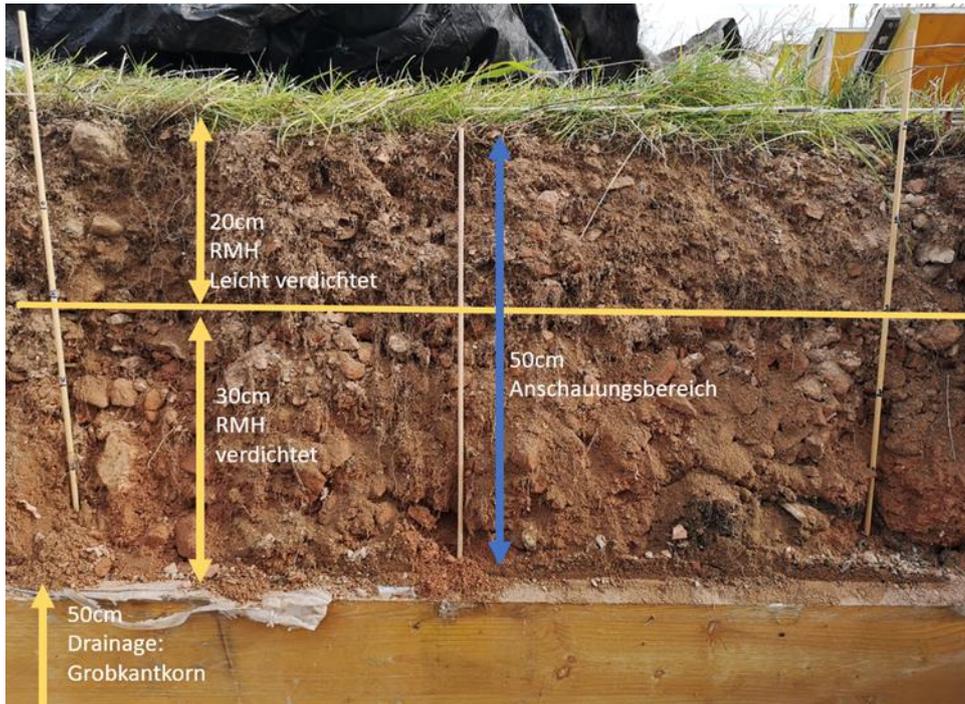


Abbildung 6: Aufbau der Versuchsflächen in Bezug auf das Substrat, eigene Erstellung 2020

Der Aufbau der Beete in Bezug auf das Substrat ist, wie in Abbildung 6 zu erkennen, zweischichtig: die untere Schicht ist eine 50 cm Drainageschicht aus Grobkantkorn (aufgrund des lehmigen Bodens), darüber die 20/30 cm starke Schicht mit dem RMH-Substrat (Schotterrassen). Die unteren 30 cm wurden mit einer Rüttelplatte verdichtet, die oberen 20 cm wurden leicht verdichtet und für die Saat aufgeraut. Für diesen Versuch relevant sind die oberen 50 cm (Abbildung 6, blauer Pfeil: Anschauungsbereich), da das Material darunter (Abbildung 6; 50 cm Drainageschicht) von einer DOKA-Platte, welche am Rahmen der Konstruktion befestigt ist, am Herausfallen gehindert wird (siehe Kapitel 3.2.2.). Diese Konstruktion wurde so erbaut, damit bei der Bearbeitung der Wurzeln im Anschauungsbereich ein Arbeiten auf Augenhöhe möglich ist.

3.2. Experimentelle Herangehensweise

3.2.1. Versuchsort

Im Sommer 2018 wurden sechs Beete im Rahmen einer Institutsversuchslage zur Wurzelforschung im Versuchsgarten des Instituts für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau (IBLB) in Groß-Enzersdorf (Niederösterreich) vorbereitet und zwei davon (Nr.4 und Nr.6) angesät. In Abbildung 7 ist die Verortung der Beete via Satellitenbilder (Google Maps) und Drohnenaufnahmen zu erkennen.



Abbildung 7: Verortung der Versuchsbeete im Versuchsgarten Groß-Enzersdorf, Google Maps 2020; eigene Erstellung 2020

Im Spätsommer 2019 wurde mit den Feldaufnahmen zu dieser Masterarbeit begonnen. In Tabelle 2 ist der Monatsmittelwert der Tagestemperatur mit 22-24°C für Groß-Enzersdorf abzulesen. Im Vergleich zur Klimaperiode 1981-2010 ergibt sich eine Temperaturabweichung von +2,9°C und eine Niederschlagsabweichung von -26 % (ZAMG 2020). Es war also heißer und zeitgleich deutlich trockener. Die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) spricht im August 2019 vom zweitwärmsten Sommer der Messgeschichte (ZAMG 2019).

Tabelle 2: Klimadaten August 2019, SPARTACUS- Datensatz, Wetterstation Groß-Enzersdorf, ZAMG 2020

August 2019	Niederösterreich
Niederschlagsabweichung (im Vergleich zur Klimaperiode 1981-2010)	-26%
Temperaturabweichung (im Vergleich zur Klimaperiode 1981-2010)	+2.9 °C
Abweichung der Sonnenscheindauer (im Vergleich zur Klimaperiode 1981-2010)	15%
Monatsmittelwert der Lufttemperatur	22°C – 24°C (nur Groß-Enzersdorf)
Monatssumme des Niederschlags	50 mm – 75 mm (nur Groß-Enzersdorf)

Hinzu kommt die für Winde günstige Lage des Versuchsgartens. Im Zeitraum vom 11.08.2019 bis zum 21.08.2019 wurden in Groß-Enzersdorf Spitzenwerte der Windgeschwindigkeit bis zu 6,9 m/s (entspricht 24,84 km/h) gemessen (LAND NIEDERÖSTERREICH 2019).

Zusammenfassend liegen für den Zeitraum der Durchführung des Versuches (im Zuge dieser Masterarbeit) sehr warme, trockene und windige Konditionen vor. In Verbindung mit dem RMH-Substrat kommt es dadurch zu extremen Standortbedingungen. Der Versuch wird nicht bewässert.

3.2.2. Aufbau der Versuchsbeete

Die Herstellung erfolgte 2018 durch DI Pia Minixhofer im Zuge ihrer Dissertation. Die Beete selbst ragen 20 cm über dem Bodenniveau. Um die Freilegung der Wurzeln zu



Abbildung 8: 3D Darstellung des Aufbaus der Beeteanlage, eigene Erstellung in PlanetZoo

vereinfachen (um auf Augenhöhe arbeiten zu können), wurde eine Vertiefung von 80 cm vor dem Bereich der Wurzelfreilegung ausgehoben (Abbildung 8).

Bei den Beeten handelt es sich um das Bauschuttsubstrat RMH in den Korngrößen 0/32 und 0/64 sowie einem Anteil von 10 Vol-% Kompost von PORR (siehe Kapitel 3.1.5.) bei der oberen Tragschicht. Hierbei wurden zwei Ansaatmethoden angewandt: Punktsaat (Beet Nr.6, siehe Abbildung 9) mit *Lolium perenne* (Reinsaat) und Streusaat (Beet Nr.4) mit *Lolium perenne* und *Anthyllis vulneraria* (Mischsaat). Wie in Abbildung 9 zu erkennen ist, besteht die Anlage aus drei Beeten zu je zwei Reihen (1-6) mit 1,30 m Breite und 6,50 m Länge. Die Längsseiten sind in je 1,30 m breite Teilabschnitte unterteilt und mit Großbuchstaben (A-E) gekennzeichnet.

Für diese Arbeit relevant sind die in Abbildung 9 gelb und grün gekennzeichneten Reihen vier (Nr. 4) und sechs (Nr. 6), wobei nur bei den Beeten 4A und 6A (gelbe Kennzeichnung) Wurzelgrabungen erfolgten und im Zuge dessen die Wurzelzeichnungen angefertigt wurden. Blaue Beete sind versuchsfremde Flächen und werden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Im Herbst 2019 erfolgten die Ernten zur unterirdischen Biomasseproduktion in den gelb markierten Teilabschnitten A, die zur oberirdischen Biomasseproduktion in den gelb und grün markierten Teilabschnitten der Reihen vier und sechs. Für die oberirdische Biomasse wurden die Wuchshöhe sowie das Feucht- und Trockengewicht bestimmt. Von der unterirdischen Biomasse wurde ebenfalls das Gewicht der Wurzelmasse bestimmt. Zusätzlich wurden Zeichnungen der Wurzelarchitektur im Boden angefertigt (nach KUTSCHERA 1960, S.100-103).

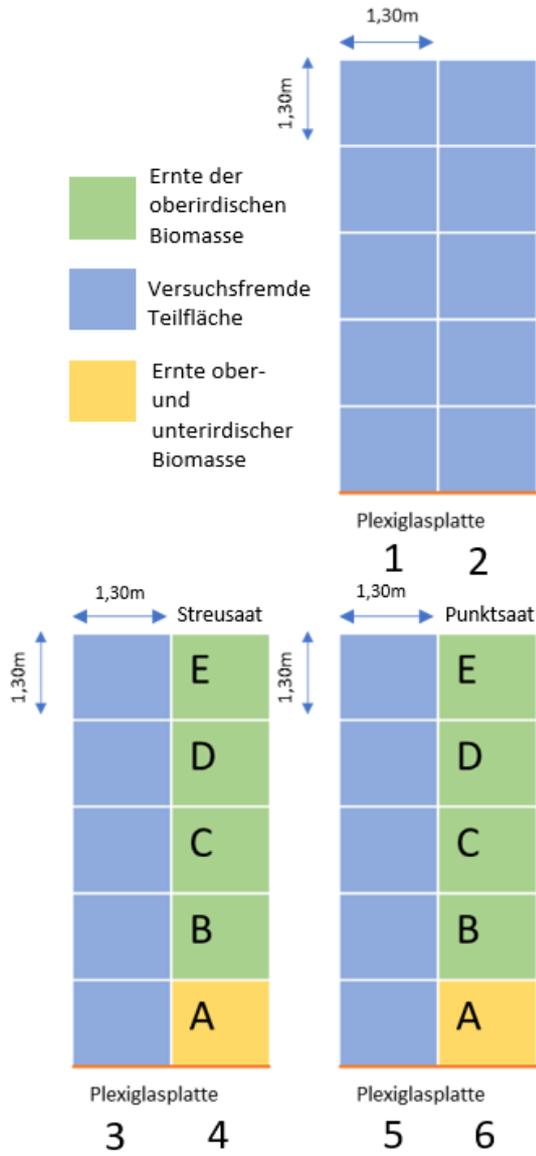


Abbildung 9: Aufbau des Versuches, eigene Erstellung

Die Pflanzenverteilung der Beete 6A-E hat aufgrund ihrer Aussaatmethode „Punktsaat“ ein für diese Methode typisches Raster. In Abbildung 10 sind die genauen Abstände zu erkennen.

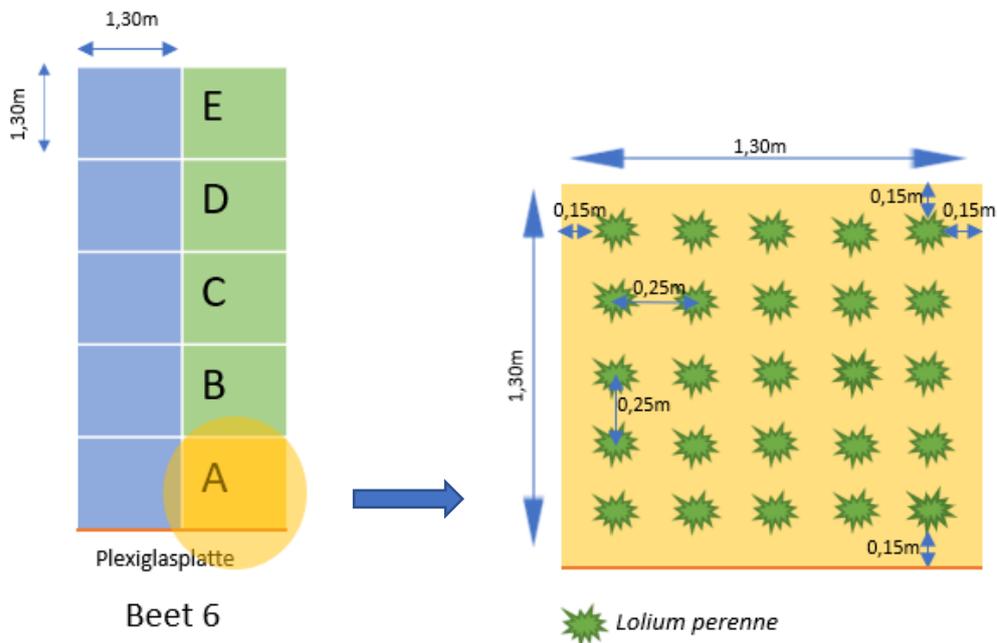


Abbildung 10: Aufbau der Punktsaat, eigene Erstellung

Der Aufbau der Beete 4A-E fällt durch den Aussaatcharakter „Streusaat“ willkürlich aus und unterliegt wie in Abbildung 11 dargestellt keinem Muster oder Raster. Um den Randeffekt auszuschließen, wurden die Aufnahmen in einem 1 m x 1 m Raster gemessen (Beet Begrenzung = 1,30 m x 1,30 m).

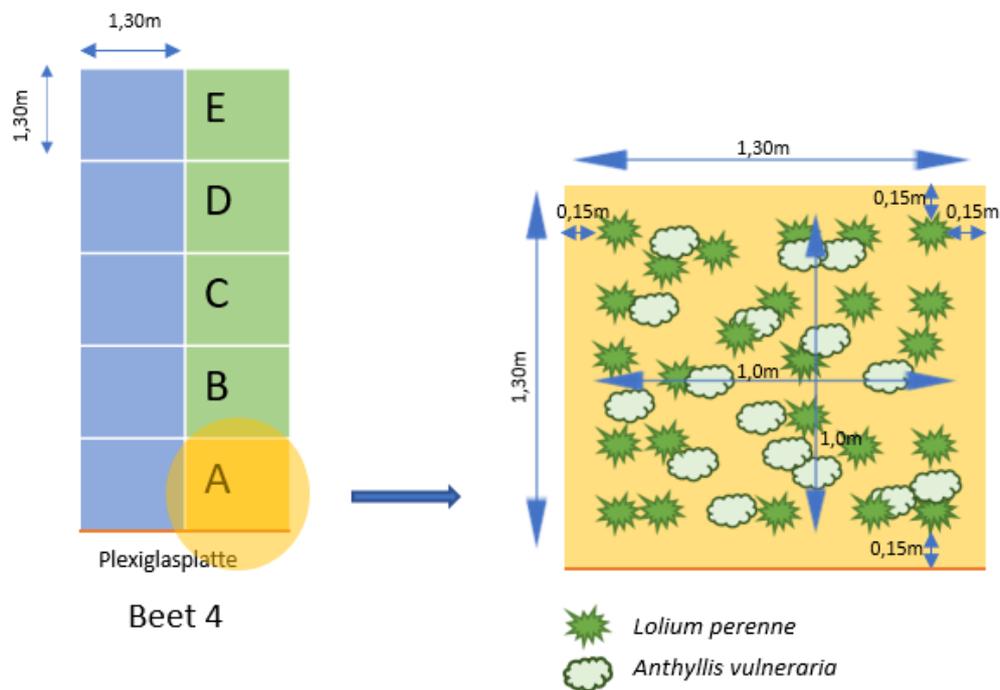


Abbildung 11: Aufbau Streusaatbeet, eigene Erstellung

Für die händische grafische Darstellung (Beet 4A und 6A) der Wurzeln wurden einzelne Profile je nach Aussaatmethode mit „S“ für Streusaat (=Beet 4), oder „P“ für Punktsaat (=Beet 6) benannt und durchnummeriert (Abbildung 12). Die Nummerierung erfolgte in der Reihenfolge, in der gezeichnet wurde (1-2-3-4-5-6), daher ergibt sich in Leserichtung die Nummerierung 1-2-3-6-5-4. Es wurde darauf geachtet, dass die Profile in gleichen Abständen gezeichnet wurden.

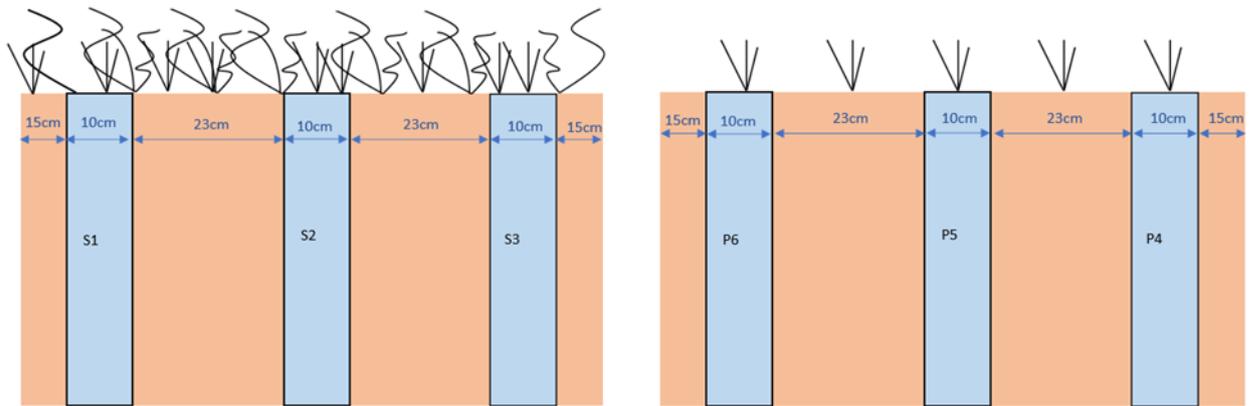


Abbildung 12: Verortung der Profile, eigene Erstellung

3.2.4. Saatmethode

Beim Aussaatverfahren ist zwischen zwei Arten zu unterscheiden: die Breit- oder Streusaat und die Reihensaat (SEIPEL 2007, S. 314). Im Zuge der Versuchsanlagen 2018 wurden von DI Minixhofer, in Abbildung 13 dargestellt, zwei Saatmethoden gewählt: Punktsaat (eine Form von Reihensaat) und Streusaat).

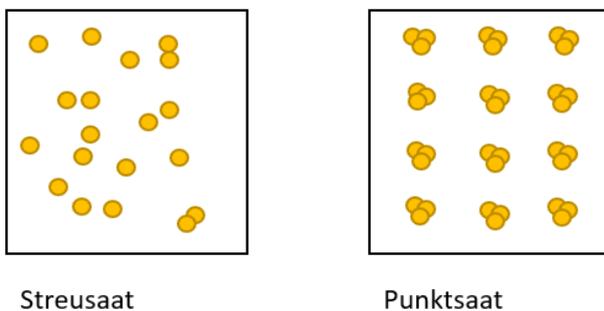


Abbildung 13: Unterschied von Streusaat und Punktsaat, eigene Erstellung

Anthyllis v. ist ein Dunkelkeimer und wird nach der Aussaat mit Substrat bedeckt. Gräser sind fakultative Lichtkeimer: das Licht fördert die Keimung, jedoch können sie auch bei Dunkelheit keimen (SEIPEL 2005, S.439). Um einen Abtrag der Samen durch Wind, Saatgutverlust durch Vogelfraß und Austrocknen durch die Sonne zu vermeiden, werden auch die Samen der Gräser mit einer 0,5 – 1,5 cm starken Substratschicht abgedeckt (SEIPEL 2005,

S.439). Generell für die Einarbeitungstiefe von Gräser-Kräuter-Mischungen gilt: die Überdeckung mit Substrat sollte so dick sein wie das Saatgut selbst (FLORINETH 2012, S.39).

3.2.5. Streusaat

Die Streu- oder Breitsaat wird mit der Hand (oder auch maschinell möglich) breitwürfig auf den dafür vorgesehenen Flächen ausgestreut. Besonders zu beachten ist ein möglichst gleichmäßiges Ausbringen der Samen. Diese Methode wird beispielsweise beim Anbau von Rasen häufig benutzt (SEIPEL 2007, S.314).

3.2.6. Punktsaat

Die Punktsaat ist eine Form der Reihensaat, welche eine Aussaat in dafür vorgesehenen Reihen beschreibt. Für diese Arbeit kam die Horstsaat zum Einsatz, bei der mehrere Samen in gleichmäßigen Abständen in Häufchen abgelegt werden. Bei Verschlämmung oder Verkrustung der oberen Bodenschicht erleichtert diese Saatmethode ein Durchstoßen der Oberfläche durch das nahezu zeitgleiche Austreiben der Sämlinge (SEIPEL 2007, S.314).

4. Methodik und Arbeitsweisen

Aufbauend auf die Forschungsfragen (siehe Kapitel 2.0.) wird die Methodik für diese Masterarbeit in zwei Unterkapitel geteilt: Erhebung der oberirdischen Biomasse und der unterirdischen Biomasse. Eine Übersicht aller Versuche mit Codierung wurde bereits in Tabelle1 (Kapitel 2.) bereitgestellt.

4.1. Untersuchungen zur oberirdischen Biomasse

Bestimmt wurden Wuchshöhe der Pflanzen, Deckungsgrad sowie Feucht- und Trockenbiomasse im Spätsommer 2019.

4.1.1. Oberirdische Biomasse (OB1) – Deckungsgrad

Der Deckungsgrad ist eine senkrechte Projektion der Biomasse auf eine Fläche und ist eine einfach messbare Größen bei Vegetationsaufnahmen (FREY and LÖSCH 2010, S.101). Für diese Arbeit wurde die Point-Interception-Methode (UNIVERSITY OF IDAHO 2009) angewendet. Andere etablierte Methoden wären beispielsweise die Line-Intercept-Methode (COULLOUDON et al. 1996, S.78-85), oder die Cover Board Methode (COULLOUDON et al. 1996, S.86-93).

Bei der Bestimmung des Deckungsgrades wurden folgende Pflanzenkategorien (in Anlehnung an die Methodenhilfen zur Vegetationstechnik des IBLB VT, 2019) der Gesamtdeckung unterschieden: Gräser, Kräuter, Beikräuter und kein Bewuchs. Pro Teilfläche (A-E) wurden jeweils 11 Punkte eingeschätzt. Mit der Point-Interception-Methode (UNIVERSITY OF IDAHO 2009) wurde, wie in Abbildung 14 abgebildet, ein Zollstock randomisiert in die jeweilige Teilfläche (A-E) gelegt und alle 10 cm (0 cm bis 10 cm - daher 11 Aufnahmen) visuell zu zweit zwecks Kontrolle das Deckungsverhältnis bestimmt. Anschließend wurde für jede Teilfläche (A-E) anhand der jeweiligen Ergebnisse eine Verhältniszahl (in Prozent) bestimmt.

Beet 4 - Streusaat

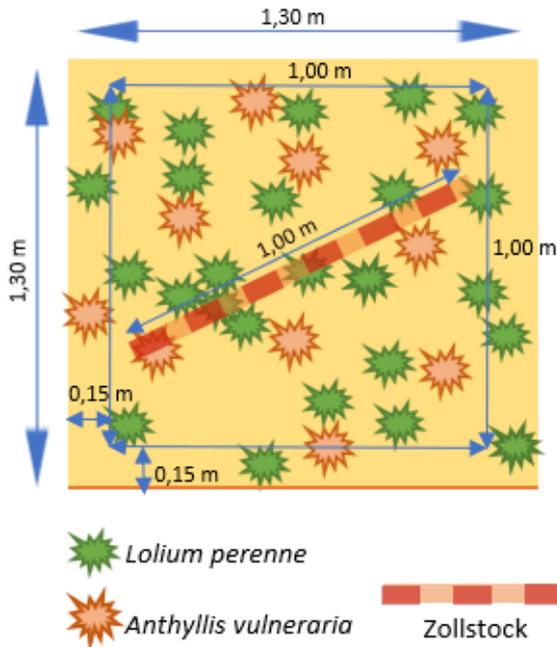
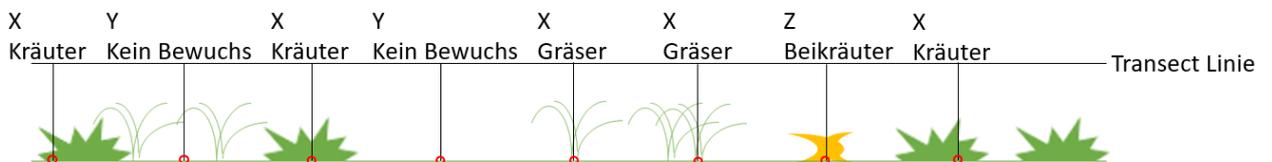


Abbildung 14: Vorgang zur Abschätzung des Deckungsverhältnisses beim Streusaatbeet, nach FREY and LÖSCH 2010, eigene Erstellung

Für das Messen des Deckungsgrades bei der Point-Interception Methode kommt, wie in Abbildung 15 beispielhaft dargestellt, folgende Formel nach UNIVERSITY OF IDAHO (2009) zum Einsatz:

$$\text{Deckungsgrad in \%} = \frac{\text{Anzahl der Treffer (Gräser + Kräuter)}}{\text{Anzahl der Aufnahmen (UNIVERSITY OF IDAHO 2009)}}$$



X= getroffen
 Y= nicht getroffen
 Z= Beikräuter

$$\% \text{ Deckungsgrad} = \frac{\text{Anzahl der Treffer (Kräuter + Gräser)}}{\text{Anzahl der Aufnahmen}} = \frac{5}{8} = 62,5\%$$

Abbildung 15: Beispiel zur Errechnung des Deckungsgrades nach der Point-Interception Methode, nach UNIVERSITY OF IDAHO 2009, eigene Erstellung

Das Deckungsverhältnis wurde mit der Point-Interception Methode nur für das Streusaatbeet bestimmt, da das Punktsaatbeet aufgrund der Ansaat-methode (siehe Kapitel 3.2.4.) kein natürliches Deckungsverhältnis bildet.

Beim Punktsaatbeet herrscht eine vorbestimmte, in Reihen angelegte Ordnung, mit je 25 Pflanzen pro m² und jeweils im Durchschnitt ca. 12 cm Durchmesser (= ca. 113 cm²) pro Pflanze, welche es ermöglicht die Deckung anhand einfacher Formeln zu berechnen. Es wird für diese Berechnung der Deckung eine Kreisfläche der Pflanzen angenommen ($\pi \cdot r^2$), da der Wuchs von *Lolium perenne* aus der Vogelperspektive am ehesten der Kreisform zuzuordnen ist (Abbildung 16).



Abbildung 16: Kreisförmiger Wuchs von *Lolium perenne*, eigene Aufnahme 2019

Rechenvorgang:

$$\begin{aligned} 25 \text{ Pflanzen} &= 113,097 \text{ cm}^2 = 28,3\% \\ 100\% (= 1 \text{ m}^2) &= 88,3 \text{ Pflanzen} \end{aligned}$$

25 Pflanzen nehmen auf 1 m² 28,3% der Fläche ein. Würden 100% der Fläche (1 m²) vollständig bepflanzt sein, wären 88 Pflanzen notwendig. Jedoch ist anzumerken, dass diese Aufnahmen im ersten Jahr nach der Aussaat erhoben wurden. Im zweiten Jahr erhöht sich der Deckungsgrad bei normalem Entwicklungsverlauf.

Bei der Versuchsanlage war ein Reinsaatbeet mit *Anthyllis vulneraria* eingepflanzt, wetterbedingt kam es vor Beginn dieser Masterarbeit zu einem Ausfall. Daher stehen davon keine Daten zur Verfügung.

4.1.2. Oberirdische Biomasse (OB2) – Vergleich der Trockenbiomasse

Nach der Vermessung des Deckungsgrades wurden die Pflanzen im August und September 2019 geerntet, wobei bei den einzelnen Beeten (4A – 4E und 6A – 6E; vergleiche Kapitel 3.2.2.) die Vegetation einheitlich 1 cm über dem Boden abgeschnitten wurde. Geerntet wurde

sämtliche oberirdische Biomasse wie Blätter und Stiele. Nur unerwünschte Beikräuter wurden entfernt. Zur Bestimmung des Feuchtgewichtes wurde die geerntete Biomasse in Papiersäcken gefüllt und rasch nach der Ernte gewogen. Die bereits aufgrund der herbstlichen Jahreszeit schon sehr trockenen Proben wurden anschließend in den Papiersäcken für 24 Stunden bei 60°C im Binder Trockenschrank Modell FED720 (BINDER 2020) getrocknet und zur Bestimmung des Trockengewichtes noch einmal gewogen. Für die statistische Auswertung (siehe Kapitel 4.3.) wurde das Trockengewicht herangezogen, da das Feuchtgewicht aufgrund der Erntebedingungen nicht mehr voll im Saft stand und teilweise schon ausgetrocknet war.

Um die getrocknete Biomasse der beiden Beete (4A-E und 6A-E) miteinander vergleichen zu können, wurde der Mittelwert der getrockneten Biomasse beider Beete in Gramm bestimmt (Abbildung 17: MittePunkt = Mittelwert des Punktsaatbeetes, Beet 6; MitteStreu= Mittelwert des Streusaatbeetes, Beet 4).

```
GesGewPunkt <- 1437.98+853.47+742.5+614.34+926.25
GesGewStreu <- 726.72+645.35+482.23+627.61+574.26
MittePunkt <- GesGewPunkt/5
MitteStreu <- GesGewStreu/5
MittePunkt/28.3*56.36
```

```
## [1] 1822.057
```

```
MitteStreu
```

```
## [1] 611.234
```

Abbildung 17: Bestimmung der Mittelwerte des Gewichts der getrockneten Biomasse von Beet 6A-E (Punktsaatbeet) und Beet 4A-E (Streusaatbeet), eigene Erstellung in R-Studio

4.2. Untersuchungen zur unterirdischen Biomasse

Die Aufnahme der unterirdischen Biomasse wurde im September bis November 2019 in zwei Teilen erhoben:

- Erhebung der Wurzeltrockenmasse innerhalb von 6 x 5000 cm³ (Kapitel 4.2.2.)
- grafisches Darstellen der Wurzelarchitekturen (Kapitel 4.2.3. und Kapitel 4.2.4.)

Zur grafischen Darstellung wurden 2 Methoden gewählt:

a) händisch angefertigte Zeichnungen (September bis November 2019) und

b) computergestützte Darstellungen mithilfe einer digitalen Erfassung (PyCharm, Version: 2020.2.3/ Build: 202.7660.27/ 7. Oktober 2020 (JET BRAINS s.r.o. 2000)) der zuvor händisch angefertigten Zeichnungen (Mai-Juli 2020).

4.2.1. Material und Werkzeug für die Wurzelarbeiten

In Tabelle 3 sind sämtliche Materialien und Werkzeuge mitsamt ihrer Stückanzahl und Verwendung aufgelistet, die im Rahmen der Wurzelfreilegungen und -erhebungen eingesetzt wurden. Einige Werkzeuge wie etwa das Zelt, die Lampe oder die Thermodecke waren nur bei entsprechend kalter und/oder schlechter Wetterlage im Aufnahmezeitraum von September bis November 2019 notwendig.

Tabelle 3: Verwendete Materialien und Werkzeuge, eigene Erstellung

Material / Werkzeug	Stückanzahl	Verwendung
Pikierstab	1	Lockerung des Erdmaterials
Pinsel fein	1	Freilegung der Wurzeln
Pinsel grob	1	Freilegung der Wurzeln
Holzstab, 70cm lang	6	Markierung
Zollstock	1	Abmessung
Kübel	2	Sitzgelegenheit, Verfüllen von Erdmaterial
Papiersäcke	55	verfüllen von Biomasse

Zelt	1	Schutz vor Regen und Wind
Lampe	1	für bessere Sicht
Thermodecke	1	Warmhaltung der Bearbeiterin
Gitterschablone 10cm x 10cm	1	ermöglicht exaktes Abzeichnen der Wurzeln
Drahtstücke 5cm Länge	~ 20	Befestigung der Gitterschablone im Substrat
Schaufel	1	grobes Abtragen
Handschaufel	1	Feines Abtragen
Gartenschere- Felco	1	Ernte oberirdische Biomasse
Handy	1	Fotodokumentation
Drohne	1	Luftbilddokumentation
Stifte	5	Zeichnung erstellen, Dokumentation
Block	1	Zeichnung erstellen, Dokumentation
Geodreieck	1	Zeichnung erstellen
Radiergummi	1	radieren
Scherfestigkeitsmessgerät	1	Messung der Scherfestigkeit
Schubkarre	1	Beförderung der Werkzeuge
Verlängerungskabel	1	Anschluss an Strom für die Lampe

Die Gitterschablone wurde selbst hergestellt. Wie in Abbildung 18 zu erkennen ist, wurden hierfür 22 Stk. 1 mm Stahldrähte aus der Floristik verwendet, welche mit Heißkleber je am Punkt des Überschneidens zusammengeklebt wurden. Die Schablone misst 10 cm x 10 cm mit je 1 cm x 1 cm Kästchen. In Abbildung 19 ist der Einsatz vor Ort abgebildet. Die Gitterschablone wurde mit mehreren 5 cm langen, umgebogenen Drahtstücken im Substrat befestigt.

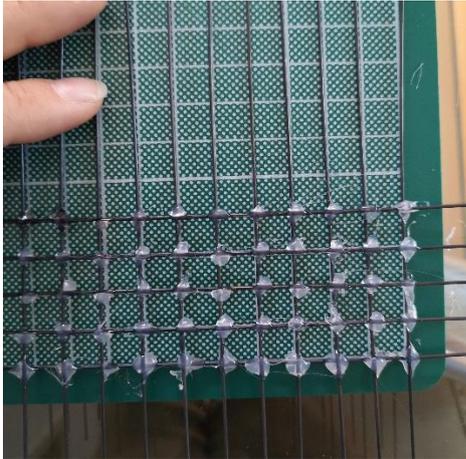


Abbildung 18: Herstellung der Gitterschablone, eigene Aufnahme 2019



Abbildung 19: Gitterschablone in ihrer Anwendung, eigene Aufnahme 2019

4.2.2. Unterirdische Biomasse (UB3) - Erhebung der Wurzeltrockenmasse

MARZILIANO (2015) beschreibt das Entnehmen von unterirdischer Biomasse durch eine Grabung innerhalb einer bestimmten Abmessung und einer anschließenden Aussortierung der Wurzeln vom Substrat durch leichtes Schütteln und Ansprühen mit Wasser. Auch KUTSCHERA (1960, S.101-103) empfiehlt das Ausgraben eines ganzen Erdblockes und das anschließende Auswaschen der Wurzeln.

Um das Gewicht der Wurzelmasse zu bestimmen, wurden Bodenproben in dreifacher Wiederholung pro Beet, wie in Abbildung 20 zu erkennen ist, zu je 10 cm x 10 cm und einer Tiefe von 50 cm freigelegt, gesiebt und gewogen. Um das Gewicht der Wurzelmasse so

komplett wie möglich aufnehmen zu können, wurde besonders auf das gründliche Aussortieren der Wurzeln geachtet.

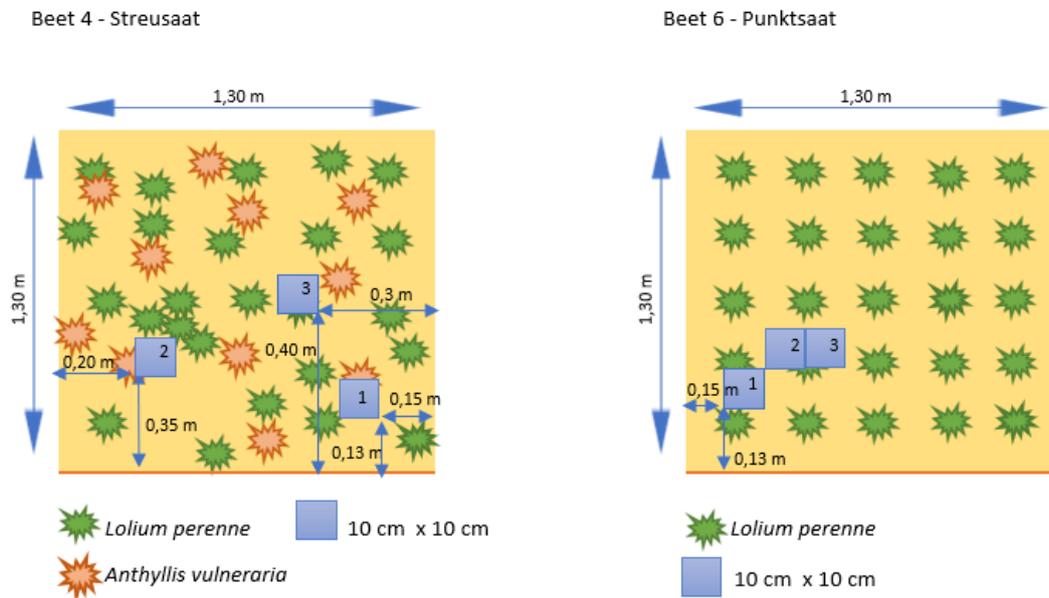


Abbildung 20: Verortung der Bodenproben zur Wurzelmasseerhebung, eigene Erstellung

Im Unterschied zu MARZILIANO (2015) und KUTSCHERA (1960) wurde in dieser Arbeit kein Wasser zum Auswaschen verwendet, und es war durch die lockere Körnung des Bauschuttes nicht möglich, Blöcke auszugraben. Daher wurde nur eine Seite des auszugrabenden Blockes mithilfe einer Handschaufel freigelegt und der Block selbst im Anschluss von oben nach unten, Schicht für Schicht abgetragen. Es wurde speziell darauf geachtet, dass nur Substrat entnommen wurde, welches innerhalb der 10 x 10 x 50 cm Abmessung liegt und randomisiert innerhalb des Teilabschnittes A des jeweiligen Beetes ausgewählt wurde (Abbildung 21).

Da aufgrund des besonderen Aufbaus des Substrates meist keine bis sehr wenig Substratrückstände auf den Wurzeln zu finden waren, war ein reines Sieben ohne Auswaschung vollkommen ausreichend, um die Wurzeln vom Substrat zu trennen.

Nach dem Sieben des Substrates und dem Wiegen des Nassgewichtes der Wurzeln und des Substrates, wurden alle Proben bei 60°C für 24 Stunden in den Trockenschrank gelegt. Anschließend wurde das Trockengesamtgewicht (mit Papiersack), sowie das Trockengewicht (ohne Papiersack) der Wurzeln bestimmt.

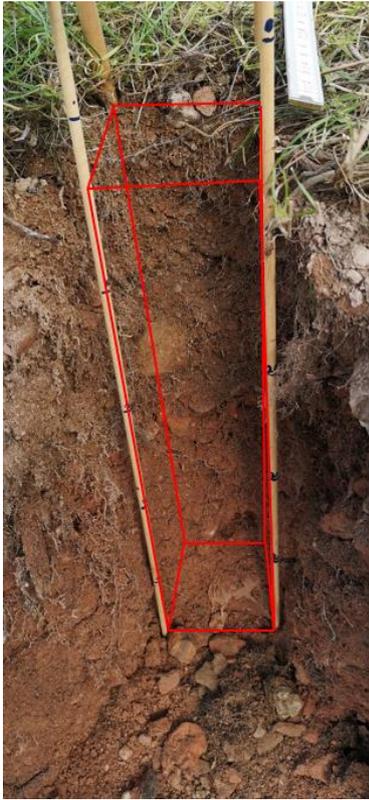


Abbildung 21: Entnahme der Bodenprobe beim Streusaatbeet (4A), eigene Aufnahme 2019

4.2.3. Unterirdische Biomasse (UB4) – Analoge Erfassung der Wurzelarchitektur

Die Aufnahme der Wurzelarchitektur wurde nach der Methode von KUTSCHERA (1960, S.100-103) durchgeführt. Sie beschreibt das Ausgraben und Freilegen der Wurzeln und deren grafische Darstellung per mehrschichtiger händischer Zeichnung. Ziel der Zeichnungen der Wurzelarchitektur ist es, diese später mit Zeichnungen aus der Literatur zu vergleichen.

Das Freilegen der Wurzeln geschah in einem eigens dafür angelegten, 80 cm tiefen Graben, der die Bearbeitung auf Augenhöhe ermöglicht. Die Versuchsfläche selbst ist ähnlich zu einem Hochbeet etwa 10 cm über dem Bodenniveau angelegt, was das Freilegen der Wurzeln vereinfachte. Um die Wurzeln schonend und exakt freizulegen, wurden Pinsel und spitze Werkzeuge wie ein Pikierstäbchen verwendet. Pro Beet wurden je drei Wurzelprofile gezeichnet.

Für den Versuch dieser Arbeit wurde eine 10 cm x 10 cm Gitterschablone (Kapitel 4.2.1.) mit je 1 cm x 1 cm Kästchen genutzt (siehe Abbildung 22). Damit konnte ein exaktes Bild abgezeichnet werden. Um eine dreidimensionale Darstellung zu erlangen, wurden drei

Schichten gegraben und gezeichnet. Als Zeichenpapier diente kariertes Papier, auf dem der Raster in einem Maßstab von 1:2 vorgezeichnet wurde. Der größere Maßstab erleichterte das Zeichnen von sehr feinen Wurzeln und es konnte eine höhere Genauigkeit erzielt werden (KUTSCHERA 1960, S.100-103). Durch diesen Vorgang des mehrschichtigen Abgrabens wurden einzelne Wurzeln bewegt und waren nach dem Entfernen einer Bodenschicht oftmals nicht mehr an derselben Stelle. Während des Zeichnens wurde genau darauf geachtet, die Wurzeln wieder korrekt aneinander zu fügen. Diesem Umstand ist es jedoch zu schulden, dass die Fotografien nicht hundertprozentig mit den Zeichnungen übereinstimmen. Gezeichnet wurde in drei Schichten:

- Schicht 1: Schwarz
- Schicht 2: Grün
- Schicht 3: Lila

Außerdem ist zu erwähnen, dass pro Schicht 1,5 - 2,5 cm Erdmaterial abgetragen wurde, daher in Summe 3 - 5 cm ergeben. Diese Varianz erklärt sich anhand des grobkörnigen Materials, da es oft nicht anders möglich war, weniger oder mehr abzutragen, ohne die Wurzeln zu beschädigen. Es wird darauf hingewiesen, dass der Horst-Durchmesser einer ganzen *Lolium perenne* Pflanze (beim Punktsaatbeet) in diesem Versuch bei durchschnittlich 12 cm (bei 1 cm über der Erdoberfläche) liegt. Somit zeigen die Zeichnungen jeweils etwa die Hälfte einer Einzelpflanze und nicht alle Wurzeln wurden vollständig erfasst. Wäre die gesamte Pflanze erfasst worden, wären die einzelnen Wurzeln der Zeichnungen aufgrund der hohen Dichte nicht mehr erkennbar gewesen. Zudem verändern sich durch das Abgraben der Schichten die Wurzelstrukturen fortlaufend und die Zeichnungen weichen immer mehr von der realen Wurzelstruktur ab.

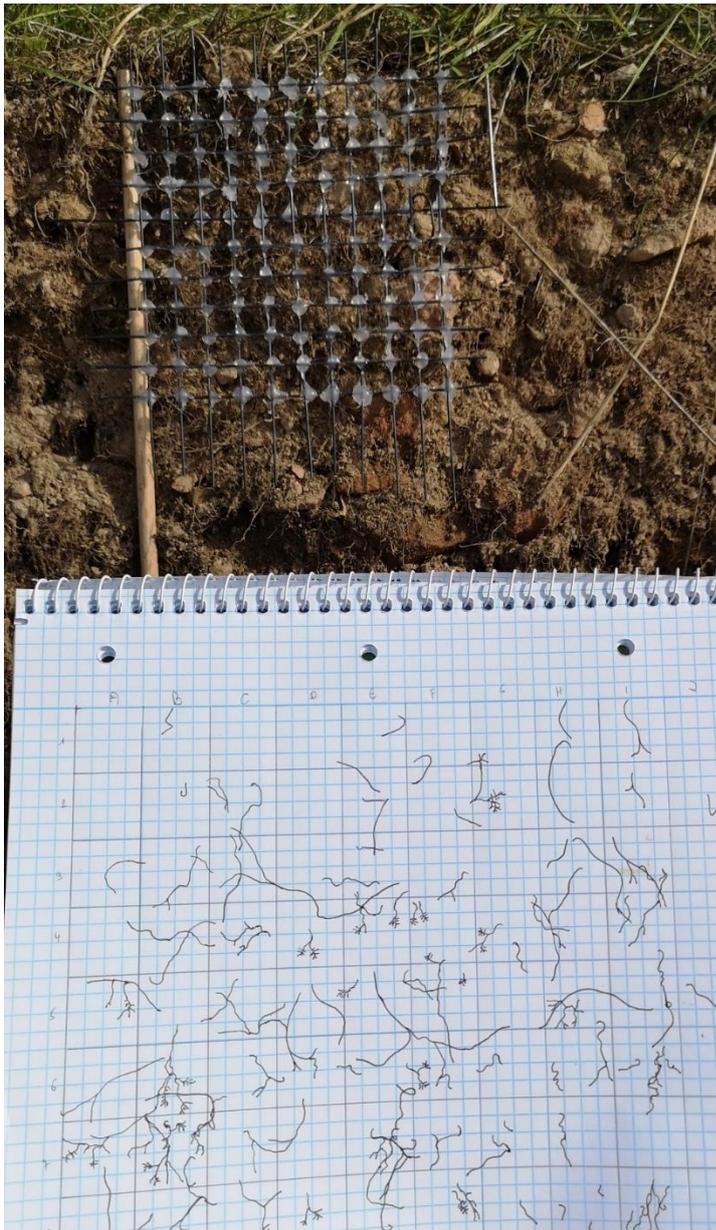


Abbildung 22: Ablauf der Herstellung der Wurzelbilder: Zeichnung der ersten Schicht, eigene Abbildung, 2019

4.2.4. Unterirdische Biomasse (UB5) - Digitale Erfassung der Wurzelarchitektur mittels PyCharm

Eine weitere Darstellung der Wurzelbilder ermöglicht das Programm PyCharm (2020.2.3/ Build: 202.7660.27/ 7. Oktober 2020 (JET BRAINS s.r.o. 2000)) mit der Programmiersprache Python. Diese Methode wurde mit Hilfe von Hr. Markus Blecha, B.Sc. durchgeführt, welcher Software Developer ist. Alle digitalen Darstellungen der Profile für diese Arbeit wurden mit einer kostenlosen Testversion erstellt, das Programm selbst ist jedoch

nach Ablauf dieser Testzeit kostenpflichtig. Benutzt wurde folgende Version: 2020.2.3/ Build: 202.7660.27/ 7. Oktober 2020 (JET BRAINS s.r.o. 2000).

Die Basis für die digitale Erfassung bilden die zuvor händisch angefertigten Wurzelzeichnungen (vergleiche Kapitel 4.2.2.: Händische grafische Darstellung der Wurzelarchitektur).

Der Code in Abbildung 23 beschreibt das Einlesen und Invertieren des jpg Files (HEINISOU 2021). Danach erfolgte das Herauslesen der Farben in RGB und das Umwandeln in HSV (mit CV2). Anschließend wurde eine Range Einstellung mit [50,0,0] (lower Range) und [255,255,255] (upper Range) als Input Variablen für die Maske verwendet (BERG et al. 2019). Aus dem source Image und der neuen Maske wurde das neue Bild erzeugt und anschließend mit Matplotlib (HUTTER et al. 2002) geplottet. Anhand der Maske kann dann der prozentuelle Anteil der Farben ermittelt werden.

```
import cv2
import numpy
import matplotlib.pyplot

img = cv2.imread('C:/Data/miri_master_wurzeln_p4.jpg')
img = cv2.bitwise_not(img) # invert

grid_RGB = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2RGB)
grid_HSV = cv2.cvtColor(grid_RGB, cv2.COLOR_RGB2HSV) # Converting to HSV

lower_range = numpy.array([50,0,0])
upper_range = numpy.array([255,255,255])

mask = cv2.inRange(grid_HSV, lower_range, upper_range)
res = cv2.bitwise_and(img, img, mask=mask) # Generating image with roots

matplotlib.pyplot.figure(figsize=(40,16))
matplotlib.pyplot.imshow(res)
print("Root Percentage:")
print((mask > 0).mean())

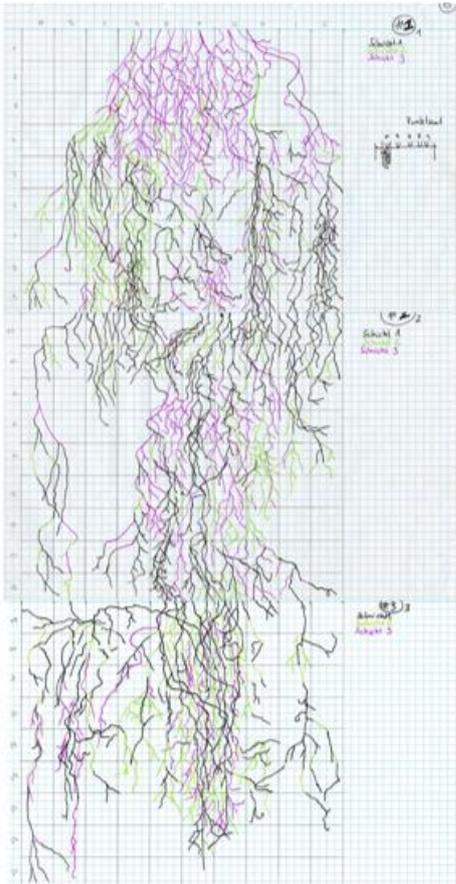
matplotlib.pyplot.show()
```

Abbildung 23: PyCharm Code zur Darstellung der Wurzelbilder, BLECHA Markus 2020

Durch das karierte Papier (auf dem bei den Feldaufnahmen gezeichnet wurde) kam es in den Ergebnissen zu einem hohen Anteil an Fehlern (siehe Kapitel: 6.1.2.). Daher wurden alle händisch im Feld angefertigten Zeichnungen nochmals digital am iPad mit dem Programm Procreate von Savage Interactive Pty Ltd, in der Version 5.1.5. (PROCREATE 2019) nachgezeichnet (siehe Abbildung 24). Alle händischen und digitalen Zeichnungen sind im Anhang zu finden.

P6

Händische Zeichnung auf Papier



Digitale Zeichnung in Procreate

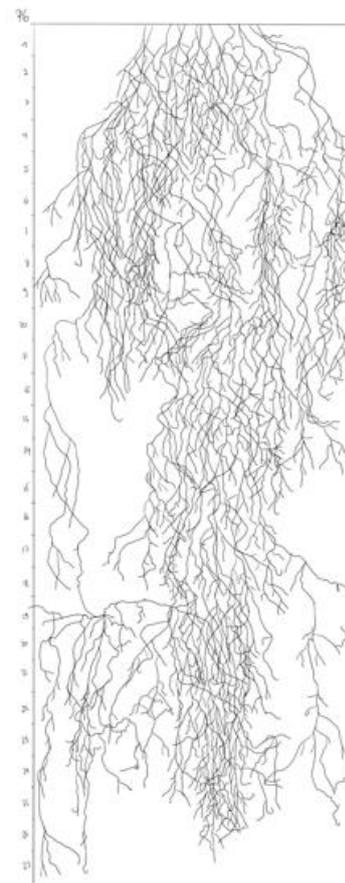


Abbildung 24: Umwandlung der händischen Zeichnung in eine digitale Zeichnung mittels Procreate, eigene Erstellung 2021

Für die Umwandlung einer händischen Zeichnung in eine digitale Zeichnung wird das eingescannte Original im Zeichenprogramm Procreate am iPad als Pausunterlage verwendet. Darüber wird ein neuer Layer erstellt, auf dem die digitale Zeichnung dann mit einem iPencil per Hand abgezeichnet wird. Anschließend wird der Layer, auf dem das Original liegt, unsichtbar geschaltet und die Zeichnung ist fertig zum Exportieren.

4.2.5. Erfassung der Wurzeltiefen

Um die Hypothesen H 2 und H 3 (Kapitel 2.) zu prüfen, wurde die Durchwurzelungstiefe für den Versuch UB5 (Kapitel 4.2.4.) aufgenommen. Damit sollen die gezeichneten Wurzelarchitekturen mit jenen aus der Literatur verglichen werden. Gemessen wurde die im Boden wachsende Pflanze vom Wurzelansatz bis zu der am tiefsten reichenden Wurzel.

4.2.6. Unterirdische Biomasse (UB6) - Scherfestigkeit

Als Scherfestigkeit wird die materialtypische Konstante bei Erreichen eines bestimmten Wertes der Schubspannung bezeichnet (KOLYMBAS 2018, S.101). Sie beschreibt den Widerstand gegenüber seitlich einwirkenden Scherkräften und charakterisiert somit die Bodenfestigung (SOBOTIK et.al 2020, S.265).

Die Scherfestigkeit wurde in Kooperation mit und von einem anderen Masterstudenten (Gerfried Müller) gemessen, da er dieses Thema in seiner Masterarbeit behandelt. Die für die Messungen benutzte Flügelsonde ist für hartes, grobes Material eher ungeeignet, da diese bei Auftreffen auf gröberes Substrat verbiegen oder zerbrechen kann (HAMM 2011, S.3).

Beim Messen selbst ist laut HAMM (2011, S.3) darauf zu achten, dass die Verlängerungsstangen um 180° gegen den Uhrzeigersinn gedreht werden, bevor die Sonde an den Boden angesetzt wird. Mit einem Hammer (siehe Abbildung 25) wird die Flügelsonde anschließend in das Substrat geschlagen, bis die gewünschte Tiefe erreicht ist. Anschließend wird der Drehmomentschlüssel auf die Sonde montiert, 180° im Uhrzeigersinn gedreht und das Ergebnis (die Stangenreibung) von der Anzeigefläche abgelesen. Um den Maximalausschlag abzulesen, wird weiter im Uhrzeigersinn bis zum Bruch gedreht. Die Scherfestigkeit ergibt sich aus Maximalausschlag minus Stangenreibung (HAMM 2011, S.3). Beim Interpretieren der Ergebnisse gilt: je höher der Wert, desto höher die Scherfestigkeit. Es wurden je sechs Messungen pro Beet durchgeführt. Die Erhebung fand von Hr. Müller statt und sind die Ergebnisse seiner Messungen (Kapitel 5.2.4.). Hr. Müller hat einige Aufnahmen an den in dieser Arbeit thematisierten Versuchsflächen vorgenommen. Leider stellte sich heraus, dass das RMH-Substrat äußerst problematisch für die Flügelsonde (das Gerät, mit dem die Scherfestigkeit gemessen wird) war. Die Flügelsonde war aufgrund der Grobkörnigkeit und dem hohen Anteil an teilweise faustgroßen Steinen, kaum bis gar nicht in das Substrat einzuführen. Um eine Beschädigung des Gerätes zu verhindern, wurde die Prüfung der Scherfestigkeit nach nur wenigen Versuchen abgebrochen. Somit liegen keine ausreichenden Messergebnisse vor.



Abbildung 25: Hr. Müller bei der Handhabung der Flügelsonde am Punktsaatbeet (Beet 6), eigene Aufnahme 2019

4.3. Statistik

Statistische Verfahren werden zur Überprüfung von Reliabilität (Zuverlässigkeit des Versuchs) und Validität (Güte des Versuchs) herangezogen (FAHRMEIR et al. 2016, S.10). Die hier angewandte Statistik befasst sich mit der Beschreibung und graphischen Darstellung der Daten sowie der Datenvalidierung und Gewinnung erster Impressionen für die darauffolgende Analyse (FAHRMEIR et al. 2016, S.11). Angewendet wurden der t-Test und die multiple ANOVA im Programm R.

4.3.1. R-Studio: Entwicklungsumgebung für die Statistik

Die Datenauswertung und statistischen Erhebungen der Biomasseproben erfolgen in der Programmiersprache R bzw. der dazugehörigen kostenlosen Umgebung R-Studio (= IDE-

integrated development environment), welche vermehrte Funktionen zur Unterstützung der Entwicklung anbietet (FAHRMEIR et al. 2016, S.529). R-Studio fungiert als Taschenrechner, dem etliche mathematische Funktionen, unter anderem statistische Funktionen wie Mittelwert, Varianz, Minimum oder Maximum zur Verfügung stehen (FAHRMEIR et al. 2016, S.529, S.540).

4.3.2. Markdown: vereinfachte Auszeichnungssprache in R-Studio

Zur besseren Lesbarkeit, Übersicht und Formatierung des Outputs der statistischen Tests kommt Markdown zur Anwendung (GRUBER and LIEPINS 2013). Dieses Programm erlaubt die Befehle „*Knit to HTML*“ und „*Knit to PDF*“ (Umwandlung in eine Auszeichnungssprache) und somit die Veröffentlichung und Errechnung des Codes von R-Studio.

4.3.3. Zweiseitiger t -Test

Für den Vergleich zweier unabhängiger Stichproben unter der Annahme normalverteilter Merkmale wird hier der t-Test herangezogen. Hierbei folgt die Überprüfung der Variablen auf einen Unterschied hinsichtlich ihrer Erwartungswerte (FAHRMEIR et al. 2016, S.477). Der t-Test (zweiseitig; unabhängige Variablen) wurde in dieser Arbeit beim Vergleich der oberirdischen Biomasseproduktion (Trockengewicht) von Beet 4 (A-E) und Beet 6 (A-E) verwendet. Bewertet wird eine Signifikanz bei $p \leq 0,05$ (bei $p \leq 0,01$ wird das Ergebnis als hoch signifikant bewertet), das entspricht $\text{Alpha } \alpha = 0,05 = 5\%$.

4.3.4. Multiple ANOVA

Um das Trockengewicht der oberirdischen Biomasse der einzelnen Reihen untereinander zu vergleichen, wird in dieser Arbeit die multiple ANOVA (mehrfache Varianzanalyse) angewandt. Die Varianzanalyse ist eine Methode, bei der die Unterschiede in den Erwartungswerten in mehreren Gruppen beurteilt werden können. Voraussetzung hierfür ist die Normalverteilung der Zufallsvariablen (FAHRMEIR et al. 2016, S.478). Für die Überprüfung der Normalverteilung (der Daten der getrockneten oberirdischen Biomasse) können drei Tests angewandt werden: Kolmogorow-Smirnow-Test mit Lilliefors-Korrektur ($K = 0.14489$, $p = 0.69449$, Normalverteilung ist gegeben); Shapiro-Wilk-Test ($W = 0.95302$,

$p = 0.68152$ Normalverteilung ist gegeben) und Anderson-Darling-Test ($A = 0.29164$, $p = 0.54503$, Normalverteilung ist gegeben) (HEMMERICH 2018). Alle drei Tests bestätigen die Normalverteilung der Daten der getrockneten oberirdischen Biomasse.

In Tabelle 4 ist dargestellt, welcher Test bzw. welche Methode für welchen Versuch angewandt wurde.

Tabelle 4: Zuordnung der Methoden/ Statistischen Tests zu den einzelnen Versuchen, eigene Erstellung

Versuch	Methode/ Statistischer Test
OB1 - Deckungsverhältnis	Point-Interception Methode
OB2 - Vergleich getrockneter Biomasse im Gewicht	t-Test, ANOVA
UB3 - Wurzelgewicht anhand von Bodenproben	t-Test
UB4 - Wurzelarchitektur (analoge Auswertung)	visuelle Vergleiche mit der Literatur
UB5 - Wurzelarchitektur (digitale Auswertung)	t-Test

5. Resultate

Eine Übersicht zur genauen Zuordnung aller Versuche inklusive Codierung und Zuordnung der Forschungsfragen stellt Tabelle 5 dar. Herangezogen werden Daten aus den beiden Beeten Streusaatbeet (S) und Punktsaatbeet (P) des Versuches in Groß-Enzersdorf (Kapitel 3.2.1.).

Tabelle 5: Zuordnung und Codierung der Versuche, eigene Erstellung

	Codierung	Versuch	Zuordnung Forschungsfragen	Zuordnung Hypothesen
oberirdische Biomasse (OB)	OB1	Deckungsverhältnis	F1	H1.1
	OB2	Vergleich der Trockenbiomasse	F1	H1.1
unterirdische Biomasse (UB)	UB3	Erhebung der Wurzeltrockenmasse	F1	H1.2
	UB4	Analoge Wurzelarchitektur	F2, F3	H1.2, H2, H3
	UB5	Digitale Wurzelarchitektur mittels PyCharm	F1	H1.2
	UB6	Scherfestigkeit	Zusatz	Zusatz

5.1. Oberirdische Biomasse Resultate

5.1.1. Oberirdische Biomasse (OB1) - Deckungsgrad

Bestimmt wurden in Tabelle 6 nach der Point-Interception Methode (Kapitel 4.1.1.) für Beet 4 (Streusaat) folgende Kategorien: G (Gräser), K (Kräuter), B (Beikräuter) und S (Substrat). Für das Verhältnis G/K wurde jeweils ein ganzer Abschnitt (A-E) betrachtet. Für den Bewuchs in Prozent wurden nur Gräser und Kräuter herangezogen.

Tabelle 6: Aufnahmen zum Deckungsverhältnis nach der Point-Interception Methode, eigene Erstellung

Aufnahmen Beet 4	A	B	C	D	E
0	S	S	S	S	S
1	S	S	S	S	S
2	S	S	S	S	S
3	S	S	S	G	S
4	S	S	S	G	S
5	G	S	G	G	K
6	G	G	G	G	K
7	G	G	K	G	K
8	G	G	K	K	K
9	K	K	K	K	K
10	K	K	K	K	B
G/K	70:30	85:15	60:40	50:50	40:60

Durch diese Aufnahme vor der Ernte lässt sich das Verhältnis zwischen Gräser, Kräutern, Beikräutern und Substrat nun grafisch darstellen und vergleichen. Deutlich zu erkennen ist anhand Tabelle 6, dass in allen Beeten (4A-E) das die Anzahl der Treffer mit Substrat den größten Anteil aufweist. Der Anteil an Beikräutern ist bei den randomisierten Stichproben mit nur einer Aufnahme von insgesamt 55 Aufnahmen sehr gering. Die Mischung des Saatgutes ist mit 14(G):16(K) eher ausgeglichen. Keine der Komponenten hat überhandgenommen. Das Verhältnis von Bewuchs zu Substrat liegt bei 31(Bewuchs):24(Substrat). Somit liegt der Bewuchs bei 56,36 % der Fläche.

Nun kommt es jedoch aufgrund der unterschiedlichen Ansaat-Methoden der beiden Beete zu unterschiedlichen Deckungsgraden des Bewuchses. Während beim Streusaatbeet durch die Ausbringungsmethode der Samen die Point-Interception Methode (Kapitel 4.1.1.) angewendet werden kann, herrscht beim Punktsaatbeet eine vorbestimmte, in Reihen angelegte Ordnung, mit je 25 Pflanzen pro m² und jeweils ca. 12 cm Durchmesser (= ca. 113 cm²) pro Pflanze (Kapitel 3.2.2.), welche es ermöglicht die Deckung anhand einfacher Formeln zu berechnen (Kapitel 4.1.1.). In Tabelle 7 sind die Ergebnisse gegenübergestellt.

Tabelle 7: Ergebnisse des Deckungsverhältnisses, eigene Erstellung

	Deckungsverhältnis
Streusaatbeet	56,36%
Punktsaatbeet	28,3%

5.1.2. Oberirdische Biomasse (OB2) - Vergleich getrockneter Biomasse im Gewicht

Für den Vergleich der Beete 4 (Streusaatbeet) und 6 (Punktsaatbeet) wurde der t-Test (Kapitel 4.1.2.) angewandt. Hierfür wurden die Daten der Aufnahmen der getrockneten Biomasse in R-Studio eingespielt. Um mit den Daten weiterarbeiten zu können, wurden diese in Tabelle 8 in die Gruppen „Punktsaat“ und Streusaat“ unterteilt und mit den jeweiligen Daten des Gewichtes („weight“ der Beete 4A-4E und 6A-6E, Kapitel 4.1.2.) der trockenen Biomasse verknüpft:

Tabelle 8: Zugeordnetes Gewicht der Beete 6A-E und 4A-E, in R-Studio, eigene Erstellung

##	group	weight	
## 1	Punktsaat	1437.98	6A
## 2	Punktsaat	853.47	6B
## 3	Punktsaat	742.50	6C
## 4	Punktsaat	614.34	6D
## 5	Punktsaat	926.25	6E
## 6	Streusaat	726.72	4A
## 7	Streusaat	645.35	4B
## 8	Streusaat	482.23	4C
## 9	Streusaat	627.61	4D
## 10	Streusaat	574.26	4E

Nachdem die Daten zusammengeführt waren, wurde der t-Test durchgeführt (siehe Abbildung 26).

```
## Two Sample t-test
##
## data: Beet6 and Beet4
## t = 2.0702, df = 8, p-value = 0.07221
## alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
## -34.59072 641.93872
## sample estimates:
## mean of x mean of y
## 914.908 611.234
```

Abbildung 26: Vergleich des Gewichts der getrockneten Biomasse von Beet 6A-E und Beet 4A-E mittels t-test, eigene Erstellung

Wie in Abbildung 26 zu erkennen ist, liegt der p-Wert bei $p = 0,07221$ und ist somit (bei $\alpha = 5\%$) $p > 0,05$ nicht signifikant. Es gibt keine signifikanten Unterschiede in der Biomasseproduktion (gemessen anhand des Trockengewichtes) zwischen Beet 6A-E (Punktsaatbeet) und Beet 4A-E (Streusaatbeet).

Da die Hypothese H 1.1 (*Die oberirdische Biomasseproduktion ist bei einer Streusaat mit Anthyllis vulneraria und Lolium perenne höher als bei einer Punktsaat mit Lolium perenne*) nun widerlegt ist, stellt sich die Frage, warum das so ist. Um diese Frage zu beantworten, wurden bei Beet 6 (Punktsaatbeet) die jeweiligen Teilabschnitte A – E untereinander verglichen. Dies erfolgte anhand einer ANOVA: zuerst wurden, wie in Abbildung 27 zu erkennen ist, wieder die jeweiligen Daten zugewiesen, wobei Group1 = A, Group2 = B, Group3 = C, Group4 = D und Group5 = E die Teilabschnitte A – E darstellen.

```
## Group1 Group2 Group3 Group4 Group5
## 1 340.43 202.98 190.55 134.24 286.47
## 2 246.83 139.28 100.16 131.76 162.72
## 3 349.89 132.60 176.14 132.93 116.53
## 4 163.27 168.34 125.07 90.40 112.58
## 5 337.56 210.27 150.58 125.01 247.95
```

Abbildung 27: Gruppierungen für ANOVA in R-Studio, eigene Erstellung

Nachdem die Daten den Teilflächen zugeordnet wurden, konnte nun mit dem Befehl „summary“ der Min., erstes Quantil, Median, Mean, drittes Quantil und der Max. berechnet werden (Abbildung 28).

```
summary(Combined_Groups) #min,median,mean,max
```

```
##      Group1      Group2      Group3      Group4
## Min.   :163.3  Min.   :132.6  Min.   :100.2  Min.   : 90.4
## 1st Qu.:246.8  1st Qu.:139.3  1st Qu.:125.1  1st Qu.:125.0
## Median :337.6  Median :168.3  Median :150.6  Median :131.8
## Mean   :287.6  Mean   :170.7  Mean   :148.5  Mean   :122.9
## 3rd Qu.:340.4  3rd Qu.:203.0  3rd Qu.:176.1  3rd Qu.:132.9
## Max.   :349.9  Max.   :210.3  Max.   :190.6  Max.   :134.2
##      Group5
## Min.   :112.6
## 1st Qu.:116.5
## Median :162.7
## Mean   :185.2
## 3rd Qu.:247.9
## Max.   :286.5
```

Abbildung 28: Vergleich der Teilabschnitte A-E von Beet 6, in R-Studio, eigene Erstellung

Anschließend wurde die ANOVA durchgeführt (siehe Kapitel 4.3.4.). In Abbildung 29 ist zu sehen, dass $F(4,20) = 6,329$ und $p = 0,00185$ und somit signifikant ist, weil $p < 0,05$. Es gibt also demnach bei den Teilabschnitten 6A - 6E einen Teilabschnitt (= Group), welche sich von den anderen abhebt.

```
##           Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
## ind           4  79515   19879   6.329 0.00185 **
## Residuals    20  62818    3141
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Abbildung 29: ANOVA in R-Studio, eigene Erstellung

Um den Teilabschnitt auszuspiiren, welcher diese hohe Signifikanz verursacht (und damit die Hypothese H 1.1 widerlegt), wurde aufgrund der Betrachtung der Zahlen der Zusammenfassung (siehe Abbildung 28) Teilabschnitt A aus der ANOVA herausgenommen. Anhand Abbildung 30 ist zu erkennen, dass $p = 0,224$ und somit $p > 0,05$ und damit nicht mehr signifikant ist. Es gibt also zwischen den Beeten 6B - 6E keine Unterschiede.

```
##           Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
## ind           3  11114    3705   1.623 0.224
## Residuals    16  36531    2283
```

Abbildung 30: ANOVA ohne Beet A in R-Studio, eigene Erstellung

Da nun anhand der Statistik erkennbar ist, dass Teilabschnitt 6A offensichtlich für die widerlegte Hypothese verantwortlich ist, folgt nun ein Gegenteil in dem die Teilabschnitte 6

B-E mit den Teilabschnitten 4 B-E anhand eines t-Tests verglichen werden, um zu sehen, ob die Hypothese immer noch widerlegt wird (Abbildung 31).

```
## Two Sample t-test
##
## data: Beet6ohneA and Beet4ohneA
## t = 2.6108, df = 6, p-value = 0.04008
## alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
## 12.6691 390.8859
## sample estimates:
## mean of x mean of y
## 784.1400 582.3625
```

Abbildung 31: Gegentest mittels t-Test Beet 6 B-E vs. Beet 4 B-E in R-Studio, eigene Erstellung

Bei Betrachtung des t-Tests mit herausgerechneten Teilflächen 6A und 4A ist zu erkennen, dass $p = 0,04008$, also $p < 0,05$ ist und somit signifikant. Es gibt also Unterschiede in der oberirdischen Biomasseproduktion bei Herausrechnen der Teilflächen 6A und 4A (gemessen anhand des Trockengewichtes). In Tabelle 9 sind alle Ergebnisse zusammengefasst.

Tabelle 9: Zusammengefasste Ergebnisse des Vergleichs der getrockneten Biomasse im Gewicht, eigene Erstellung

	p	Signifikanz	Ergebnis
t-Test: Beet 4(A-E) und Beet 6(A-E)	0,07221	nicht gegeben: $p > 0,05$	Es gibt keine Unterschiede
ANOVA: Beet 6A-E	0,00185	gegeben: $p < 0,05$	Es gibt Unterschiede
ANOVA: Beet 6B-E	0,224	nicht gegeben: $p > 0,05$	Es gibt keine Unterschiede
t-Test: Beet 4(B-E) und Beet 6(B-E)	0,04008	gegeben: $p < 0,05$	Es gibt Unterschiede

Bei Betrachtung der Ergebnisse des Gewichts der oberirdischen Biomasse in Bezug auf den Deckungsgrad (Kapitel 5.1.1.) ist folgende Aussage zu treffen: Beim Punktsaatbeet (Beet 4) liegt bei einer Hochrechnung des Gewichtes im Mittelwert der getrockneten Biomasse auf 56,36 % der Fläche (Kapitel 4.1.1.), die Ernte bei 1.822,057 g. Das Streusaatbeet hat im Vergleich einen Mittelwert von 611,234 g der getrockneten Biomasse bei 56,36% Bewuchs.

Tabelle 10 zeigt die Mittelwerte der getrockneten Biomasse für Beet 4(B-E) und Beet 6(B-E).

Tabelle 10: Mittelwerte der getrockneten Biomasse (4B-E und 6B-E) von Versuch O2, eigene Erstellung

	Mittelwert getrocknete Biomasse
Beet 4B-E	582,4g
Beet 6B-E	784,1g

5.2. Unterirdische Biomasse Resultate

5.2.1. Unterirdische Biomasse (UB3) - Wurzelgewicht anhand von Bodenproben

Die in Tabelle 11 dargestellten Aufnahmen dienen als Grundlage für einen t-Test (Abbildung 32) zwischen den Mittelwerten des Trockengewichts der Beete 4A und 6A. Hier ergibt sich ein p-Wert von $p = 0,6101$ und somit $p > 0,05$, also nicht signifikant. Daher weist das Trockengewicht der Bodenproben von Beet 6 und Beet 4 keinen statistischen Unterschied auf.

Tabelle 11: Aufnahmen der Bodenproben, eigene Erstellung

	Nassgewicht in g (Substrat + Wurzel)	Nassgewicht in g (nur Wurzeln)	Trockengewicht in g (Substrat + Wurzel)	Trockengewicht in g (nur Wurzeln)
Mittelwert (n=x) Beet 4A	9196,3	37,2	8073,2	24,1
Mittelwert (n=x) Beet 6A	8935,0	20,7	8382,7	16,8

```
##
## Two Sample t-test
##
## data: Beet6ErdeTrocken and Beet4ErdeTrocken
## t = 0.55233, df = 4, p-value = 0.6101
## alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
## -1246.437 1865.503
## sample estimates:
## mean of x mean of y
## 8382.733 8073.200
```

Abbildung 32: t-Test über die Mittelwerte des Trockengewichts der Beete 4A und 6A, eigene Erstellung

5.2.2. Unterirdische Biomasse (UB4) - Wurzelarchitektur (analoge Auswertung)

Bei der analogen Auswertung der Wurzelarchitektur kamen folgende Parameter zum Einsatz:

Vergleich A) Vergleich zwischen gezeichneten Wurzeln und Wurzelbildern aus der Literatur bezüglich der Wuchsform

Vergleich B) Vergleich von einzelnen Sequenzen der gezeichneten Wurzeln mit den Wurzelbildern der Literatur

Vergleich C) Vergleich zwischen gezeichneten Wurzeln: Punktsaatbeet vs. Streusaatbeet

Bei sämtlichen selbstgezeichneten Darstellungen ist anzumerken, dass im Gegensatz zu den Darstellungen aus der Literatur, immer nur 3-5 cm Tiefe dargestellt wurden (Kapitel 4.2.3.). Die Darstellungen der Literatur bilden jeweils die gesamte Wurzelmasse einer Pflanze ab. Daher erscheinen die selbstgezeichneten Wurzelarchitekturen auf den ersten Blick weniger dicht.

5.2.2.1. Vergleich A - Vergleich der Wurzelbilder (analoge Darstellung) und Wurzelbilder aus der Literatur bezüglich der Wuchsform

Für den Vergleich zwischen den gezeichneten Wurzeln und den Wurzelbildern aus der Literatur werden die Wurzelformen von SOBOTIK (2020) herangezogen (SOBOTIK et.al 2020, S.30). In Abbildung 33 ist rechts die eigene Zeichnung (P6- Punktsaat: *Lolium perenne*) und links die abgezeichnete Wurzelarchitektur von KUTSCHERA (1960) (*Lolium perenne* nach KUTSCHERA 1960) dargestellt. Zusätzlich wurde noch bei der Zeichnung von KUTSCHERA (1960) die Wurzelform „Zylinder-, verkehrt-kegelförmig“ (nach SOBOTIK 2020) mit einer roten Linie eingezeichnet. Bei der selbsterstellten Zeichnung (links; P6- Punktsaat: *Lolium perenne*) ist diese Wurzelform (Zylinder-, verkehrt-kegelförmig) auch zu erkennen, sie ist jedoch weniger breit als die ursprüngliche von SOBOTIK (2020) beschriebene Wurzelform und es bildet sich zusätzlich direkt anschließend (nach 20 cm Tiefe) noch ein Zylinder mit starken Verzweigungen ab.

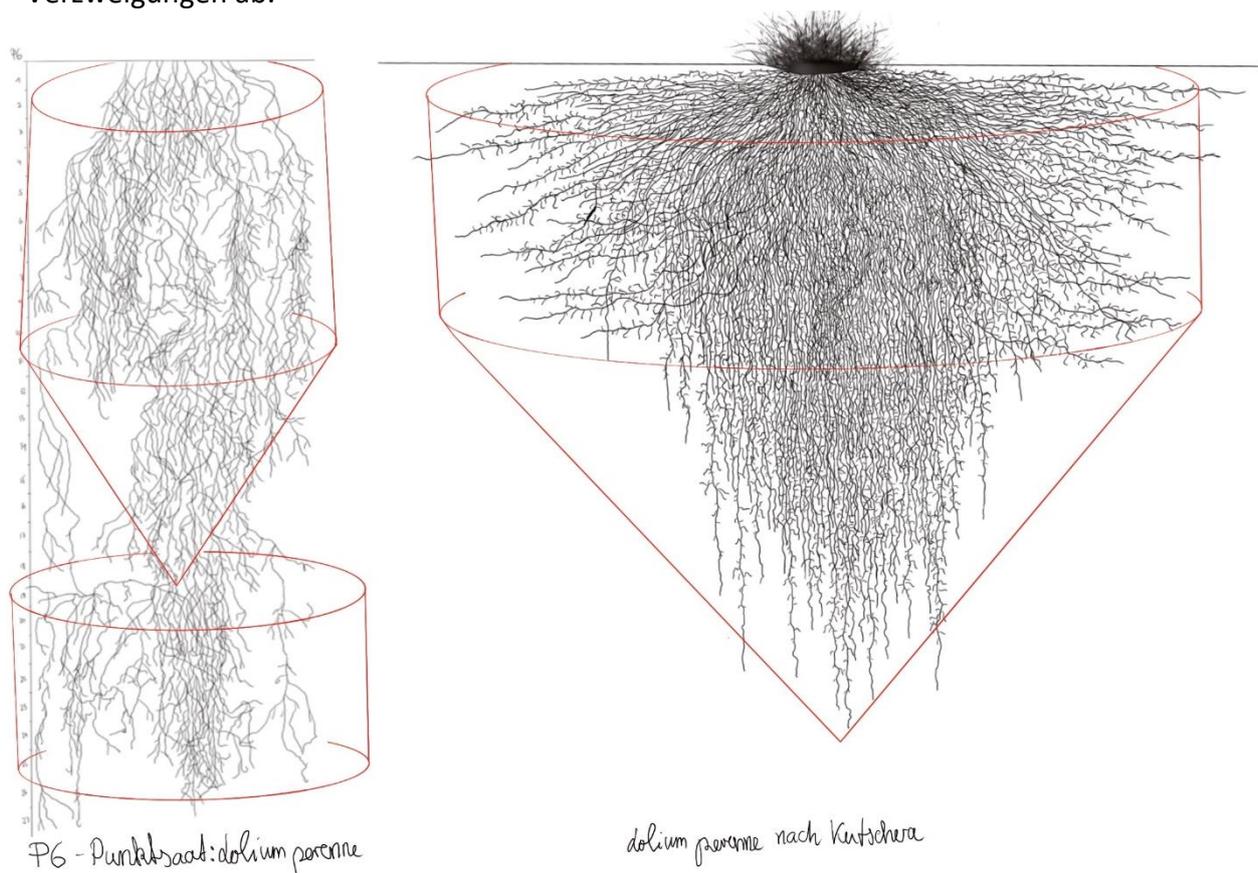
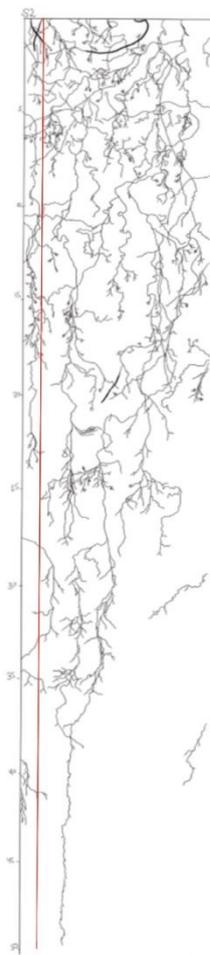


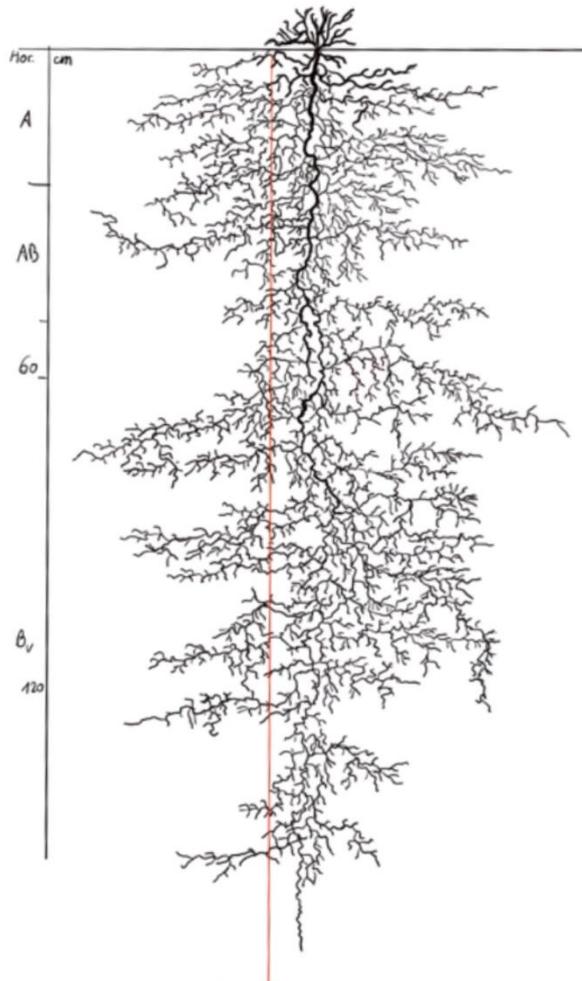
Abbildung 33: Vergleich der Wurzelformen: P6 selbstgezeichnet (links) vs. reproduzierter Zeichnung nach KUTSCHERA 1960 (rechts), eigene Erstellung 2020

Auch der Abgangswinkel der Wurzeln der selbstgezeichneten Darstellung (links) ist wesentlich steiler als jener in der Darstellung der Wurzelarchitektur von KUTSCHERA (1960, rechts) in Abbildung 33.

Abbildung 34 zeigt den Vergleich zwischen *Anthyllis vulneraria* selbstgezeichnet (links; S2, *Streusaatbeet: Anthyllis vulneraria + Lolium perenne*) und *Anthyllis vulneraria* nach SOBOTIK 2020 (rechts; *Anthyllis vulneraria nach SOBOTIK 2020*). Zusätzlich wurden bei beiden Zeichnungen die Wurzelform „Strangförmiger Wurzeltyp“ (Kapitel 3.1.2.) nach SOBOTIK (2020) mit einer roten Linie eingezeichnet. Bei der selbstgezeichneten Darstellung (links; S2, *Streusaatbeet: Anthyllis vulneraria + Lolium perenne*) ist genau wie in der Zeichnung nach SOBOTIK 2020 (rechts; *Anthyllis vulneraria nach SOBOTIK 2020*) eindeutig der strangförmige Wurzeltyp erkennbar. Ein Unterschied in der Abbildung 34 ist, dass die selbstgezeichnete Darstellung (links) keine herausstechende dominante Polwurzel abbildet (dazu mehr in Kapitel 6.1.2.). Die Seitenwurzelbildung ist aber wie bei der Darstellung von SOBOTIK (2020, rechts) auch eher gleichmäßig.



S2-Strausenart Beet
Anthyllis vulneraria +
Galium perenne



Anthyllis vulneraria
 nach SOBOTIK

Abbildung 34: Vergleich der Wurzelformen: S2 selbstgezeichnet (links) vs. reproduzierter Zeichnung von SOBOTIK 2020 (rechts), eigene Erstellung 2021

5.2.2.2. Vergleich B - Vergleich von einzelnen Sequenzen der gezeichneten Wurzeln mit Wurzelbildern aus der Literatur

Eine Vergrößerung einzelner kleiner Sequenzen (A-C) der Zeichnungen in Abbildung 35 zeigen unterschiedliche Wurzelspitzen. Bei der selbstgezeichneten Darstellung (links: S1-Streusaat mit *Lolium perenne* und *Anthyllis vulneraria*) sind zwei verschiedene Wurzeln (A und B) zu erkennen. Die Wurzel aus Sequenz A gehört eindeutig zu einer *Anthyllis vulneraria* Pflanze aus S1 (Streusaatbeet), wobei die Wurzel aus Sequenz B nicht eindeutig zugeordnet werden konnte. Klar ist jedoch, dass sie auf Grund ihrer Form nicht zu *Anthyllis vulneraria* oder *Lolium perenne* gehört. Vermutet wird eine Zugehörigkeit zu einem versuchsfremden Beikraut.

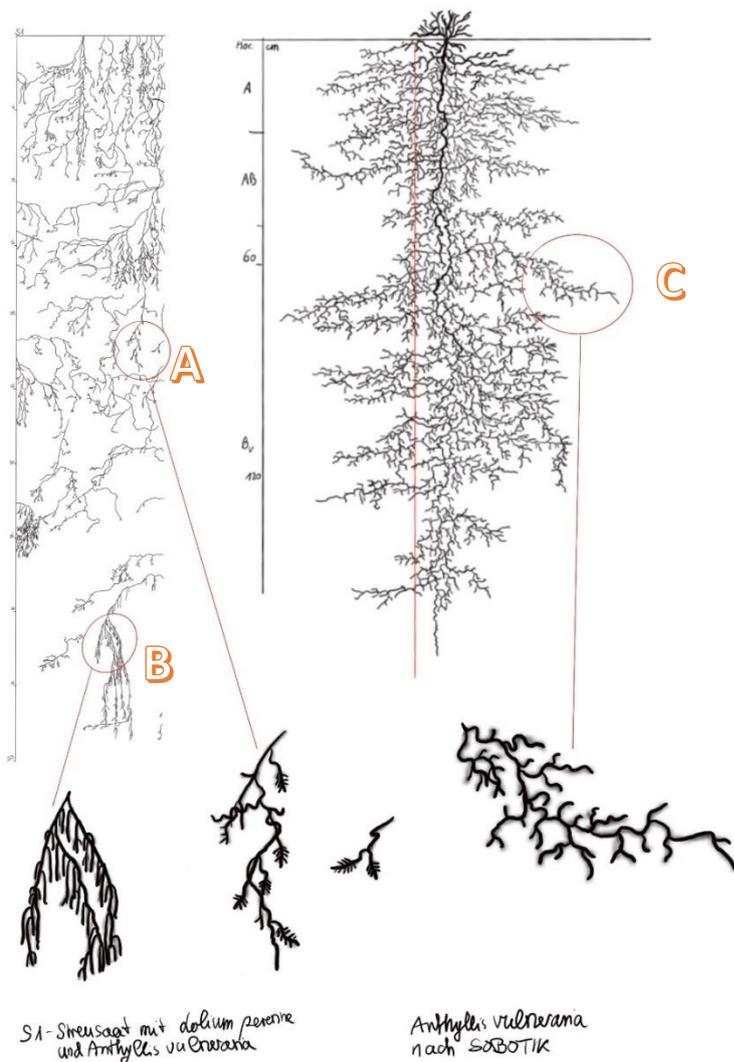


Abbildung 35: links: eigene Darstellung, rechts: reproduzierte Darstellung von ANBOTIK 2020: Sequenzen A-C einzelner Wurzeln zum Vergleich, eigene Erstellung 2021

Beim Vergleich von Sequenz A und C (Abbildung 35) ist ebenfalls ein Unterschied zu erkennen. Während in Sequenz A (links: *S1- Streusaat mit Lolium perenne und Anthyllis vulneraria*) an den Wurzelspitzen sehr feine Haarwurzeln zu erkennen sind, ist bei Sequenz C (rechts: *Anythllis vulneraria nach SOBOTIK 2020*) nichts dergleichen abgebildet. Ausgeschlossen ist, dass dies am Maßstab des Zeichnens liegt, da die selbstgezeichneten Darstellungen und auch die Darstellungen nach SOBOTIK (2020) auf der Methode von KUTSCHERA (KUTSCHERA 1960, S.103) basieren (Kapitel 4.2.2.).

5.2.2.3. Vergleich C - Vergleich der Wurzelbilder: Punktsaatbeet vs. Streusaatbeet

Bereits beim Zeichnen der unterirdischen Biomasse wurde sehr deutlich, dass *Lolium perenne* mit ihren faserförmigen Wurzeln (Kapitel 3.1.2.) beim Punktsaatbeet ein wesentlich ausgeprägteres und dichteres Wurzelsystem bildet. Anhand des visuellen Vergleichs in Abbildung 36 hat das Streusaatbeet (rechts: *S3- Streusaatbeet Lolium perenne und Anthyllis vulneraria*) eine gleichmäßiger verteilte Wurzelmasse, welche eher untypisch für Pfahlwurzler ist, da diese eher Dominant sind und sich von den Feinwurzeln deutlich abheben (Kapitel 3.1.4.). Erkennbar sind die Wurzeln von *Anthyllis vulneraria* (rechts: *S3- Streusaatbeet: Anthyllis vulneraria und Lolium perenne*), die deutlich tiefer wurzeln als *Lolium perenne* (links: *P4- Punktsaatbeet: Lolium perenne*). *Anthyllis vulneraria* bildet an den Wurzelspitzen nochmals sehr feine Wurzelhaare aus (in Abbildung 35, Sequenz A; Kapitel 5.2.2.1) ausführlicher dargestellt sind).

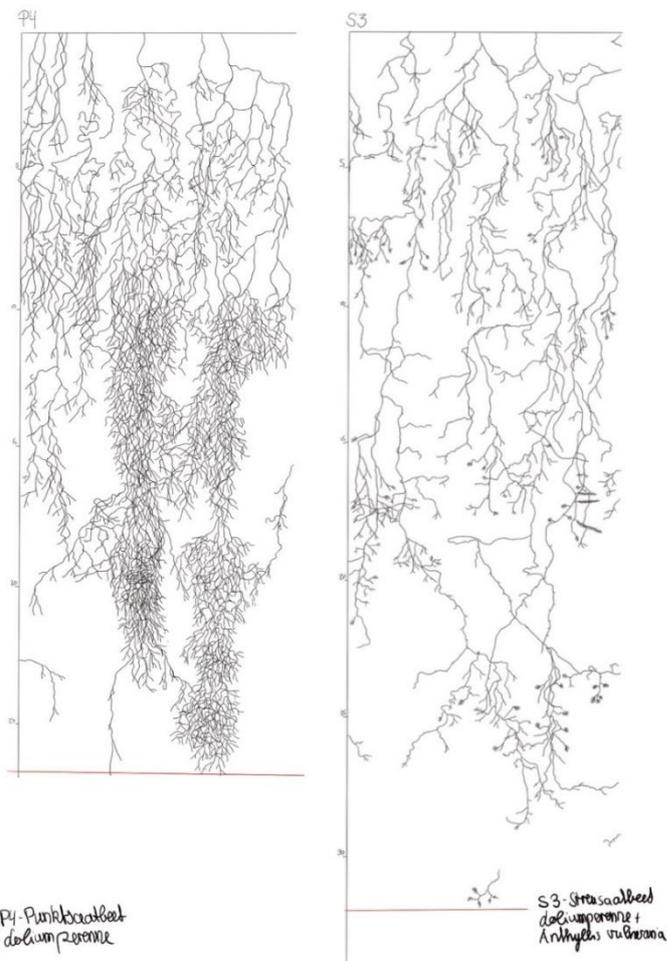


Abbildung 36: Gegenüberstellung der Wurzelarchitektur von P4 und S3, eigene Erstellung BLECHA 2021

5.2.3. Unterirdische Biomasse (UB5) - Wurzelarchitektur (digitale Auswertung)

Das Darstellen der Wurzelzeichnungen durch PyCharm erlaubt das Errechnen des prozentuellen Anteils von Farbe. Abbildung 37 zeigt den Plot des Profils P4 (Punktsaatbeet) ohne herausgerechneter Hintergrundlinien.

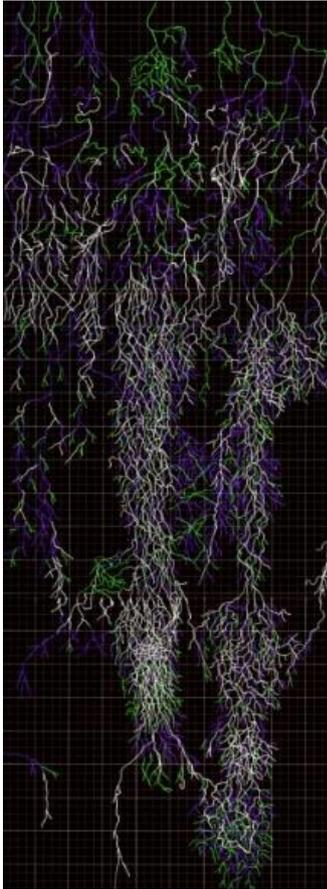


Abbildung 38: Plot P4 aus PyCharm ohne herausgerechneten Kästchen, BLECHA Markus 2020

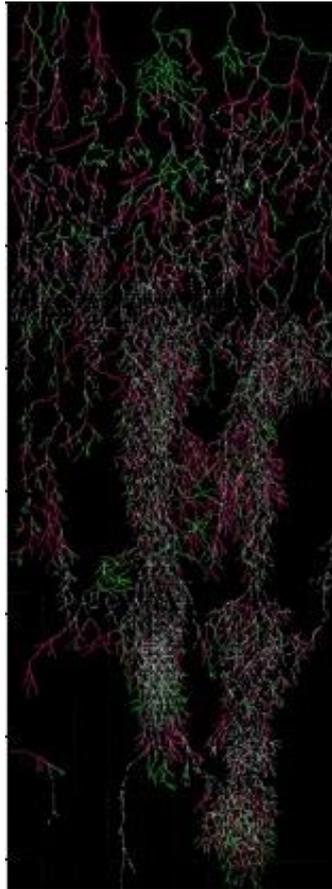


Abbildung 37: Plot P4, Pycharm mit herausgerechneten Kästchen, BLECHA Markus 2020

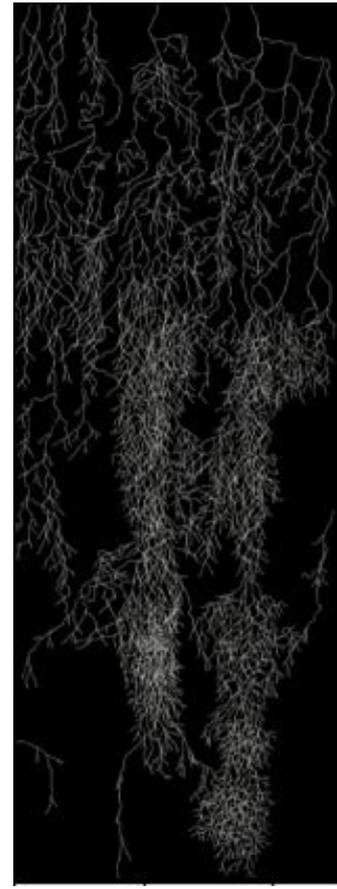


Abbildung 39: Plot P6, Pycharm mit digitaler Zeichnung, BLECHA Markus 2021

Der Plot des Profils P6 ist in Abbildung 38 erkennbar, allerdings lassen sich Fehlerquellen erkennen (z.B. werden die Kästchen des Papiers weggerechnet), welche dazu führen, dass die Prozentzahlen nicht exakt sind. Durch das Mitrechnen der Kästchen des Papiers (Abbildung 37) steigt die prozentuelle Bedeckung des Images mit Farbe erheblich. Werden die Kästchen weggerechnet (Abbildung 38), kommt jedoch ein anderer Faktor der Ungenauigkeit auf: die unterschiedlichen Farben, mit denen die jeweiligen Schichten der Wurzeln gezeichnet wurden (Kapitel 4.2.3.), da nun teilweise Linien, welche in Lila gezeichnet wurden oder wo vorher ein Kästchen am Papier war, einfach verschwinden, oder aber die Kästchen teilweise nicht korrekt weggerechnet werden. Aus diesem Grund wurden sämtliche Zeichnungen, wie in Abbildung 39 dargestellt, nochmals digital per Hand abgezeichnet (Kapitel 4.2.4.) und abermals ausgewertet.

In Tabelle 12 sind die Ergebnisse der Bedeckung des jeweiligen Bildes mit Farbe (Durchwurzelungsgrad in %) dargestellt. Aufgenommen wurden die Originalaufnahmen mit herausgerechneten Kästchen (Abbildung 38) und die digitalen Darstellungen (Abbildung 39). Die erste Version ohne herausgerechneten Kästchen (Abbildung 37) wurde aufgrund der extrem hohen Fehlerquote nicht in den Ergebnissen berücksichtigt.

Tabelle 12: Prozentanteil der Farbe im Image mit original und digitalen Darstellungen, eigene Erstellung

Profil	originale Darstellung: Anteil der Farbe des Images [%]	digitale Darstellung: Anteil der Farbe des Images [%]	Gesamtfläche des Images [cm]	Mittelwerte: Anteil der Farbe der Images [%]
S1	29,14	15,53	50 x 10	12,59
S2	25,07	12,74	50 x 10	
S3	27,94	9,49	50 x 10	
		Hochrechnung:	Hochrechnung:	
P4	48,94	31,65 → 17,09	27 x 10 → 50 x 10	12,72
P5	41,99	19,37 → 10,46	27 x 10 → 50 x 10	
P6	48,68	19,65 → 10,61	27 x 10 → 50 x 10	

Die Fläche des Images ist vom jeweiligen Beet abhängig. Beim Streusaatbeet (S1-S3) wurzeln die Pflanzen auf bis zu 50 cm Tiefe, während beim Punktsaatbeet (P4-P6) die maximale Tiefe nur 27 cm beträgt (Tabelle 12). Als Ergebnis festzuhalten ist die höhere Prozentzahl der Wurzelanteile beim Punktsaatbeet (P4-P6), welche jedoch mit der wesentlich kleineren Fläche korreliert. Um diesen Fehler zu umgehen, wurde der Anteil der Farbe (in Prozent) der digitalen Darstellungen von P4-P6 auf dieselbe Fläche wie S1-S3 hochgerechnet.

Bei dieser Hochrechnung von P4-P6 auf 50 cm x 10 cm Fläche ergeben sich sehr ähnliche Mittelwerte. Um die Signifikanz zu prüfen, erfolgte ein t-Test (Abbildung 40), mit dem Ergebnis, dass $p = 0,9644$ und somit $p > 0,05$, also nicht signifikant ist. Es gibt demnach keine Unterschiede in der prozentualen Verteilung der Wurzeln; des Durchwurzelungsgrades (gemessen anhand der Image Einspielung in PyCharm).

```
Welch Two Sample t-test

data:  s and p
t = -0.047673, df = 3.8134, p-value = 0.9644
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -8.050639  7.783973
sample estimates:
mean of x mean of y
 12.58667  12.72000
```

Abbildung 40: t-Test zur Überprüfung der statistischen Relevanz der Ergebnisse aus Tabelle 6, eigene Erstellung in R-Studio

5.2.4. Wurzeltiefe

Anhand der Zeichnungen kann die Wurzeltiefe an Tabelle 13 abgelesen werden:

Tabelle 13: Vergleich der Wurzeltiefe Punktsaat vs. Streusaat, eigene Erstellung

	Tiefe	Mittelwert
P1	27 cm	26 cm
P2	25 cm	
P3	27 cm	
S4	36 cm	45 cm
S5	50 cm	
S6	49 cm	

5.2.4. Unterirdische Biomasse (UB6) – Scherfestigkeit

Die Messung der Scherfestigkeit wurde von Gerfried Müller im Zuge seiner eigenen Masterarbeit (derzeit noch nicht fertiggestellt) aufgenommen. Die vorliegenden Ergebnisse sind hier der Vollständigkeit halber angeführt, jedoch mussten die Messungen abgebrochen werden.

Anhand Tabelle 14 ist ersichtlich, dass je 6 Messungen im Rahmen seiner Masterarbeit von Gregor Müller pro Beet durchgeführt wurden. Durch den hohen Anteil an grobem Material im RMH-Substrat sind die Messungen aufgrund der gezielt ausgewählten Stellen (wo so wenig grobes Material wie möglich zu sehen war) jedoch ungenau und nicht aussagekräftig. Die Werte bei Beet 6A gehen vermutlich so weit auseinander, weil durch die Grabungen der Versuche U3 (Wurzelgewicht anhand von Bodenproben) und U4 (Analoge Wurzelarchitektur) das Erdreich teilweise schon sehr gelockert war.

Tabelle 14: Ergebnisse der Scherfestigkeitsmessung, Gemessen von MÜLLER, eigene Erstellung

Messung in Nm	1	2	3	4	5	6
Beet 4A	52	47	48	57	53	51
Beet 6A	28	14	12	48	40	38
Rasen (Vergleichswert)	46	47	50	48		

6. Diskussion

Die Kapitelstruktur der Diskussion orientiert sich an den Forschungsfragen (siehe Kapitel 2.0.), die nachfolgend beantwortet werden. Zur Übersicht sind hier die Forschungsfragen und ihre Codierung nochmals aufgelistet:

- F1 Ist die unterirdische und oberirdische Biomasseproduktion bei einer Streusaat höher als bei einer Punktsaat?**
- F2 Lassen sich aufgrund des RMH-Substrates in der Wurzelarchitektur von *Anthyllis vulneraria* im Streusaatbeet Unterschiede zu *Anthyllis vulneraria* auf natürlichem Substrat (nach SOBOTIK 2020) erkennen?**
- F3 Lassen sich aufgrund des RMH-Substrates in der Wurzelarchitektur von *Lolium perenne* Unterschiede zu *Lolium perenne* auf natürlichem Substrat (nach der Methode von KUTSCHERA 1960) erkennen?**

Die Versuche für diese Arbeit beruhen auf einer Versuchsanlage zur Dissertation von DI Minixhofer über Anwendungen verschiedener Substrate, wie etwa das RMH-Bauschuttsubstrat in der Vegetationstechnik und Ingenieurbiologie. Diese Masterarbeit ist die Erste in einer Reihe, ein Vergleich der Beete über mehrere Perioden und Masterarbeiten hinweg ist vorgesehen, was deutlichere Ergebnisse erwarten lässt. Tabelle 15 erfasst zwecks Übersichtlichkeit nochmals die Codierungen.

Tabelle 15: Zusammenfassung der Codierung zur besseren Übersicht, eigenen Erstellung

	Codierung	Versuch
oberirdische Biomasse (OB)	OB1	Deckungsverhältnis
	OB2	Vergleich der Trockenbiomasse
unterirdische Biomasse (UB)	UB3	Erhebung der Wurzeltrockenmasse
	UB4	Analoge Erfassung der Wurzelarchitektur
	UB5	Digitale Erfassung der Wurzelarchitektur mittels PyCharm
	UB6	Scherfestigkeit

6.1. Forschungsfrage F1: Oberirdische und unterirdische Biomasseproduktion

6.1.1. Oberirdische Biomasse

Aufgrund der unterschiedlichen Ansaat-Methoden entstand eine unterschiedliche Verteilung der Individuen, und somit sind bei den Aufnahmen für OB1 (*Deckungsverhältnis*) unterschiedliche Erhebungsmethoden nötig (Kapitel 4.1.1.). Während beim Punktsaatbeet immer genau 25 Pflanzen pro m² eingesät wurden, gibt es beim Streusaatbeet keine vorbestimmte Anzahl der Pflanzen.

Zur Beantwortung der **Forschungsfrage F1** (in Bezug auf die oberirdische Biomasse) werden zusätzlich zu OB1 (*Deckungsverhältnis*) die Ergebnisse von OB2 (*Vergleich getrockneter Biomasse im Gewicht*) herangezogen (Kapitel 5.1.1.). Entgegen der Erwartungshaltung wurden zwischen dem Streusaatbeet (Beet 4(A-E)) und dem Punktsaatbeet (Beet 6(A-E)) keine Unterschiede in der Biomasseproduktion festgestellt. Erwartet wurde anhand der Ergebnisse von OB1 (*Deckungsverhältnis*; Kapitel 5.1.1.), dass die Biomasse des Streusaatbeetes aufgrund der Aussaatmethode und der zusätzlichen Pflanzenart (*Anthyllis vulneraria*) höher ist als die Biomasse des Punktsaatbeetes, wie auch in der **Hypothese H 1.1** angenommen wurde: *Die oberirdische Biomasseproduktion ist bei einer Streusaat mit Anthyllis vulneraria und Lolium perenne höher als bei einer Punktsaat mit Lolium perenne.* Diese Hypothese wurde nicht bestätigt.

Bei einem der Kontrollbesuche ergab sich eine interessante Beobachtung: eine benachbarte (versuchsfremde) Fläche wurde mit einer Beregnungsanlage bewässert, welche auch Teilfläche 6A ungewollt auf unbestimmte Zeit mitbewässert hat. Abbildung 41 zeigt eine Drohnenaufnahme vom 6.4.2020, auf dem die Beregnungsanlage zu erkennen ist, welche (auf Nachfrage bei den Gärtner*innen) für den Hang gegenüber bestimmt war. Bei Beet 6 wurde die Sektion 6A also mitberegnet. Wie häufig diese Zusatzbewässerung erfolgte, konnte nicht nachvollzogen werden.



Abbildung 41: Drohnenaufnahme vom 6.4.2020, Bewässerung von Teilfläche 6A, eigene Aufnahme 2020

Die höhere Biomassenproduktion in Teilfläche 6A ist vermutlich auf diese zusätzliche Bewässerungsgaben zurückzuführen. Eine höhere Biomassenproduktion bedeutet ein höheres Gewicht in der getrockneten Biomasse, welche für den statistischen Test herangezogen wurde. Um diese Fehlerquelle zu umgehen, und die **Forschungsfrage F1** eindeutiger beantworten zu können, wurden die Teilflächen 6A und 4A herausgerechnet. Hierbei ergibt die Statistik von Versuch OB2 (Kapitel 5.1.2.), dass Unterschiede vorhanden sind. Jene werden wie folgt zusammengefasst: werden die Mittelwerte in Tabelle 10 (siehe Kapitel 5.1.2.) betrachtet, produziert das Punktsaatbeet (Beet 6B-E) mehr Biomasse als das Streusaatbeet (Beet 4B-E). Es ist unklar, ob andere Teilflächen von Beet 6 auch mitberechnet wurden oder nicht. Interpretiert werden diese Ergebnisse so, dass nicht nur durch die Bewässerung bei der Punktsaat in Beet 6A mehr Biomasse als erwartet erzeugt wurde,

sondern generell (auch bei Herausrechnen der berechneten Fläche 6A) die Punktsaat (Beet 6) gegenüber der Streusaat (Beet 4) eine höhere Biomasseproduktion aufweist als angenommen. Im Streusaatbeet (Beet 4) wurde aufgrund der Saatmethode und der zusätzlichen Art mehr Biomasse erwartet (vgl. Hypothese H 1.1) als im Punktsaatbeet (Beet 6). Bei Betrachtung von Tabelle 8 (Kapitel 5.1.1.) ist das Deckungsverhältnis des Streusaatbeetes (Beet 4) mit ca. 56% wesentlich höher als das des Punktsaatbeetes (Beet 6) mit ca. 28%. Es gibt also weniger Deckung beim Punktsaatbeet (Beet 6), aber einen besseren Zuwachs von Biomasse gegenüber dem Streusaatbeet (Beet 4), wo zwar eine höhere Deckung gegeben ist, jedoch weniger Biomasse erzeugt wurde. Dies könnte einerseits an der Konkurrenz durch die zweite Pflanzenart (*Anthyllis vulneraria*) entstanden sein und andererseits durch die versuchsfremde Bewässerung.

Die oben angeführten Gründe ließen kein deutliches Ergebnis erzielen. Die **Forschungsfrage F1** (in Bezug auf die oberirdische Biomasse) kann aufgrund der Fremdeinwirkung nicht schlüssig beantwortet werden. Empfohlen wird eine genaue Beobachtung und Rücksprache mit den Gärtner*innen vor Ort bei Folgeuntersuchungen, um Fehleinwirkungen auszuschließen.

6.1.2. Unterirdische Biomasse

Um die **Forschungsfrage F1** (*Ist die unterirdische und oberirdische Biomasseproduktion bei einer Streusaat höher als bei einer Punktsaat?*) in Bezug auf die unterirdische Biomasse beantworten zu können, wurden das Wurzelgewicht (UB3: *Wurzelgewicht anhand von Bodenproben*) sowie die Wurzelarchitekturen verglichen. Hierbei wurden die analog erfasste Wurzelarchitektur (UB4, Vergleich C) und die digital erfasste Wurzelarchitektur (UB5) herangezogen und miteinander verknüpft.

Das Trockengewicht der Bodenproben (inkl. Wurzeln) von der Streusaat im Vergleich zur Punktsaat weist keine statistischen Unterschiede auf (Kapitel 5.2.1.). Dieses Ergebnis war zu erwarten, da die mittlere Wurzelmasse aller Bodenproben mit 20,45 g verhältnismäßig gering ausfiel und somit keine bedeutende Auswirkung auf das Gesamt-Mittelgewicht von 8227,95 g (Substrat inkl. Wurzeln) hatte.

Die **Hypothese H 1.2** (*Die unterirdische Biomasseproduktion ist bei einer Streusaat mit Anthyllis vulneraria und Lolium perenne höher als bei einer Punktsaat mit Lolium perenne.*) kann anhand der statistischen Ergebnisse von Versuch UB3 (*Wurzelgewicht anhand von Bodenproben*) nicht bestätigt werden, da es keine signifikanten Unterschiede gibt.

Die Ergebnisse der visuellen Betrachtungsweise und Einschätzung der Wurzelarchitektur UB4 (*Analog erfasste Wurzelarchitektur, Vergleich C*) widerlegen **Hypothese H 1.2**, da sich beim Punktsaatbeet eine wesentlich höhere Wurzelichte abzeichnet als beim Streusaatbeet (Kapitel 5.2.2.3.). Der rein visuelle Vergleich liefert keine konkret messbaren Zahlen für eine statistische Auswertung, daher wurde auch ein digitaler Vergleich herangezogen.

Anhand digitaler Einspielungen der zuvor gezeichneten und aufbereiteten Wurzelarchitekturen in das Programm PyCharm (Versuch UB5: *Digitale Wurzelarchitektur*) konnten statistisch verwertbare Daten erzeugt werden (Kapitel 5.2.3.). Durch diesen Zugang kann die **Hypothese H 1.2** nun anhand eines t-Tests (Abbildung 40) eindeutig widerlegt werden, da die mit Wurzeln bedeckte Fläche (in Prozent) des Punktsaatbeetes keine statistischen Unterschiede zur mit Wurzeln bedeckten Fläche des Streusaatbeetes aufweist (Kapitel 5.2.3.).

Die **Forschungsfrage F1** (bezogen auf die unterirdische Biomasse) kann damit eindeutig mit „NEIN“ beantwortet werden, da die Bedeckung der Wurzeln von S 1 - 3 im Vergleich zu P 4 - 5 (in Prozent) keine statistischen Unterschiede (Abbildung 40) aufweisen. Zusätzlich wird diese Antwort noch durch den Versuch UB4 (*Wurzelarchitektur (analoge Auswertung)*) gestützt, bei dem das Gewicht der Bodenproben ebenfalls keine signifikanten statistischen Unterschiede aufwies. Die analoge Erhebung der Wurzelarchitektur brachte zwar zutage, dass die Wurzelichte beim Punktsaatbeet (Beet 6) subjektiv betrachtet leicht höher als beim Streusaatbeet (Beet 4) lag, jedoch wird dieser visuelle Eindruck durch die statistischen Ergebnisse nicht bestätigt.

Da die visuelle Einschätzung schwierig war und hierfür keine einheitliche Methode gefunden wurde, stützt sich dieses Ergebnis auf den Versuch UB5 (*Wurzelarchitektur (Digitale Auswertung)*). Die Schwierigkeit der visuellen Einschätzung liegt darin, dass die Feinwurzeln mit dem bloßen Auge betrachtet schwer erkennbar sind und in der Masse weniger wirken, jedoch für die Statistik den ausschlaggebenden Unterschied gebracht haben könnten.

Zusätzlich ist zu erwähnen, dass für beide Versuche (visuell und digital) jeweils nur drei Aufnahmen pro Beet gemacht wurden. Daher ist $n = 6$ ($n = \text{Anzahl der Aufnahmen}$) und somit für eine statistische Untersuchung wenig. Bei weiteren Untersuchungen in Folgearbeiten wird empfohlen mit einem höheren n zu arbeiten, um aussagekräftigere Ergebnisse in der Statistik zu erzielen. Außerdem handelt es sich bei der Auswertung der digitalen und der analogen Wurzelarchitektur jeweils um ein zweidimensionales Bild, daher werden Überschneidungen und Überlappungen der Wurzeln nicht berücksichtigt.

Die Methode der Digitalisierung der analogen Wurzelbilder wurde im Zuge dieser Masterarbeit neu eingeführt. Daher sind in der Literatur keine Vergleiche zu finden. Eine Reflexion und Empfehlungen zu diesem neuen methodischen Ansatz werden in Kap. 6.3 zur Verfügung gestellt.

6.2. Forschungsfragen zur Wurzelarchitektur (F2 und F3)

Laut KUTSCHERA (1960) haben, wie in Kapitel 3.1.2. beschrieben, alle Pflanzen einen strengen Bauplan mit einer Grundform, welche selbst durch Störungen großteils erhalten bleibt. Um nun diese Aussage zu untersuchen, wurde ein Vergleich der Wurzelbilder aus der Literatur zu den selbst gezeichneten Wurzelbildern aufgestellt (Kapitel 5.2.2.). Wichtig ist hier zu erwähnen, dass (wie in Kapitel 4.2.3. angeführt) bei den Zeichnungen im Rahmen dieser Arbeiten (2019) nur 3 - 5 cm mit übereinandergelegten Profilschichten (insgesamt drei Profilschichten) auf RMH-Substrat (Kapitel 3.1.5.) abgegraben wurden, während KUTSCHERA (1960) den gesamten Wurzelkörper mit Profilschichten (Anzahl unbekannt) auf natürlichem Substrat aufgenommen hat.

Daher ist das selbstgezeichnete, analog erfasste Wurzelbild in dieser Arbeit auch nicht so dicht wie jene von KUTSCHERA (1960). Hier fällt beim Vergleich mit einem Foto desselben Profils (Abbildung 42) auf, dass teilweise Lücken im Wurzelbild zu erkennen sind. Diese Lücken sind auf grobe Substratstrukturen, wie etwa Steine zurückzuführen, wodurch keine gleichmäßige Durchwurzelung des Bodenkörpers gegeben ist.

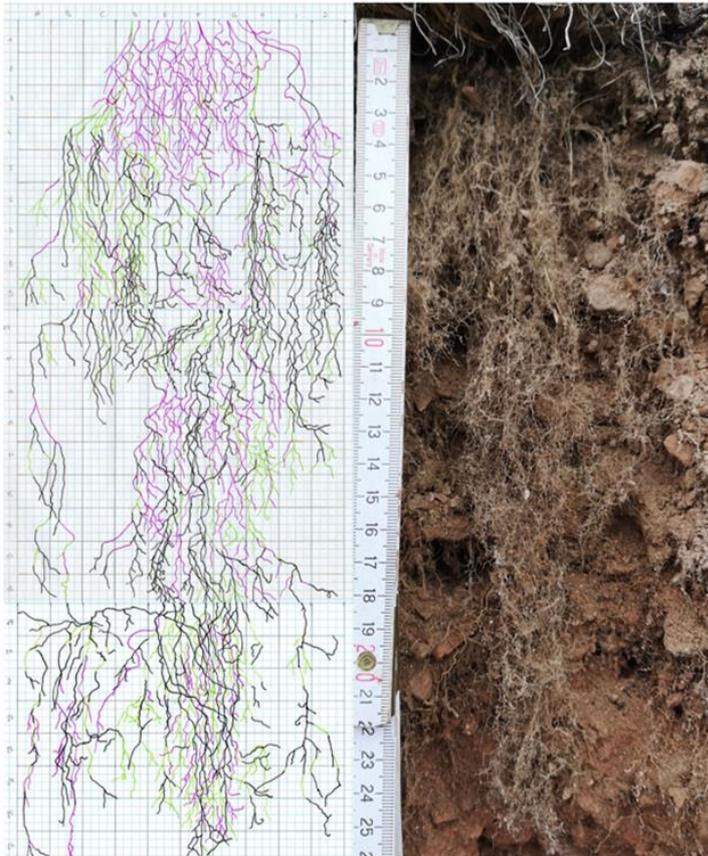


Abbildung 42: Vergleich: händische Zeichnung von *Lolium perenne* mit Fotografie derselben Pflanze, Punktsaatbeet: P6, eigene Erstellung, 2020

Um die in dieser Arbeit analog erstellten Wurzelbilder mit jenen aus der Literatur genauer zu vergleichen, wurde Versuch UB4 (*Wurzelarchitektur (analoge Auswertung)*, Vergleich A und B, Kapitel 5.2.2.1 und 5.2.2.2.), herangezogen: Verglichen wurde einerseits die Wuchsform von *Lolium perenne* (Punktsaatbeet: Beet 6) und *Anthyllis vulneraria* (Streusaatbeet: Beet 4) mit den jeweiligen Wurzelformen aus der Literatur, andererseits einzelne Sequenzen von *Anthyllis vulneraria* (Streusaatbeet: Beet 4) mit Sequenzen von *Anthyllis vulneraria* aus der Literatur. Die Grundform der Wurzeln bleibt im Vergleich selbstgezeichneten Wurzeln versus Wurzeln beider Arten aus der Literatur ähnlich, damit kann ein arttypisches Wurzelbild nachvollzogen werden.

Wie in Kapitel 3.2.1. beschrieben, fiel das Versuchsjahr sehr trocken und heiß aus. Der erhöhte Trockenstress kann zu einer erhöhten Wurzelhaarbildung führen, da die Anzahl der

Wurzelhaare bei zunehmender Trockenheit steigt (SOBOTIK et.al 2020, S.186). Beobachtet wurden eine regelmäßige Ausbildung von Wurzelhaaren bei *Anthyllis vulneraria* (Kapitel 5.2.2). Der anatomische Schnitt kann durch Umwelteinflüsse wie Trockenheit oder Nässe unterschiedlich ausfallen (SOBOTIK et.al 2020, S.194). Die oberen 20 cm beider Beete wurden beim Aufbau (2019) leicht verdichtet (Kapitel 3.2.2.). Neben den Umwelteinflüssen können auch mechanische Widerstände, wie ein geringer Druck den Verzweigungsvorgang der Wurzeln beeinflussen (POLOMSKI and KUHN 1998, S.41). So könnte der entstandene geringe Druck (durch den Vorgang des Verdichtens der obersten 20 cm) sowie die grobe Substratstruktur des RMH-Substrates ebenfalls Auswirkungen auf das spätere Wachstum der Wurzelhaare und der Wurzeln gehabt haben.

6.2.1. Forschungsfrage F2: Wurzelarchitektur *Anthyllis vulneraria*

Forschungsfrage F2 (*Lassen sich aufgrund des RMH-Substrates in der Wurzelarchitektur von *Anthyllis vulneraria* im Streusaatbeet Unterschiede zu *Anthyllis vulneraria* auf natürlichem Substrat (nach SOBOTIK 2020) erkennen?*) lässt sich anhand der analogen Wurzelbilduntersuchung mit einem „JA“ beantworten, da sich bei den Pflanzen aus dem vorliegenden Versuch keine starke Polwurzel abbildet und stattdessen eine Bildung von einigen Wurzelhaaren zu beobachten ist. Die **Hypothese H3** (*Die Wurzelarchitektur von *Anthyllis vulneraria* hebt sich in Bezug auf das Wuchsverhalten auf RMH-Substrat von den Wurzelarchitekturen auf natürlichem Substrat nach SOBOTIK (2020) ab. Erwartet wird eine weniger dichte Wuchsform auf RMH-Substrat.*) kann anhand von Vergleich A und Vergleich B bestätigt werden.

Das Fehlen einer dominanten Polwurzel liegt vermutlich am Alter der Pflanze (erstes Vegetationsjahr). Polwurzeln (oder auch polbürtige Wurzeln) sind jedoch die ersten Wurzeln, welche aus dem Wurzelpol hervorgehen (KUTSCHERA et al. 1997, S.13). Demnach sollten sie schon im ersten Vegetationsjahr erkennbar sein. Es besteht die Möglichkeit, dass die Polwurzel aufgrund der geringeren Schichttiefe beim Zeichnen (Kapitel 4.2.3.) nicht erfasst wurde und daher auch nicht zu sehen ist.

6.2.2. Forschungsfrage F3: Wurzelarchitektur *Lolium perenne*

Ungleich zur fixen Bauplantheorie von KUTSCHERA (1960) ist eine andere These, dass Pflanzenwurzeln bis zu einem gewissen Maß anpassungsfähig sein müssen, da sie ihren Standort nicht auswählen können und so eine Reaktion auf die unterschiedlichen Bodenbedingungen (Verfügbarkeit von Wasser und Nährstoffe, verschiedene Substrate, etc.) möglich ist (CHMELIKOVA and HEJCMAN 2012, S.116). Treffen Wurzeln auf Steine oder Kies, steigt die Wurzeldichte um dieses Areal herum an und es kommt zu Mattenbildungen (ARCHER et.al. 2002, S.545). Diese Aussagen untermauern das veränderte Wuchsverhalten von *Lolium perenne* gegenüber der beschriebenen Wurzelform aus der Literatur (zylinder-, verkehrt-kegelförmig) zu einer zusätzlichen Bildung eines Zylinders ab 20 cm Tiefe (Kapitel 5.2.2.2.) zusätzlich zur zylinder-, verkehrt-Kegelform. Abbildung 43 zeigt das Punktsaatbeet (Beet 6A) vor den Wurzelgrabungen. Ganz deutlich erkennbar ist die Grobkörnigkeit des Substrates und das scheinbare Fehlen der Wurzeln ab 20cm Tiefe. Bei den Grabungen ergab sich genau an dieser Stelle jener zusätzliche Zylinder.



Abbildung 43: grobes Gestein des RMH-Substrates zwischen den Wurzeln von *Lolium perenne* bei Beet 6A, vor den Grabungen, eigene Aufnahme 2019

Lt. Polomski und Kuhn (1998, S.41) verringert sich mit zunehmender Bodendichte der Abgangswinkel, also der Winkel, in dem die Wurzeln nach unten wachsen. Die abweichende Wurzelarchitektur der untersuchten Individuen kann auf das RMH-Substrat (Kapitel 3.1.5.) zurückzuführen sein, welches vor der Einsaat des Versuches bei 20 cm Tiefe mit einer Rüttelplatte verdichtet wurde (Kapitel 3.2.2.). Dies erklärt die zusätzliche Bildung eines Zylinders ab 20 cm Tiefe (siehe Kapitel 5.2.2.1.).

So lässt sich die **Forschungsfrage F3** (*Lassen sich aufgrund des RMH-Substrates in der Wurzelarchitektur von *Lolium perenne* Unterschiede zu *Lolium perenne* auf natürlichem Substrat (nach Beobachtungen von KUTSCHERA 1960) erkennen?*) mit einem deutlichen „JA“ beantworten, da die *Lolium perenne* Pflanzen aus dem Versuch dieser Masterarbeit eine deutliche Abweichung in der Wurzelform zeigen. Die **Hypothese H2** (*Die Wurzelarchitektur von *Lolium perenne* hebt sich in Bezug auf das Wuchsverhalten auf RMH-Substrat von den Wurzelarchitekturen auf natürlichem Substrat nach KUTSCHERA (1960) ab. Erwartet wird eine veränderte Wuchsform.*) kann bestätigt werden.

6.2.3. Auswirkungen auf die Stabilität des Substrates

Für die Stabilität des Substrates kann festgestellt werden, dass das RMH-Substrat aus mineralischen Hochbaurestmassen ein sehr lockeres Substrat mit grobkörnigen Skelettanteilen (bis zu 7cm Durchmesser) ist (Kapitel 3.1.5.). BLUM (2007, S.49) definiert Skelettanteil als die Anteile von Kiesen und Steinen im Boden. Durch die Wurzeln von *Lolium perenne* und *Anthyllis vulneraria* wurden diese Grobskelette effizient zurückgehalten. Bei der Freilegung der Wurzeln für die Zeichnungen der Wurzelarchitektur mussten teilweise die feinen Wurzeln von den Steinen behutsam heruntergetrennt werden, so sehr waren diese selbst durch die feinen Wurzelhaare verankert. Ohne diesen Wurzelhalt ist das Substrat sehr lose. Die räumliche Verteilung der Wurzelmasse ist ausschlaggebend für die Verankerung der Pflanzen im Substrat und somit auf die Stabilität (KUTSCHERA et al. 1997, S.25). Dies bestätigt die Beobachtung, dass bei den Wurzelgrabungen das Substrat im Punktsaatbeet (Beet 6) wesentlich poröser ausfiel als im Streusaatbeet (Beet 4), da der Bodenkörper damit auch nur punktuell durchwurzelt wird gegenüber einer Streusaat mit entsprechend höheren Individuenzahlen. Das könnte ebenfalls auf die Artenwahl zurückzuführen sein: während beim Streusaatbeet zwei Arten (*Anthyllis vulneraria* und *Lolium perenne*) vertreten sind, weist das

Punktsaatbeet mit *Lolium perenne* nur eine Pflanzenart auf und somit nur eine Wurzelform (Kapitel 3.1.2.). Durch die Kombination von *Anthyllis vulneraria* (Strangförmiger Wurzeltyp) mit *Lolium perenne* (Zylinder-, verkehrt-kegelförmig mit zusätzlicher Zylinderausbildung in 20 cm Tiefe) kann eine insgesamt tiefere Durchwurzelung erreicht werden (Kapitel: 5.2.2.3).

Um eine gleichmäßige Verwurzelung verschiedener Bodentiefen (und somit einen höheren Schutz vor Erosion) zu erreichen, wird eine Mischung mehrerer standortgerechter Gräser und Kräuter empfohlen. Somit wird ein gleichförmiger Wurzelhorizont mit einheitlicher Wurzeltiefe vermieden (FLORINETH et al. 2016, S.7).

Das Zusammenspiel von Artenwahl und Saatmethode ergibt für das Streusaatbeet (Beet 4) eine höhere Stabilität des Substrates als für das Punktsaatbeet (Beet 6), welches deutlich loser ist. Jedoch ist bei beiden Beeten nach der ersten Vegetationsperiode nicht von einer hohen Erosionsstabilität auszugehen, da allein beim erstmaligen Öffnen der Plexiglasplatte für das Zeichnen der Wurzelarchitekturen (Kapitel 3.2.2.) sehr viel loses Substrat in die fürs bessere Arbeiten angelegte Vertiefung hineinfiel.

Zusammenfassend festzuhalten ist, dass das RMH-Substrat in Kombination mit einer Punktsaat mit *Lolium perenne* im ersten Vegetationsjahr keine ausreichende Stabilität durch unterirdische Biomasse erzeugt, um ohne Einfassung erosionsstabil zu sein. RMH-Substrat in Kombination mit einer Streusaat mit *Lolium perenne* und *Anthyllis vulneraria* ist im ersten Vegetationsjahr auch nicht für eine Fläche ohne Einfassung geeignet. Beim Vergleich von *Lolium perenne* mit den Zeichnungen von KUTSCHERA (1960) und *Anthyllis vulneraria* mit den Zeichnungen von SOBOTIK (2020) ist jedoch zu erkennen, dass das RMH-Substrat eher hinderlich für das Wachstum dieser beiden Arten scheint. Es bildet sich zwar bei *Lolium perenne* eine andere Wurzelarchitektur aus (ein zusätzlicher Zylinder ab 20 cm, Kapitel 5.2.2.1), jedoch müsste die gesamte Pflanze erhoben werden, um einen direkten Vergleich zu ziehen. Anzunehmen ist jedoch, dass dieser zusätzliche Zylinder einen Vorteil bringen kann, da an dieser Stelle im Substrat nochmal zusätzlicher Halt geboten wird. Hierbei stellt sich aber die Frage: liegt diese veränderte Wurzelarchitektur am RMH-Substrat selbst, oder daran, dass beim Aufbau der Beete nach 20 cm Tiefe verdichtet wurde (Kapitel 3.2.2.).

6.3. Reflexion zur Methodik und Empfehlungen

In diesem Kapitel werden die methodischen Zugänge und potenzielle Anpassungen reflektiert und bezüglich der Methodik und Empfehlungen zur Umsetzung der Versuche dieser Arbeit erläutert.

6.3.1. Forschungsfrage F1: oberirdische Biomasse

Wie in Kapitel 6.1.1. dargestellt, stellte die versuchsfremde Bewässerung des Teilabschnittes 6A ein Problem dar, da dadurch das Pflanzenwachstum kleinräumig unterschiedlich ausfiel und damit zu einer punktuell erhöhten Biomasseproduktion führte. Bei zukünftigen Forschungsarbeiten auf diesen Versuchsflächen (Beet 4 und Beet 6) ist auf eine rechtzeitige Rücksprache mit den Gärtner*innen vor Ort zu achten, sodass keine versuchsfremden Einwirkungen entstehen können.

6.3.2. Forschungsfrage F1: unterirdische Biomasse

Beim Versuch UB3 (Kapitel 4.2.2.) wurde ein Substratblock aus einer 10 x 10 x 50 cm Abmessung herausgenommen (nach MARZILIANO (2015) und KUTSCHERA (1960)), um anschließend Wurzeln und Substrat zu trennen, zu trocknen und abzuwiegen. Hierbei musste die Methode aufgrund des eher lockeren RMH-Substrates (Kapitel 3.1.5.) adaptiert werden: der auszugrabende Block innerhalb der Abmessung wurde von oben nach unten, Schicht für Schicht abgetragen, da Teile der Profilsseiten der Grabung außerhalb der 10 x 10 x 50 cm Abmessung immer wieder einbrachen und der Versuch sonst nicht durchführbar war. Somit konnte ein Einbrechen von Seitenflächen verhindert und die genaue Abmessung des Blockes entnommen werden. Für zukünftig folgende Arbeiten an den Versuchsbeeten 4 und 6 ist diese Methode zu empfehlen.

6.3.3. Forschungsfragen F2/F3: Wurzelarchitekturen

Für die zeichnerische Erfassung der Wurzelarchitekturen wurde nach der Methode von KUTSCHERA (1960) (Kapitel 4.2.3.) vorgegangen. Dabei kam es zu einer Reihe an Herausforderungen. Durch die zum Aufnahmezeitpunkt schon kühleren Temperaturen (Oktober bis November) wurde das Zeichnen per Hand erschwert. Ein Profil (S1-3, P4-6; siehe Kapitel 3.2.: Aufbau der Versuchsbeete) zu zeichnen dauerte etwa 7-9 Stunden. Die Herausforderung hierbei war es, ein Profil innerhalb eines Tages fertig zu zeichnen, da sich

durch die Abdeckungen, welche zwischenzeitlich in Abwesenheit der Zeichnerin auf das Beet montiert wurde, die Wurzeln verschoben, beschädigt oder entfernt wurden. Allerdings erwiesen sich nicht nur die kühlen Temperaturen als hinderlich, sondern auch die Tageslichtdauer zu dieser Jahreszeit. So mussten in den späteren Nachmittagsstunden Lichter um die Grabungsstelle herum platziert werden. Bei Nieselregen wurde ein Zelt über die Grabungsstelle gespannt. Auch hier wurden zusätzlich Lichter aufgestellt, da das Zelt viel Tageslicht wegnahm. Das Zeichnen von Wurzelarchitekturen wird für weitere Arbeiten daher früher im Jahr (z.B. August oder September) empfohlen.

Eine weitere Problematik waren die gewählten Stifte. Gezeichnet wurde mit PointVisco Gelstiften von Stabilo (fine 0,5), welche sich unglaublich gut zum Zeichnen von feinen Linien eignen. Leider verwischen diese jedoch sehr leicht. Gerade durch den häufigen Wechsel zwischen Stift und spitzem Werkzeug/ Pinsel (mit dem die Wurzeln freigelegt wurden, Kapitel 4.2.3.) kam es vor, dass eben gezeichnete Linien verwischt wurden. Empfohlen wird daher für ähnliche Arbeiten, auf qualitativ hochwertige Buntstifte umzusteigen. Diese lassen sich bei Bedarf je nach Marke ausradieren, was bei Gelstiften nicht möglich ist.

Um die Kutschera-Methode (1960) des Zeichnens umzusetzen, wurde eine selbstgebaute Drahtschablone mit 10 cm x 10 cm und jeweils 1 cm x 1 cm Kästchen (Kapitel 4.2.1.) aus 1 mm Stahldrähten aus der Floristik hergestellt. Diese Drahtdicke erlaubt es, die Wurzeln, welche unterhalb eines Drahtes liegen, noch durch eine Änderung der Kopfhaltung zu sehen. Problematisch wurde es jedoch bei der Überschneidung der Drähte, welche mit Heißkleber am jeweiligen Punkt des Überschneidens zusammengeklebt wurden. Der Heißkleber verdeckte eine größere Fläche als vorgesehen, was es oftmals schwierig machte, die Wurzeln unterhalb zu erkennen. Zusätzlich kam es immer wieder zum Ablösen des Klebers an solchen Stellen, welche am Ende des Tages neu geklebt werden mussten. Als Empfehlung wird daher weitergegeben, die Heißklebepistole durch einen Lötkolben zu ersetzen und die Drähte aneinander zu löten, statt zu kleben. Damit wird eine wesentlich kleinere Kreuzungsfläche erzeugt, welche zusätzlich noch besser hält.

Um die Methode des händischen Zeichnens der Wurzelarchitekturen nach KUTSCHERA (1960) zu bewerten, wird festgehalten, dass diese Arbeit sehr aufwändig und zeitintensiv ist. Sie erfordert eine unendliche Geduld, sowie Genauigkeit und Durchhaltevermögen. Durch

eine spätere digitale Abzeichnung der händisch gefertigten Wurzelzeichnungen wurde klar, dass mithilfe des iPads (oder vergleichbaren Tablets, welche mit digitalen Zeichenstiften wie z.B. dem iPen verbunden werden können) ein Zeichnen im Feld erheblich erleichtert werden kann. Mithilfe der digitalen händischen Zeichnung in Programmen wie Procreate können Layer erstellt werden, Fehler sofort korrigiert werden, oder auch Hilfslinien im Nachhinein ausgeblendet werden (Kapitel 4.2.4.).

Für nachfolgende Arbeiten ist die Aufrüstung von analoger händischer Zeichnung zur digitalen händischen Zeichnung empfohlen. Es spart unglaublich viel Zeit und Arbeit.

Da durch die visuelle Auswertung der Wurzelarchitekturen keine statistischen Daten abgeleitet werden können, wurden die analogen per Hand gezeichneten Wurzelarchitekturen in digitale Bilder umgewandelt. Hierfür wurden mehrere Programme bzw. Programmiersprachen durchprobiert, wie etwa MathLab (C, C++, Fortran, Java), welches aufgrund der zu hohen Komplexität verworfen wurde, oder Python im Windowseditor, bei dem die Idee einer Zählung der Pixel in einer Fotografie wieder verworfen wurde, da das Substrat auch als Pixel erkannt wurde und dadurch ein einziger Pixelhaufen entstand, der nicht verwertet werden konnte.

Da Python als Programmiersprache jedoch recht einfach ist, erwies sich das Ändern des Editors (vom Windowseditor zu PyCharm) als praktikabel, in dem dann mithilfe eines Software Developers (Markus Blecha, B.Sc.) die händisch gezeichneten Wurzelarchitekturen eingelesen werden konnten und auch brauchbare Ergebnisse lieferten. Hierbei tritt das vernetzte Arbeiten „social Networking“ in den Vordergrund. Durch interdisziplinäre Zusammenarbeit können fachübergreifende Perspektiven und optimale Lösungen gefunden werden. Digitalisierung und Einbringen von Technik in Fachbereiche, welche bisher ohne ausgekommen sind, ist der sprichwörtliche „Blick über den Tellerrand“ und unterstützt die schlüssige Erarbeitung von Lösungsstrategien (UNIVERSITÄT FÜR BODENKULTUR 2015, S.3).

7. Schlussfolgerung

In dieser Arbeit wurde neben der Beobachtung der Biomasseentwicklung von *Lolium perenne* und *Anthyllis vulneraria* auf RMH-Substrat insbesondere die Wurzelarchitektur betrachtet. Im Vordergrund stand hier die gute Vergleichbarkeit der analog angefertigten Zeichnungen der Wurzelarchitektur mit Darstellungen aus der Literatur von KUTSCHERA (1960) und SOBOTIK (2020). Durch diese Vergleiche können in Bezug auf die Wuchsform Ähnlichkeiten als auch Abweichungen festgestellt werden (Kapitel 6.2.2.), welche sich auf das RMH-Substrat zurückführen lassen (Kapitel 3.1.5.). Die Vergleiche zeigen, dass *Lolium perenne* ab einer Tiefe von 20 cm (auf RMH-Substrat) in der Wurzelarchitektur einen zusätzlichen Zylinder ausbildet. Bei *Anthyllis vulneraria* sind auf RMH-Substrat vermehrt Wurzelhaare zu beobachten und möglicherweise auf die groben Skelettanteile im Substrat zu schließen.

Diese Grobskelette werden im ersten Vegetationsjahr durch die Wurzeln von *Lolium perenne* und *Anthyllis vulneraria* effizient zurückgehalten. An Stellen, an denen keine Wurzeln wuchsen, fiel das lose, grobe RMH-Substrat zum Teil schon bei leichter Berührung herunter. Die Grobskelettanteile welche jedoch mit Wurzeln überwachsen waren, wiesen eine starke Verankerung auf. Zu erwarten ist eine höhere Durchwurzelung und damit eine höhere Stabilität in nachfolgenden Vegetationsjahren.

Tabelle 16 zeigt eine Zusammenfassung der Beantwortungen der Forschungsfragen und Hypothesen: zwei von drei Forschungsfragen konnten vollständig beantwortet werden, zwei von vier Hypothesen konnten bestätigt werden. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass sich die Wurzelarchitektur von *Lolium perenne* und *Anthyllis vulneraria* unter bestimmten anthropogenen Einflüssen verändern können. Ein Unterschied in der Biomasseproduktion zwischen den Ansaatmethoden konnte jedoch nicht bestätigt werden.

Tabelle 16: Zusammenfassung der Beantwortung aller Forschungsfragen und Hypothesen, eigene Erstellung

Forschungsfrage		Beantwortung
F1	<i>Ist die unterirdische und oberirdische Biomasseproduktion bei einer Streusaat höher als bei einer Punktsaat?</i>	Oberirdische Biomasse: Aufgrund von Fremdeinwirkungen, kann diese Frage nicht eindeutig beantwortet werden.
		Unterirdische Biomasse: NEIN - Die Unterirdische Biomasse ist bei der Streusaat nicht höher als bei der Punktsaat.
F2	<i>Lassen sich aufgrund des RMH-Substrates in der Wurzelarchitektur von Anthyllis vulneraria im Streusaatbeet Unterschiede zu Anthyllis vulneraria auf natürlichem Substrat (nach SOBOTIK 2020) erkennen?</i>	JA - Es sind Unterschiede in der Wurzelarchitektur aufgrund des RMH-Substrates erkennbar.
F3	<i>Lassen sich aufgrund des RMH-Substrates in der Wurzelarchitektur von Lolium perenne Unterschiede zu Lolium perenne auf natürlichem Substrat (nach der Methode von KUTSCHERA 1960) erkennen?</i>	JA - Es sind Unterschiede in der Wurzelarchitektur aufgrund des RMH-Substrates erkennbar.
Hypothese		Beantwortung
H 1.1	<i>Die oberirdische Biomasseproduktion ist bei einer Streusaat mit Anthyllis vulneraria und Lolium perenne höher als bei einer Punktsaat mit Lolium perenne.</i>	nicht bestätigt
H 1.2	<i>Die unterirdische Biomasseproduktion ist bei einer Streusaat mit Anthyllis vulneraria und Lolium perenne höher als bei einer Punktsaat mit Lolium perenne.</i>	nicht bestätigt
H 2	<i>Die Wurzelarchitektur von Lolium perenne hebt sich in Bezug auf das Wuchsverhalten auf RMH-Substrat von den Wurzelarchitekturen auf natürlichem Substrat nach KUTSCHERA (1960) ab. Erwartet wird aufgrund der Grobkörnigkeit des RMH-Substrates eine weniger dichte Wuchsform.</i>	bestätigt
H 3	<i>Die Wurzelarchitektur von Anthyllis vulneraria hebt sich in Bezug auf das Wuchsverhalten auf RMH-Substrat, von den Wurzelarchitekturen auf natürlichem Substrat nach SOBOTIK (2020) ab. Erwartet wird auch hier eine weniger dichte Wuchsform auf RMH-Substrat.</i>	bestätigt

7.1. Ausblick

Durch die hier vorgestellte neue Methode der digitalen Bearbeitung können statistische Daten erzeugt und verglichen werden (Kapitel 5.2.3.). Das weitere Sammeln von statistischen Daten zur prozentualen Wurzelbildung (die Durchwurzelung) können in Zukunft hilfreich bei der Entscheidung sein, welche Pflanzen in der Ingenieurbiologie verwendet werden. Für ingenieurbiologische Bauwerke ist es ausschlaggebend, wie stark ausgeprägt die Durchwurzelung eines Vegetationsbestands und einzelner Arten ist bzw. wie stark der Substratrückhalt bzw. Bodenstabilität durch die Verwurzelung ist. Je nach Bauwerk und Standort werden spezifische Arten ausgewählt.

8. Referenzen

- AMBERGER A. 1996. *Pflanzenernährung*. 4. Aufl. Stuttgart: Ulmer
- ARCHER N. A. L., QUINTON J. N., HESS. T. M. 2002. *Below-ground relationships of soil texture, roots and hydraulic conductivity in two-phase mosaic vegetation in South-east Spain*. U.K.: Journal of Arid Environments, 52: 535–553; DOI:10.1006/jare.2002.1011
- BERG S., FERNANDEZ DEL RIO J., GOMMERS R., HALANDE A., HARRIS C., HOYER S., PICUS M., SMITH N., TAYLOR J., VIRTANEN P., VAN DER WALT S., WIESER E. 2019. *Open source project aiming to enable numerical computing with Python*. Online: numpy.org [02/2021]
- BINDER P. 2020. *Kurzanleitung zum BINDER Trockenschrank Modell FED 720*. Stuttgart: Fa. BINDER GmbH, Online (2020): <https://www.binder-world.com/de/produkte/trocken-und-waermeschraenke/serie-fed-avantgardeline/fed-720#2> [04/2020]
- BLUM W. 2007. *Bodenkunde in Stichworten*. 6. Aufl. Berlin, Stuttgart: Gebr. Borntraeger Verlagsbuchhandlung
- BURNIE G., FORRESTER S., GREIG D., GUEST S., HARMONY M., HOBLEY S., JACKSON G., LAVARACK P., LEDGETT M., MCDONALD R., MACOBOY S., MOLYNEUX B., MOODIE D., MOORE J., NEWMAN D., NORTH T., PIENAAR K., PURDY G., SILK J., RYAN S., SCHIEN G. 2003. *Botanica- Das Abc der Pflanzen*. Italien: Könemann in der Tandem Verlag
- CHMELIKOVA L., HEJCMAN M. 2012. *Root system variability in common legumes in Central Europe*. Tschechien: Biologia 67/1: 116—125, Section Botany; DOI: 10.2478/s11756-011-0138-7
- COULLOUDON B., ESHELMAN K., GIANOLA J., HABICH N., HUGHES L., JOHNSON C., PELLANT M., PODBORNY P., RASMUSSEN A., ROBELS B., SHAVER P., SPEHAR J., WILLOUGHBY J. 1996. *Sampling Vegetation Attributes, Interagency Technical Reference*. Denver, Colorado: U.S. Department for Agriculture, Forest Service, Natural Resource Conservation Service, Grazing Land Technology Institute AND U.S. Department of Interior, Bureau of Land Management
- ERHARDT W., GÖTZ E., BÖDEKER N., SEYBOLD S. 2008. *Der große Zander, Enzyklopädie der Pflanzennamen, Band 2: Arten und Sorten*. Bd. 2. Stuttgart: Ulmer
- FAHRMEIR L., HEUMANN C., KÜNSTLER R., PIGEOT I., TUTZ G. 2016. *Statistik - Der Weg zur Datenanalyse*. 8. Aufl. München, Zürich, Bremen: Springer Spektrum, DOI 10.1007/978-3-662-50372-0
- FISCHER M., OSWALD K., ADLER W. 2008. *Exkursionsflora für Österreich, Lichtenstein, Südtirol*. 3. Aufl. Linz: Land Oberösterreich, Biologiezentrum der OÖ Landesmuseen
- FLORINETH, F. 2012. *Pflanzen statt Beton- Sichern und Gestalten mit Pflanzen*. Berlin, Hannover: Patzer Verlag

- FLORINETH F., EGGER P., THALER T. 2016. „Wildbachverbauung, Ingenieurbilogie und Hochlagenbegrünungen, Meran 2000“
- FREY W., LÖSCH R. 2010. *Geobotanik - Pflanze und Vegetation in Raum und Zeit*. 3. Aufl. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag
- GLENNIE K. W., EVAMY B. D. 1967. *Dikaka: Plants and plant-root structures associated with aeolian sand*. Amsterdam: In: Palaeogeography, Palaeoclimatol., Palaeoecol., 4 (1968)
- GRUBER J., LIEPINS L. 2013. *Markdown: Syntax*. <https://markdown.de/> Online: 03/2020
- HAMM C. 2011. *Bedienungsanleitung Feldflügelsonde*. Göttingen-Rosdorf: Carl Hamm Geotechnik, APS GmbH
- HEINISOU O. 2021. *Open CV Python*. Finnland: Mikrosoft, GitHub, Inc. Online: <https://github.com/opencv/opencv-python> [01/2021]
- HEMMERICH W. 2018. *StatistikGuru: Normalverteilung online prüfen*. Wiesbaden: StatistikGuru; Online: <https://statistikguru.de/rechner/normalverteilung-rechner.html>
- HUTTER C., BRIEMLE G., FINK C. 2002. *Wiesen, Weiden und anderes Grünland*. Stuttgart: Hirzel Verlag
- HUTTER J., DALE D., FIRING E., DROETTBOOM M. 2002. *Matplotlib: Visualization with Python*. Matplotlib: Online: <https://matplotlib.org/> [02/2021]
- JANSEN, H., BACHTHALER E., FÖLSTER E., SCHARPF H. 1998. *Gärtnerischer Pflanzenbau*. 3. Aufl. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer
- JET B. s.r.o. 2000. *PyCharm*. Österreich: Developed with drive and IntelliJ IDEA, Online 10/2020: <https://www.jetbrains.com/de-de/pycharm/>
- KOLYMBAS D. 2018. *Geotechnik: Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau*. 5. Aufl. Innsbruck: Springer Vieweg, <https://doi.org/10.1007/978-3-662-58472-9>
- KUTSCHERA, L. 1960. *Wurzelatlas mitteleuropäischer Ackerkräuter und Kulturpflanzen*. Frankfurt am Main: DLG_Verlags-GmbH
- KUTSCHERA, L., SOBOTIK M., LICHTENEGGER E., HAAS D. 1997. *Wurzeln - Bewurzelung von Pflanzen in verschiedenen Lebensräumen*. Bd. 5. Band der Wurzelatlas-Reihe. Linz: Stapfia 49
- LAND NIEDERÖSTERREICH. 2019. *LUFTGÜTE: Messwerte des niederösterreichischen Umweltbeobachtungs- und Informationssystems NUMBIS*. Niederösterreich: Noe.gv.at: Nubis Online: <http://numbis.noe.gv.at/Numbis/diagramme.jsp>
- MIELKE, H., WOHLERS W. 2016. *Praxishandbuch Grünland, Nutzung und Pflege*. Deutschland: Erling Verlag GmbH + Co. KG, Agrimedia

- PIZZERA P., JAUS O. 2017. *Unerhört Solide*. Österreich: Album: Unerhört Solide
- POLOMSKI J., KUHN N. 1998. *Wurzelsysteme*. Birndorf; Bern, Stuttgart, Wien: Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL/FNP) Birndorf; Verlag Paul Haupt
- PROCREATE. 2019. *Procreate- Zeichenprogramm*. Australien: Savage Interactive Pty Ltd
- QIN Z., CHENGGANG X., BOCHANG D. 2020. *Research on Classification and Quantitative Prediction Method of Demolition Waste*. China: RIOH High Science and Technology Group; in IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 555; doi:10.1088/1755-1315/555/1/012056
- SCHWELGER, A. 2011. *Unsere Gräser*. 12. Aufl. Stuttgart: Franckh-Kosmos-Verlags GmbH + Co. KG
- SEIPEL H. 2005. *Prüfungsbuch Garten und Landschaftsbau*. 1. Aufl. Stuttgart: Holland und Josenhans Verlag
- SEIPEL, H. 2007. *Fachkunde für Gärtner*. Hamburg: Dr. Felix Büchner, Handwerk und Technik
- SOBOTIK, M., EBERWEIN R., SANESI G., STANGL R., LOISKANDL W. 2020. *Pflanzenwurzeln - Wurzeln begreifen, Zusammenhänge verstehen, in der Praxis anwenden*. Frankfurt am Main: DLG-Verlag GmbH
- UNIVERSITÄT FÜR BODENKULTUR. 2015. *BOKU Ethik Charta*. Wien: Universität für Bodenkultur, beschlossen durch Senat und Rektora, online 02/2021: <https://boku.ac.at/ethikplattform/download-ethik-charta>
- UNIVERSITY OF IDAHO. 2009. *Principles of Vegetation Measurement & Assessment and Ecological Monitoring & Analysis*. Idaho: College of Natural Resources; online 2021: [https://www.webpages.uidaho.edu/veg_measure/Modules/Lessons/Module%208\(Cover\)/8_3_Points.htm](https://www.webpages.uidaho.edu/veg_measure/Modules/Lessons/Module%208(Cover)/8_3_Points.htm).
- VANNOPPEN W., BAETS S., KEEBLE J., DONG Y., POESEN J. 2017. *How Do Root and Soil Characteristics Affect the Erosion-Reducing Potential of Plant Species?* Belgien, UK, China: Ecological Engineering 109, S.186-195; <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.08.001>
- WALDAUER S. 2007. *Nachsaat intensiver Dauerwiesen und deren Einfluss auf Pflanzenbestand, Futterertrag und -qualität im Alpenraum*. Wien: Diplomarbeit; Universität für Bodenkultur Wien, Department für Angewandte Pflanzenwissenschaften und Pflanzenbiotechnologien, Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, online 01/2021: https://litsearch.boku.ac.at/primo-explore/fulldisplay?docid=BOK_alma2132168290003345&context=L&vid=BOK&lang=de_DE&search_scope=default_scope&adaptor=Local%20Search%20Engine&tab=default_tab&query=any,contains,bestimmung%20der%20trockenmasse&offset=0

- WHITE P., GEOGRE T., GREGORY P., BENGOUGH A., HALLETT P., MCKENZIE B. 2013. *Matching Roots to Their Environment*. Bd. 112. UK: Annals of Botany 112: 207–222; doi:10.1093/aob/mct123
- YUNFU G., ZHIQI G., NA Y. 2018. *Estimation methods of construction and demolition waste generation: a review*. China: Civil Engineering Department, Qinghai University, Xi Ning, Qing Hai; in IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 189; doi :10.1088/1755-1315/189/5/052050
- ZAMG. 2019. *ZAMG - Sommer 2019: zweitwärmster Sommer der Messgeschichte*. Österreich: ZAMG. online 2020: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/news/zweitwaermster-sommer-der-messgeschichte>
- ZAMG. 2020. *Übersicht der Wetterabweichungen und Mittelwerten in den Bundesländern im Sommer 2019*. Österreich: ZAMG, online 2020: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/news/zweitwaermster-sommer-der-messgeschichte> und <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klima-aktuell/klimamonitoring/?station=5904¶m=t&period=period-ym-2019-08>

9. Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

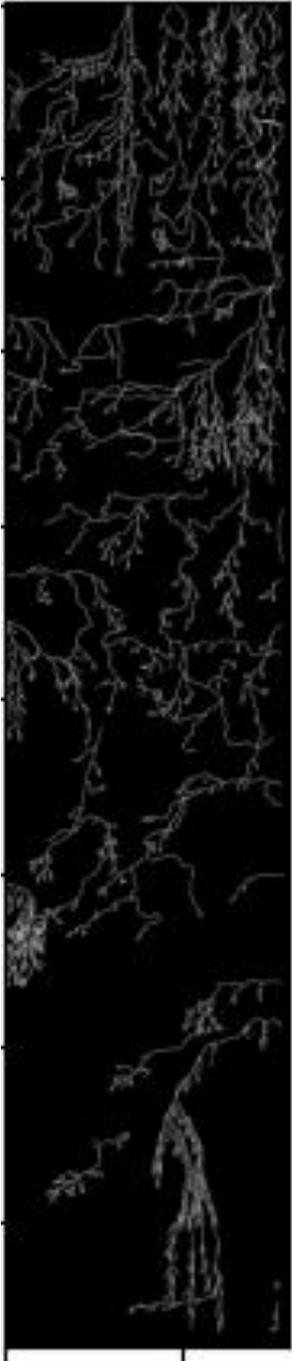
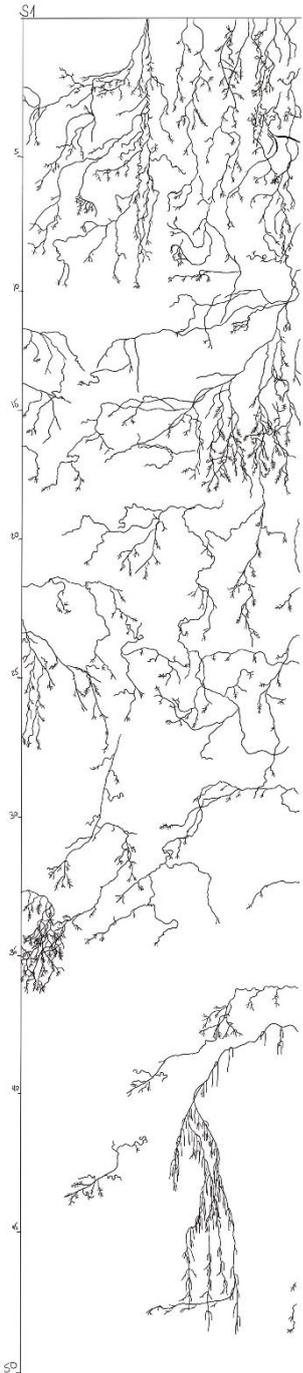
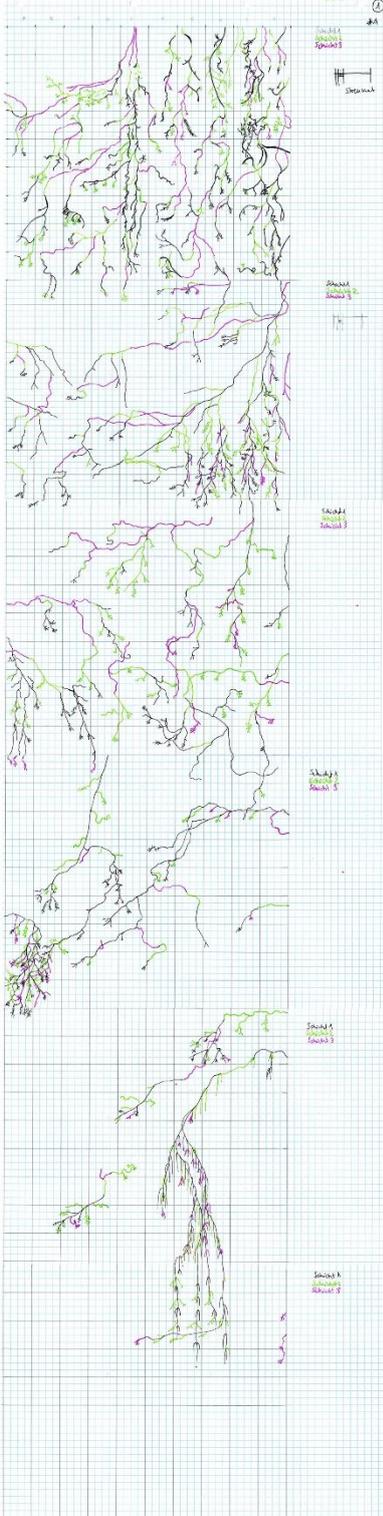
Abbildung 1: Lolium perenne, eigene Aufnahme 2019.....	12
Abbildung 2: Anthyllis vulneraria, eigene Aufnahme, 2019.....	13
Abbildung 3: Zylinder-, verkehrt-kegelförmiger Wurzeltyp, Genister germanica: reproduziert (2020) aus SOBOTIK et al. 2020, S.30	15
Abbildung 4: Lolium perenne, reproduziert und verändert (2020) aus KUTSCHERA 1960, S.29.....	16
Abbildung 5: Strangförmiger Wurzeltyp von Anthyllis vulneraria, reproduziert (2020) aus SOBOTIC et.al. 2020, S.30	17
Abbildung 6: Aufbau der Versuchsflächen in Bezug auf das Substrat, eigene Erstellung 2020.....	18
Abbildung 7: Verortung der Versuchsbeet im Versuchsgarten Groß Enzersdorf, Google Maps 2020; eigene Erstellung 2020	19
Abbildung 8: 3D Darstellung des Aufbaus der Beetanlage, eigene Erstellung in PlanetZoo.....	20
Abbildung 9: Aufbau des Versuches, eigene Erstellung	22
Abbildung 10: Aufbau der Punktsaat, eigene Erstellung.....	23
Abbildung 11: Aufbau Streusaatbeet, eigene Erstellung	24
Abbildung 12: Verortung der Profile, eigene Erstellung	25
Abbildung 13: Unterschied von Streusaat und Punktsaat, eigene Erstellung.....	25
Abbildung 14: Vorgang zur Abschätzung des Deckungsverhältnisses beim Streusaatbeet, nach FREY and LÖSCH 2010, eigene Erstellung	28
Abbildung 15: Beispiel zur Errechnung des Deckungsgrades nach der Point-Interception Methode, nach UNIVERSITY OF IDAHO 2009, eigne Erstellung	28
Abbildung 16: Kreisförmiger Wuchs von Lolium perenne, eigene Aufnahme 2019	29
Abbildung 17: Bestimmung der Mittelwerte des Gewichts der getrockneten Biomasse von Beet 6A-E (Punktsaatbeet) und Beet 4A-E (Streusaatbeet), eigene Erstellung in R-Studio.....	30
Abbildung 18: Herstellung der Gitterschablone, eigene Aufnahme 2019	33
Abbildung 19: Gitterschablone in ihrer Anwendung, eigene Aufnahme 2019	33
Abbildung 20: Verortung der Bodenproben zur Wurzelmasseerhebung, eigene Erstellung.....	34
Abbildung 21: Entnahme der Bodenprobe beim Streusaatbeet (4A), eigene Aufnahme 2019.....	35
Abbildung 22: Ablauf der Herstellung der Wurzelbilder: Zeichnung der ersten Schicht, eigene Aufnahme, 2019	37
Abbildung 23: PyCharm Code zur Darstellung der Wurzelbilder, BLECHA Markus 2020.....	38
Abbildung 24: Umwandlung der händischen Zeichnung in eine digitale Zeichnung mittels Procreate, eigene Erstellung 2021	39
Abbildung 25: Hr. Müller bei der Handhabung der Flügelsonde am Punktsaatbeet (Beet 6), eigene Aufnahme 2019.....	41
Abbildung 26: Vergleich des Gewichts der getrockneten Biomasse von Beet 6A-E und Beet 4A-E mittels t-test, eigene Erstellung	47
Abbildung 27: Gruppierungen für ANOVA in R-Studio, eigene Erstellung	47
Abbildung 28: Vergleich der Teilabschnitte A-E von Beet 6, in R-Studio, eigene Erstellung	48
Abbildung 29: ANOVA in R-Studio, eigene Erstellung	48
Abbildung 30: ANOVA ohne Beet A in R-Studio, eigene Erstellung	48
Abbildung 31: Gegentest mittels t-Test Beet 6 B-E vs. Beet 4 B-E in R-Studio, eigene Erstellung.....	49
Abbildung 32: t-Test über die Mittelwerte des Trockengewichts der Beete 4A und 6A, eigene Erstellung.....	51
Abbildung 33: Vergleich der Wurzelformen: P6 selbstgezeichnet (links) vs. reproduzierter Zeichnung nach KUTSCHERA 1960 (rechts), eigene Erstellung 2020.....	52

Abbildung 34: Vergleich der Wurzelformen: S2 selbstgezeichnet (links) vs. reproduzierter Zeichnung von SOBOTIK 2020 (rechts), eigene Erstellung 2021.....	54
Abbildung 35: links: eigene Darstellung, rechts: reproduzierte Darstellung von SOBOTIK 2020: Sequenzen A-C einzelner Wurzeln zum Vergleich, eigene Erstellung 2021.....	55
Abbildung 36: Gegenüberstellung der Wurzelarchitektur von P4 und S3, eigene Erstellung BLECHA 2021.....	57
Abbildung 37: Plot P4, Pycharm mit herausgerechneten Kästchen, BLECHA Markus 2020	58
Abbildung 38: Plot P4 aus PyCharm ohne herausgerechneten Kästchen, BLECHA Markus 2020	58
Abbildung 39: Plot P6, Pycharm mit digitaler Zeichnung, BLECHA Markus 2021	58
Abbildung 40: t-Test zur Überprüfung der statistischen Relevanz der Ergebnisse aus Tabelle 6, eigene Erstellung in R-Studio	60
Abbildung 41: Drohnenaufnahme vom 6.4.2020, Bewässerung von Teilfläche 6A, eigene Aufnahme 2020.....	64
Abbildung 42: Vergleich: händische Zeichnung von Lolium perenne mit Fotografie derselben Pflanze, Punktsaatbeet: P6, eigene Erstellung, 2020.....	68
Abbildung 43: grobes Gestein des RMH-Substrates zwischen den Wurzeln von Lolium perenne bei Beet 6A, vor den Grabungen, eigene Aufnahme 2019	70
Tabelle 1: Zuordnung aller Methoden und Ergebnisse dieser Arbeit, eigene Erstellung.....	11
Tabelle 2: Klimadaten August 2019, SPARTACUS- Datensatz, Wetterstation Groß-Enzersdorf, ZAMG 2020.....	20
Tabelle 3: Verwendete Materialien und Werkzeuge, eigene Erstellung.....	31
Tabelle 4: Zuordnung der Methoden/ Statistischen Tests zu den einzelnen Versuchen, eigene Erstellung.....	43
Tabelle 5: Zuordnung und Codierung der Versuche, eigene Erstellung.....	44
Tabelle 6: Aufnahmen zum Deckungsverhältnis nach der Point-Interception Methode, eigene Erstellung.....	45
Tabelle 7: Ergebnisse des Deckungsverhältnisses, eigene Erstellung	45
Tabelle 8: Zugeordnetes Gewicht der Beete 6A-E und 4A-E, in R-Studio, eigene Erstellung.....	46
Tabelle 9: Zusammengefasste Ergebnisse des Vergleichs der getrockneten Biomasse im Gewicht, eigene Erstellung	49
Tabelle 10: Mittelwerte der getrockneten Biomasse (4B-E und 6B-E) von Versuch O2, eigene Erstellung.....	50
Tabelle 11: Aufnahmen der Bodenproben, eigene Erstellung	50
Tabelle 12: Prozentanteil der Farbe im Image mit original und digitalen Darstellungen, eigene Erstellung.....	59
Tabelle 13: Vergleich der Wurzeltiefe Punktsaat vs. Streusaat, eigene Erstellung.....	60
Tabelle 14: Ergebnisse der Scherfestigkeitsmessung, Gemessen von MÜLLER, eigene Erstellung	61
Tabelle 15: Zusammenfassung der Codierung zur besseren Übersicht, eigenen Erstellung	62
Tabelle 16: Zusammenfassung der Beantwortung aller Forschungsfragen und Hypothesen, eigene Erstellung.....	77

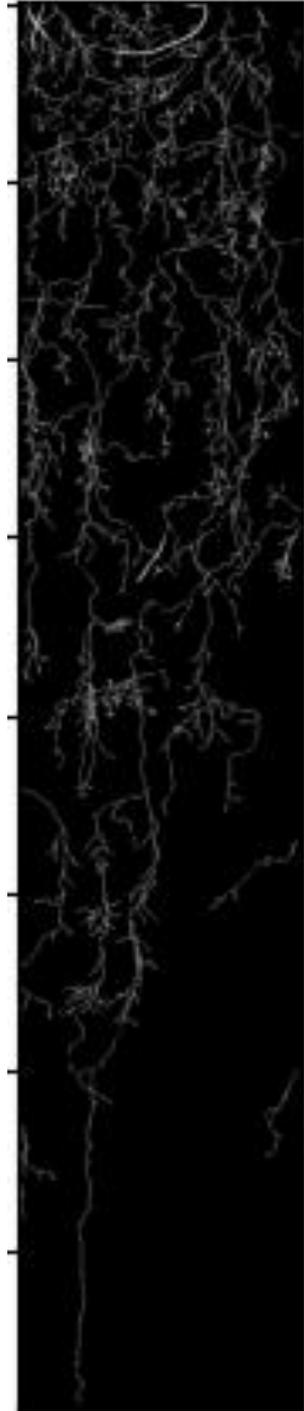
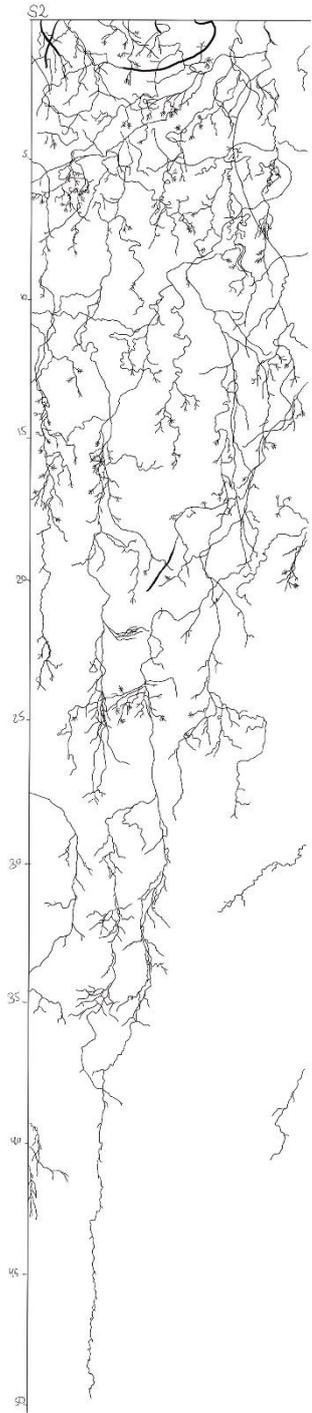
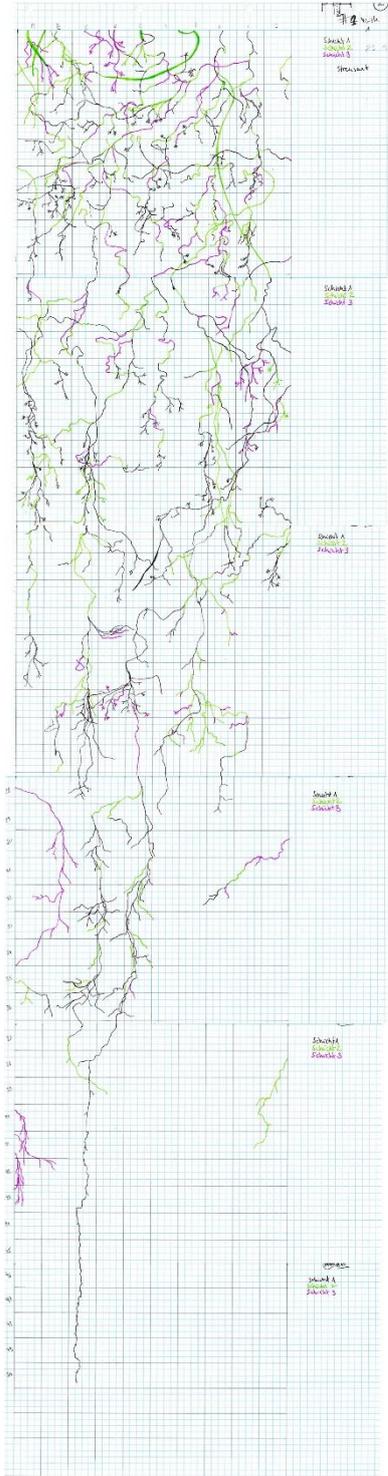
10. Anhang

Wurzelzeichnungen jeweils analog, digital und in PyCharm.

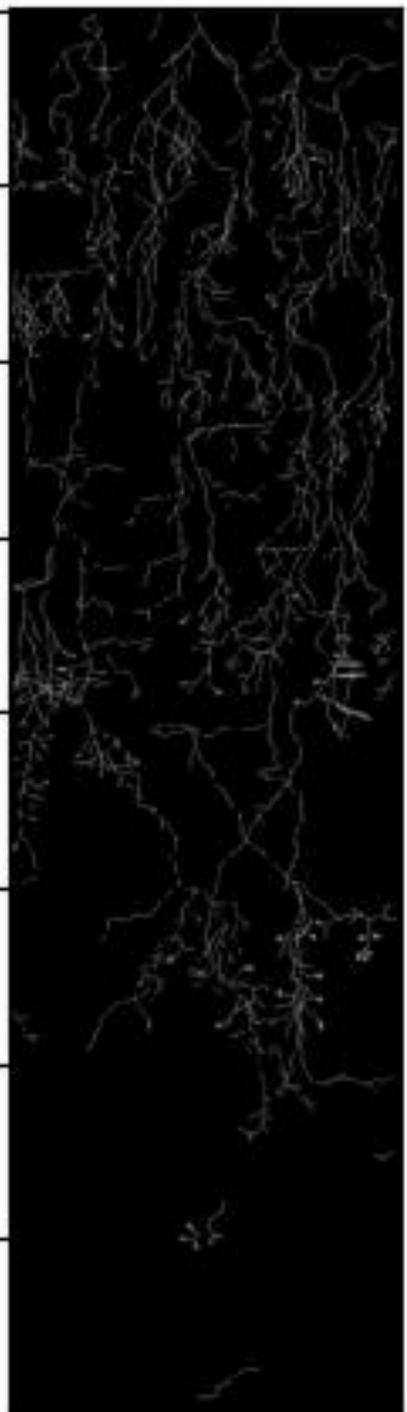
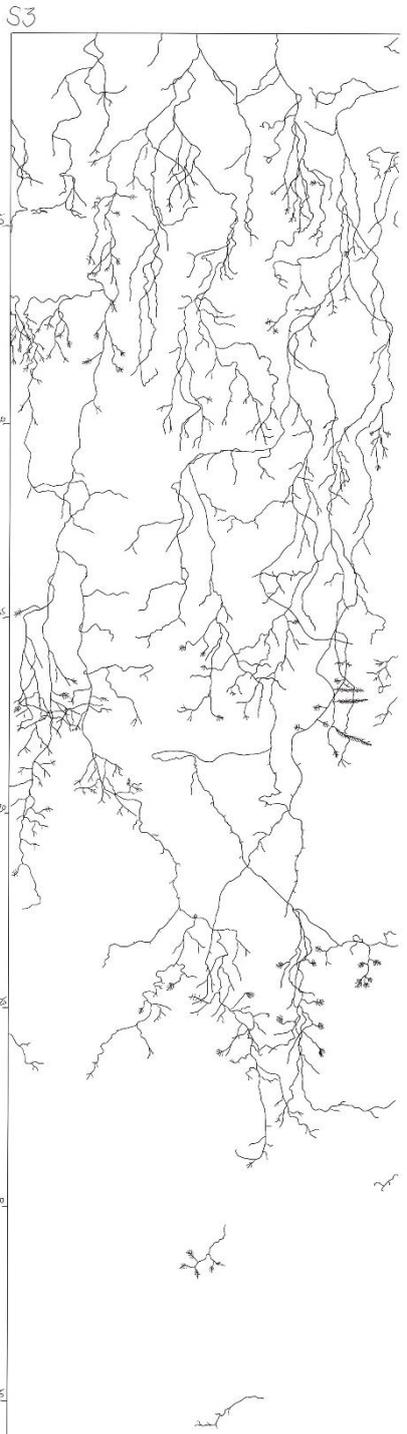
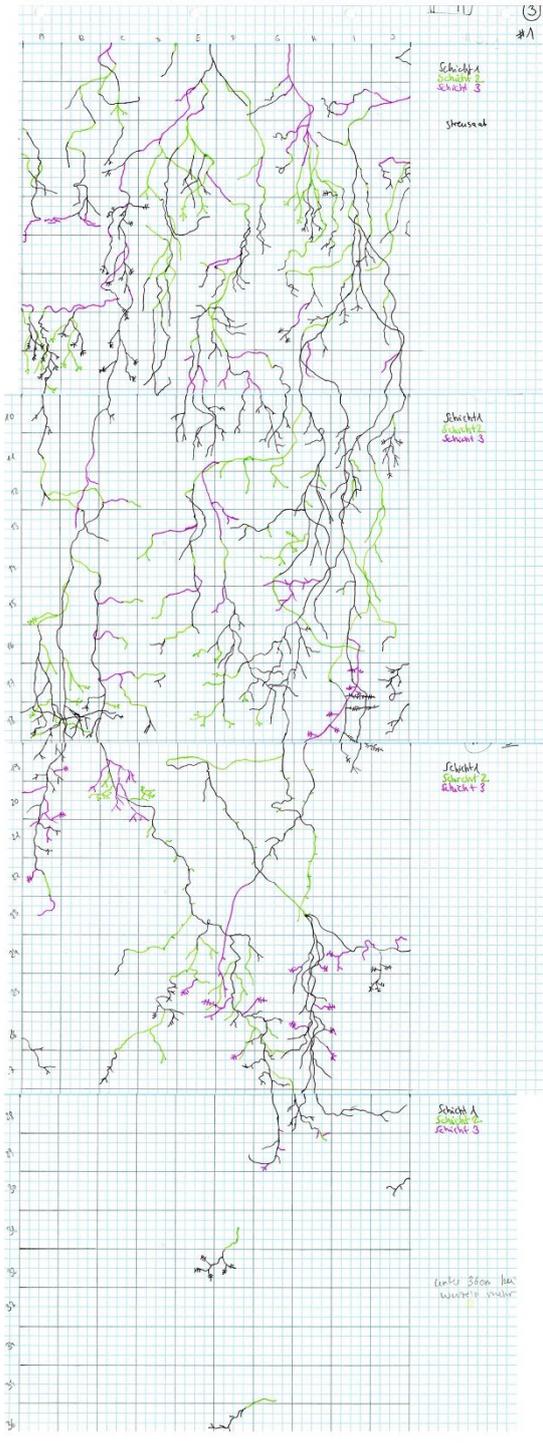
S1



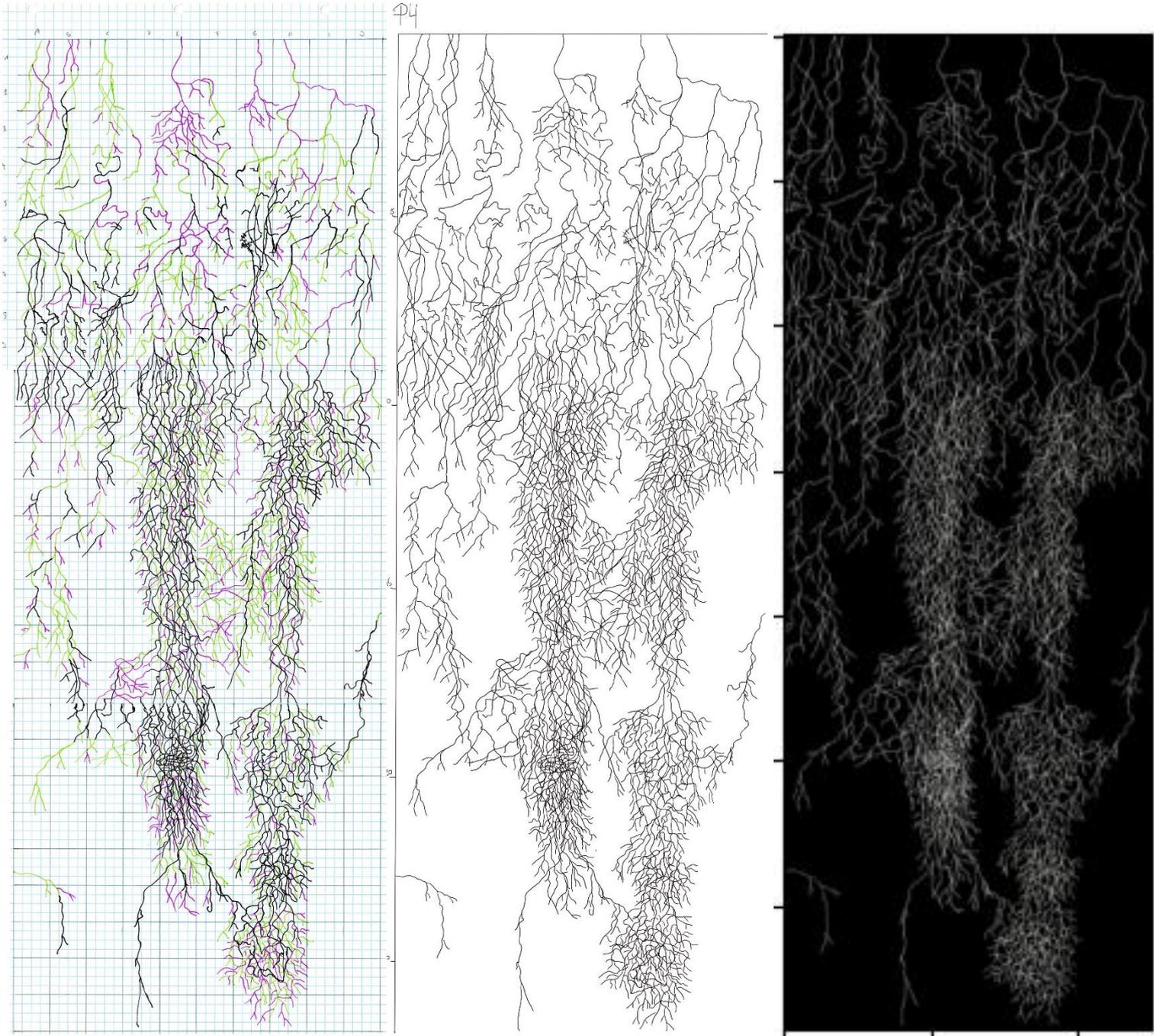
S2



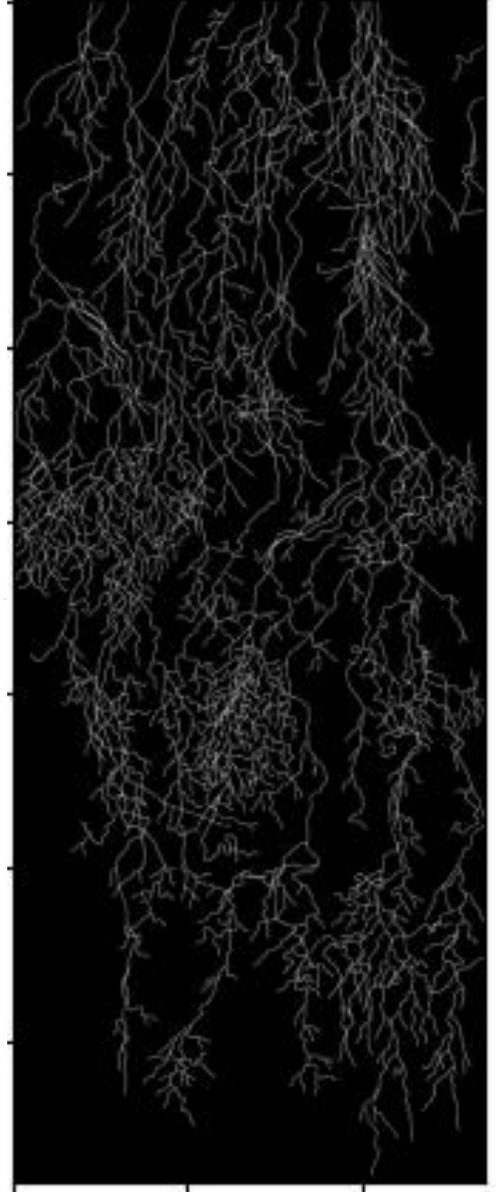
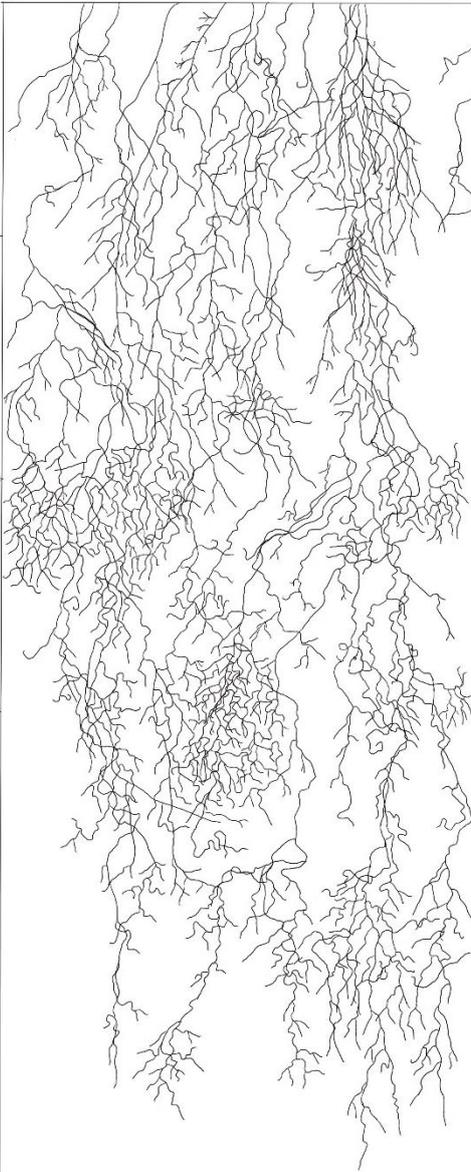
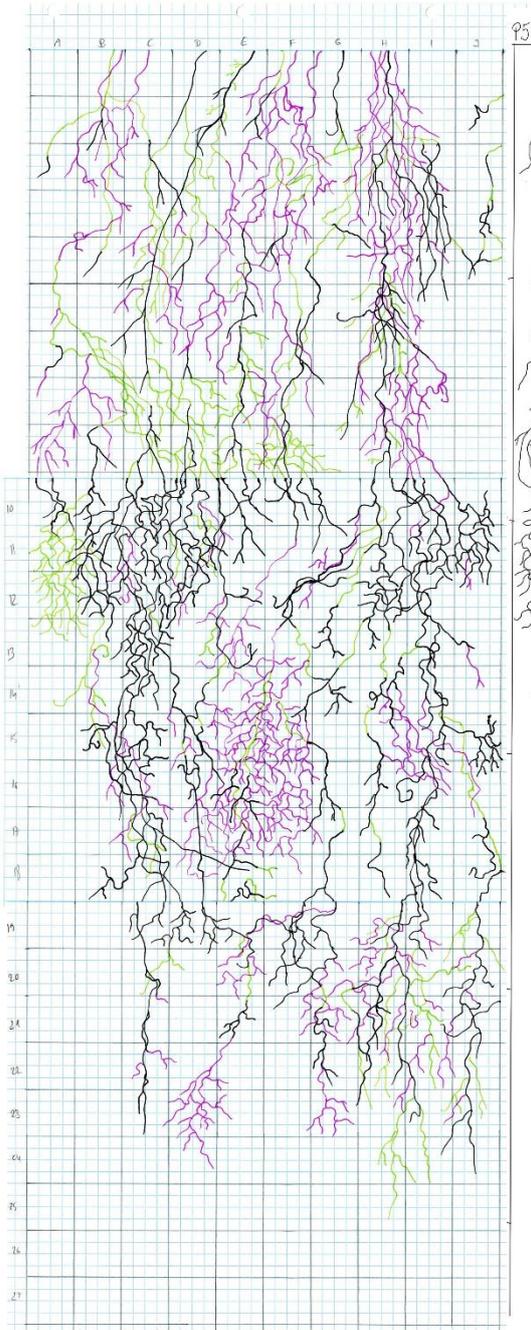
S3



P4



P5



P6

