

**Untersuchungen der ober- und unterirdischen Biomasse einer Gräser-Kräuter-  
Leguminosen Saatgutmischung in Substratvarianten**

**Research of above- and belowground biomass of a grass-herb-legumes-seed-  
mixture of soil variations**

**Masterarbeit**

eingereicht von

**Fichtenbauer Lisa BSc**

Betreuung:

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

Dipl.-Ing. Dr. Obriejetan Michael

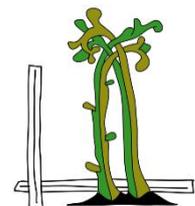
**Universität für Bodenkultur Wien**

*University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna*

**Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau (IBLB)**

*Department für Bautechnik und Naturgefahren*

*Wien, September 2017*









## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbständig verfasst 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.

Lisa Fichtenbauer, BSc

Ort, Datum



## **A. Vorwort und Danksagung**

Ich hatte das Privileg, meine Kindheit im ländlichen Raum genießen zu können und habe dadurch mein Interesse an der Natur gefunden, was ich bis jetzt im beruflichen als auch im persönlichen Leben leidenschaftlich verfolge. Die Komplexität der Naturkreisläufe und die vielfältigen Eigenschaften die Pflanzen bieten, sind für mich faszinierend.

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen Bedanken, die mir ihre Zeit zum Gedeih dieser Arbeit geschenkt haben. Besonderer Dank gilt meiner Familie, die es mir ermöglicht hat mich dieser Arbeit zu widmen.

Ein herzliches Dankeschön an meinen Betreuer Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. Rauch Johann Peter, der mich als Masterstudentin begleitete und mir die Gelegenheit gab, mich im Fachbereich der Ingenieurbiologie weiterzuentwickeln.

Ein spezieller Dank gebührt Dipl.-Ing. Dr. Obriejetan Michael für das Ermöglichen und Betreuen dieser Masterarbeit, die sehr gute Zusammenarbeit, die unzähligen Ratschläge und Diskussionen, die konstruktive Kritik und das freundschaftliche Verhältnis.

Ein besonderer Dank gilt auch meinen ArbeitskollegInnen der Fachgruppe Vegetationstechnik, die mir bei Fragen zur Seiten standen und für die flexible Zeiteinteilung.

## **B. Zusammenfassung**

Eine Begrünung mit einer artenreichen Zusammensetzung bietet der Bodenoberfläche langfristig einen guten Erosionsschutz und trägt zur Bodenstabilisation durch die Durchwurzelung bei.

Diese Arbeit soll einen Aufschluss zum Zusammenhang zwischen ober- und unterirdischer Biomasse von Begrünungen hinsichtlich Substratmischungen geben.

Mittels Feldversuch wurden zwei Bodenkörper vier Monate nach Einbauzeit betestet: Variante 1 mit einer mittel gestuften Körnungslinie und der Bodenart „schluffiger Sand“, Variante 2 mit einer eng eingestuften Körnungslinie und der Bodenart „Sand“. Beide Varianten wurden mit einer Gräser-Kräuter-Leguminosen Saatgutmischung begrünt.

Bei der oberirdischen Biomasse wurden die Parameter Deckungsgrad, maximale Sprosslänge und Trockengewicht analysiert; bei der unterirdischen Biomasse wurden Wurzelvolumen, root length density (RLD), Trockenbiomasse und Wurzel-Spross-Verhältnis ermittelt. Parallel dazu fand auch ein Boden-Monitoring der Substratkörper statt. Dabei wurden Körnungslinie, Porenvolumen, Wasserspeicherkapazität, organische Biomasse und Scherfestigkeit analysiert.

Während der Deckungsgradermittlung konnten visuell Unterschiede zwischen den beiden Versuchsvarianten ermittelt werden. Variante 1 - schluffig wies von Beginn bis zum Ende der Aufnahmen einen höheren Deckungsgrad auf, als Variante 2 - sandig. Die maximale Sprosslänge und das Trockengewicht der oberirdischen Biomasse waren demnach bei Variante 1 - schluffig ebenfalls höher, im Gegensatz zur Vergleichsvariante 2. Bei der unterirdischen Biomasseproduktion wird ersichtlich, dass Pflanzen in Variante 2 - sandig zwar eine geringe oberirdische Biomasseproduktion aufweisen, jedoch ein ähnliches bzw. größeres Wurzelsystem bilden. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass das Wurzel-Spross-Verhältnis bei Versuchsvariante 1 höher ist als bei Variante 2. Die Ergebnisse zu den Bodenparameter zeigen bei Variante 1 - schluffig eine höhere Wasserspeicherkapazität und mehr organische Bodenbestandteile. Die Scherfestigkeit nimmt mit zunehmender Tiefe ab, dabei lassen sich zwischen den Varianten aber keine Unterschiede deuten.

Untersuchungen betreffend Vegetation und Bodenparametern, sowie deren Zusammenhang, sind für die Ingenieurbiologie essentiell, um damit Rückschlüsse auf den geeigneten Pflanzenstandort bzw. auf das zu verwendende Pflanzenmaterial ziehen und einen bestmöglichen Erosionsschutz bieten zu können. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass Variante 2 eine geringere oberirdische Biomasseproduktion aufweist und dennoch ein ähnliches oder größeres Wurzelgeflecht ausbildet als Variante 1.

## C. Abstract

Greenery with high biodiversity offers a long term protection against erosion of the subsoil and contributes to the ground's stabilization through root penetration and the resulting higher cohesion.

The present thesis should give new findings relating aboveground and belowground biomass of vegetated soil regarding diverse substrate mixtures.

In the course of field experiments two soil bodies were tested four months after installation: Variation 1 with a middle-graded grain size distribution and a soil type „silty sand“, variation 2 with a narrow-graded grain size distribution and a soil type "sand". Both variations were covered with a grass-herb-legumes-seed-mixture.

Parameters of the aboveground biomass like dominance, maximum shoot length and dry weight were analyzed; for the belowground biomass the root volume, root length density (RLD), dry biomass, as well as root-shoot-relation were measured. Also soil parameters, a monitoring of the soil bodies (such as grain size, pore volumes, water capacity, organic biomass and shear strength) were investigated.

During the investigation of the cover ratio differences could be determined between both test variations visually. On variation 1 - silty a higher cover appeared over the whole process of the monitoring, compared to variation 2 - sandy. The maximum shoot length and the dry weight of the aboveground biomass of variation 1 - silty were also higher, in opposite to variation 2. The monitoring of belowground's biomass demonstrates, that the plants in variation 2 - sandy produce a lower aboveground biomass, but form a bigger root system. The investigations have shown that the root-shoot-relation is higher at variation 1 than at variation 2. The results to the ground parameter of variation 1 - silty show a higher pore volume, a higher water capacity and more organic soil components. The shear strength decreases with increasing depth, while no differences can be interpreted between the investigated variations.

In general, investigations which focus on vegetation and ground parameters, as well as their correlation and interaction, are essential for soil bioengineering techniques to offer a suitable plant use in accordance with the location, as well as erosion protection. The conducted studies showed that variation 2 presents a lower aboveground biomass production, but develops a similar or better root network than variation 1.

.



# INHALTSVERZEICHNIS

<b>EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG .....</b>	<b>I</b>
<b>A. VORWORT UND DANKSAGUNG .....</b>	<b>I</b>
<b>B. ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>II</b>
<b>C. ABSTRACT .....</b>	<b>III</b>
<b>INHALTSVERZEICHNIS.....</b>	<b>1</b>
<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>4</b>
1.1 PROBLEMSTELLUNG .....	4
1.2 STAND DER FORSCHUNG .....	5
1.3 ZIELSETZUNG .....	5
1.4 FRAGESTELLUNGEN UND HYPOTHESEN.....	6
<b>2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN .....</b>	<b>8</b>
2.1 KRAUTIGE PFLANZEN.....	8
2.1.1 Pflanzentaxonomie/-systematik.....	8
2.1.2 Die Sprossachse.....	9
2.1.3 Das Blatt.....	11
2.1.4 Die Wurzel.....	11
2.2 BODEN .....	25
2.2.1 Bodenfunktion .....	26
2.2.2 Bodenbestandteile .....	26
2.2.3 Bodengefüge und Bodenstruktur .....	27
2.3 BODEN ALS PFLANZENSTANDORT .....	32
2.3.1 Einfluss der Vegetation auf die Bodenstabilität .....	36
<b>3 VERSUCHSDESIGN UND MATERIALIEN .....</b>	<b>40</b>
3.1 UNTERSUCHUNGSGEBIET.....	40
3.2 VERSUCHSAUFBAU UND VARIANTEN.....	42
3.3 BEGRÜNUNGSMÄßNAHMEN UND –TECHNIK.....	46
3.4 ANWUCHSPFLEGE/FERTIGSTELLUNGSPFLEGE.....	48
<b>4 UNTERSUCHUNGSPARAMETER UND METHODIK .....</b>	<b>49</b>
4.1 ENTNAHME VON BOHRKERNEN .....	50
4.2 OBERIRDISCHE BIOMASSE.....	51
4.2.1 Deckungsgrad.....	52

4.2.2	Maximale Sprosslänge und Trockengewicht der oberirdischen Biomasse.....	53
4.3	UNTERIRDISCHE BIOMASSE.....	53
4.3.1	Wurzelanalysen/Wurzeln auswaschen .....	54
4.3.2	Wurzelanalyse (WinRHIZO).....	55
4.3.3	Trockengewicht Wurzelmasse .....	57
4.3.4	Wurzel-Spross-Verhältnis.....	58
4.4	BODENPARAMETER .....	58
4.4.1	Siebanalyse und Sedimentation .....	59
4.4.2	Porenvolumen.....	62
4.4.3	Wasserspeicherkapazität .....	63
4.4.4	Organische Bestandteile .....	65
4.4.5	Scherfestigkeit.....	66
<b>5</b>	<b>ERGEBNISSE UND INTERPRETATION.....</b>	<b>68</b>
5.1	OBERIRDISCHE BIOMASSE.....	68
5.1.1	Deckungsgrad.....	68
5.1.2	Maximale Sprosslänge.....	70
5.1.3	Trockengewicht.....	71
5.2	UNTERIRDISCHE BIOMASSE.....	73
5.2.1	Wurzelvolumen .....	73
5.2.2	Root length density RLD.....	74
5.2.3	Trockengewicht.....	75
5.2.4	Root weight density RWD .....	76
5.2.5	Wurzel-Spross-Verhältnis.....	77
5.3	BODENPARAMETER .....	79
5.3.1	Korngrößenverteilung und Bodenart .....	79
5.3.2	Porenvolumen.....	81
5.3.3	Wasserspeicherkapazität .....	82
5.3.4	Organische Bestandteile .....	84
5.3.5	Scherfestigkeit.....	85
<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSENDE ANALYSE UND DISKUSSION .....</b>	<b>87</b>
<b>7</b>	<b>PRAXISEMPFEHLUNGEN UND AUSBLICK .....</b>	<b>93</b>
<b>8</b>	<b>QUELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>95</b>
8.1	LITERATURVERZEICHNIS.....	95
8.2	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	102
8.3	TABELLENVERZEICHNIS.....	105

8.4	DIAGRAMMVERZEICHNIS .....	106
	<b>LEBENS LAUF .....</b>	<b>107</b>

## 1 Einleitung

Pflanzen kommen in der Ingenieurbiologie zum Einsatz, da sie durch ihre vielfältigen technisch-biologischen Eigenschaften einen nachgewiesenen Nutzen für diverse Bauwerke haben, beispielsweise zur Sicherung von Böschungen, Hängen, Dämmen, Ufern, Begleitflächen von Infrastrukturen etc. Pflanzen und Pflanzenteile werden als lebende Baustoffe eingesetzt, sodass ihre Entwicklung in engem Zusammenhang mit Boden und Gestein eine dauerhafte Sicherung gegen Erosion bietet.

Pflanzen haben sich im Laufe der Geschichte an die unterschiedlichsten Umwelteinflüsse angepasst. Die daraus entstandenen Anpassungen und Eigenschaften der Pflanzen an die Umwelteinflüsse, macht sich das Bauwesen der Ingenieurbiologie schon seit Jahrhunderten zunutze (E.F.I.B., 2015).

Jedoch eignen sich nicht alle Pflanzen für diesen Einsatz, nur jene, die eine stabilisierende Wirkung im Hinblick auf mechanische und physiologische Prozesse haben. Folgende technische Eigenschaften und Fähigkeiten sollten die Pflanzen für die Verwendung von ingenieurbiologischen Bauweisen gemäß E.F.I.B. (2015) aufweisen:

- Erosionsschutz (ober- und unterirdische Pflanzenteile)
- Elastizität und Bruchfestigkeit
- Bodendurchwurzelung
- Bodenentwässerung und Standsicherung

Durch die Eigenschaften die Pflanzen aufweisen ergeben sich Möglichkeiten, die Pflanzen in vier Gruppen einordnen zu lassen, welche mehrfachen Nutzen bringen und vielseitig anwendbar sind:

- Technische Wirkungen
- Ökologische Wirkungen
- Gestalterische Wirkungen
- Ökonomische Wirkungen

### 1.1 Problemstellung

Grünflächen sind durch ihren hohen Pflegeaufwand sehr kostenintensiv. Krautiger Bewuchs, der in seiner Biomasseproduktion gering ist, kann jedoch die Unterhaltskosten für die Grünraumpflege erheblich minimieren. Eine dichte und geschlossene Grasnarbe mit einer artenreichen Zusammensetzung von Gräsern und Kräutern bietet der Bodenoberfläche langfristig einen guten Erosionsschutz und trägt zur Bodenstabilisation durch die Durchwurzelung bei. Stressfaktoren wie Trockenheit und geringer Nährstoffanteil im Boden, zwingen Pflanzen tiefer in den Boden zu wurzeln - auf der Suche nach für sie verfügbare Nährstoffe und Wasser.

Wie tief die einzelnen Gräser- und Kräuterarten wurzeln und wie deren Wurzelbild aussieht ist bereits bekannt. Die österreichische Botanikerin Kutschera hat bereits in den 50er Jahren Forschungen dahingehend unternommen. Wissenschaftliche Untersuchungen jedoch, bei denen unterschiedliche Korngrößenverteilungen von Substraten und der Zusammenhang der Durchwurzelung auf das Wurzelbild durchgeführt und erforscht wurden sind rar.

Die Erforschung der Wurzelsysteme der unterschiedlichen Pflanzengattungen und -arten hat für die Ingenieurbiologie einen hohen Stellenwert. Zwischen zeitlichen und räumlichen Entwicklungen dieser lassen sich Zusammenhänge auf den technisch-biologischen Wirkungsgrad ingenieurbiologischer Baumaßnahmen zurückführen.

## **1.2 Stand der Forschung**

Untersuchungen von KUTSCHERA und LICHTENEGGER (1960) haben gezeigt, dass der Wurzeltiefgang von Wild- und Kulturpflanzen artspezifisch, genetisch festgelegt ist und die maximale Wurzeltiefe sukzessive im Verlauf der Pflanzenentwicklung erreicht wird. Der Hauptanteil der Wurzeln, bis zu 90 Prozent der Wurzelrockenmasse, ist bei optimaler Wasser- und Nährstoffversorgung im Oberboden in den ersten 0 - 30 cm Tiefe zu finden. In zunehmender Tiefe des Bodens nimmt die Wurzelmasse in der Regel ab. Die Durchwurzelungsintensität ist abhängig von bestimmten Parametern, wie z.B. die Größe und Form des Wurzelsystems, seiner Ausbreitung in der Fläche, der Wasseraufnehmenden Wurzeloberfläche, bodenphysikalische Bodeneigenschaften sowie exogenen Einflüsse (SCHROETTER, 2015).

Untersuchungen des Bundesforschungszentrums für Wald haben gezeigt, dass der gemessene Bodenabtrag bei simulierten Starkregen im Wesentlichen vom Bedeckungsgrad des Pflanzenbewuchses der Bodenoberfläche abhängt. Im Besonderen wird die Situation kritisch, wenn nach Rutschungen oder technischen Eingriffen keine Vegetationsschicht mehr vorhanden bzw. deren Bodendeckung nicht ausreichend ist. Wenn der Bewuchs einen Deckungsgrad unter 15 % zeigt, hat die Vegetation keine erosionshemmende Wirkung mehr. Damit eine signifikante Reduktion der Erosion ersichtlich wird, ist ein Deckungsgrad von mindestens 60-70 Prozent notwendig (KOHL, 2017).

## **1.3 Zielsetzung**

Die Masterarbeit beschäftigt sich mit Faktoren, die Einfluss auf das Wurzelwachstum und die Entwicklung der oberirdischen Biomasse von krautigen Pflanzen in Substratmischungen mit unterschiedlichen Korngrößenverteilungen und organischem Bodenanteil nehmen. Dafür wird ein Feldversuch angelegt, durch den das Wachstum der krautigen Vegetation hinsichtlich deren Wurzelentwicklung bzw. dem Verhältnis von Biomasse und Wurzelmasse untersucht und der Einfluss der Substratmischungen festgestellt werden soll.

Speziell im Fokus stehen die Messparameter der Vegetation und der Substratmischungen, wie ober- und unterirdische Biomasse, Deckungsgrad, Wurzelvolumen und –länge, das Porenvolumen, Wasserspeicherkapazität, organischer Anteil im Substrat, als auch die Scherfestigkeit in Bezug auf das Wurzelwachstum.

Die vom Versuchsdesign erhaltenen Daten sollen Aufschluss auf den Zusammenhang der ober- und unterirdischen Biomasseproduktion und den Substratmischungen (Sieblinie) geben. Zusätzliche Wurzelsans im 3D Scanner sollen darüber Aufschluss geben.

## 1.4 Fragestellungen und Hypothesen

Für die Untersuchungen wurden die nachfolgenden Arbeitshypothesen und Arbeitsfragen formuliert:

- Wenn der Substratkörper einen höheren organischen Anteil besitzt, dann ist es wahrscheinlicher, dass der Deckungsgrad der Bepflanzung einen höheren Deckungsgrad aufweist als eine Bepflanzung auf einem Bodenkörper mit geringerem organischem Anteil.
- Bei Böden mit höherem Anteil an organischer Substanz ist die oberirdische Biomasseproduktion gesteigert.
- Pflanzen bilden in Substratmischungen, die eine Sieblinie mit einer groben-mittleren Körnung aufweisen ein homogenes Wurzelsystem/-bild und wurzeln eher in die Tiefe, auf der „Suche“ nach pflanzenverfügbaren Nährstoffen und Wasser.
- Pflanzen in Substratmischungen hohen Nährstoffgehalts und einer Sieblinie mit einer feinen Körnung bilden im oberen Bereich ein ausgeprägtes Wurzelsystem, was in die Tiefe abnimmt, da für die Pflanzen notwendige Nährstoffe und Wasser ausreichend im oberen Bereich vorhanden sind.
- Pflanzen bilden in Substraten mit hohen Schluff-Fraktionen mehr ober- und unterirdische Biomasse als Pflanzen in Substraten mit geringen Schluff-Fraktionen. Das Wurzel-Spross-Verhältnis ist jedoch in beiden Substratvarianten gleich.
- Substratkörper mit hohem Porenvolumen und Wasserspeicherkapazität werden in die Tiefe hin weniger durchwurzelt.
- Sandige Böden mit geringerem organischem Anteil weisen ein geringeres Wurzel-Spross-Verhältnis auf, als schluffige Bodenkörper mit höherem organischem Anteil.
- Substratkörper mit einer weitgestuften Körnungslinie weisen eine höhere Scherfestigkeit auf als einer mit einer enggestuften.

Aus den Arbeitshypothesen lassen sich die nachfolgenden zentralen Forschungsfragen dieser Arbeit ableiten:

- 1) Welchen Einfluss haben Substratmischungen auf die ober- und unterirdische Vegetationsentwicklung?
- 2) Welche Unterschiede hinsichtlich der geologischen Bodenparameter lassen sich zwischen den Substratkörpern feststellen?
- 3) Wie wirken sich das Wurzelvolumen und die Körnung der Substrate auf die Scherfestigkeit des Bodens aus?

## 2 Theoretische Grundlagen

Die Fragestellung wie Substrate Einfluss auf das Wurzelbild und –wachstum der Vegetation nehmen erfordert einen interdisziplinären Ansatz. Dafür werden zu Beginn theoretische Grundlagen zu ober- und unterirdischen Pflanzenteilen (Blatt, Sprossachse und Wurzel), zum Boden als Pflanzenstandort und schließlich hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen Pflanzen und Bodenstabilität erläutert.

### 2.1 Krautige Pflanzen

Als krautige Pflanzen werden jene Pflanzen bezeichnet, die kein sekundäres Dickenwachstum aufweisen und daher nicht verholzen. Es wird unterschieden zwischen einjährigen, zweijährigen und mehrjährigen krautigen Pflanzen. Die Fortpflanzung kann sowohl generativ mittels Samenbildung als auch vegetativ durch ungeschlechtliche Vermehrung erfolgen. Einjährige Pflanzen sterben nach der Blüte ab wohingegen zweijährige und mehrjährige Pflanzen zur Vegetationsruhe in ihrem Speicherorgan überdauern und die oberirdische Biomasse abstirbt. Zu Beginn der Vegetationsperiode wird ausgehend vom Speicherorgan erneut oberirdische Biomasse erzeugt.

Gräser und Kräuter gehören zu den krautigen Pflanzen. In diesem Kapitel werden monokotyle und dikotyle Pflanzen beschrieben und auf diese näher eingegangen, da sie als Begründung für den Versuchsaufbau verwendet und als Datengrundlage herangezogen werden. Ebenfalls wird der Fokus dieser Arbeit vermehrt auf die Wurzel gelegt, und deshalb ausführlicher beschrieben als die Sprossachse und das Blatt.

#### 2.1.1 Pflanzentaxonomie/-systematik

Höhere Pflanzen (Kormophyten) haben sich im Laufe der Evolution an das Landleben angepasst und entwickelten dafür eine spezielle Organisationsform. Diese Organisationsform ist der Kormus, dessen Grundorgane sich in Sprossachse, Blatt und Wurzeln unterteilen. Die am häufigsten vorkommenden Kormophyten sind die Samenpflanzen (Spermatophyten). Diese wiederum teilen sich in zwei Klassen, Nacktsamer (Gymnospermen) und Bedecktsamer (Angiospermen). Die Nadelgehölze (Polycotylen) werden den Gymnospermen zugeordnet. Deren Samen liegen offen auf, wie beispielsweise bei einem Zapfen. Die Angiospermen teilen sich weiter in zwei Gruppen auf, die einkeimblättrigen Pflanzen (Monokotylen) und zweikeimblättrigen Pflanzen (Dikotylen).

Abbildung 1 veranschaulicht einen Teilausschnitt der Systematik der Pflanzen sowie die Unterteilung der Kormophyten.

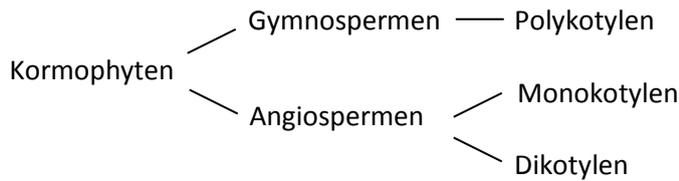


Abbildung 1: Ausschnitt der Pflanzentaxonomie

Bei den Monokotylen und Dikotylen kommt die Bezeichnung der „Blättrigkeit“ von Kotyledon = Keimblatt. Wie die Namensschreibung verrät, wächst aus dem Samen der einkeimblättrigen Pflanzen ein Spross mit einem Keimblatt (z. B. bei Gräsern) und bei den zweikeimblättrigen ein Spross mit zwei Keimblättern (z. B. bei Kräutern und Leguminosen).

Normalerweise besteht der sogenannte Kormus aus der Wurzel sowie der Sprossachse. Die Sprossachse gliedert sich wiederum in Stängel und Blatt, die charakteristischerweise Photosynthese betreiben (NULTSCH, 2001). In der nachfolgenden Abbildung ist die Organisationsform des Kormus anhand einer einkeimblättrigen und zweikeimblättrigen Pflanze dargestellt:

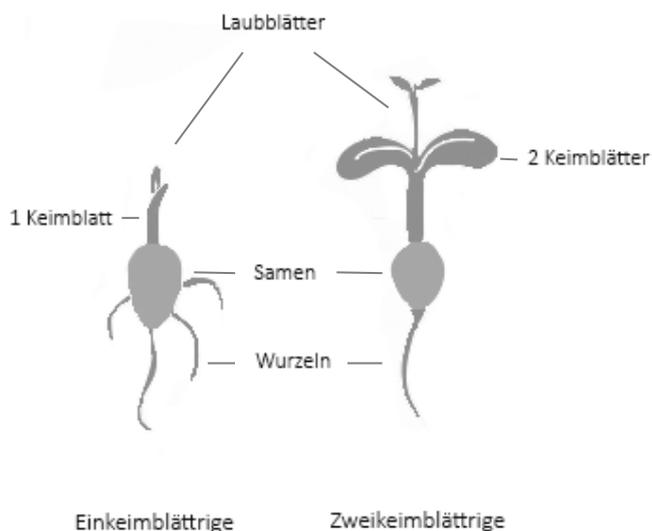


Abbildung 2: Organisation des Kormus bei einer monokotylen und dikotylen Pflanze (verändert nach EHA & DELUCA, 2017)

### 2.1.2 Die Sprossachse

Die Sprossachse ist durch ihren meist aufrechten Wuchs, ihrer adäquaten Stellung und der Anordnung der Blätter charakteristisch. Sie ist nach dem Licht ausgerichtet und dient als Traggerüst der Blätter. Als weitere Aufgabe steht der Sprossachse der Transport von Wasser und Nährstoffen zwischen Wurzel und Blatt und umgekehrt zu (NULTSCH, 2001).

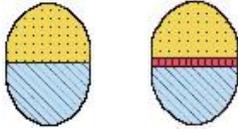
Die Sprossachse bei krautigen Pflanzen lässt sich, im Längsschnitt betrachtet, in drei bis vier Zonen einteilen: **Embryonalzone**, **Determinationszone**, **Differenzierungszone** und teilweise in das **sekundäre Dickenwachstum**. Diese Abschnitte unterscheiden sich in der Art ihrer Meristeme bzw. ihrer Zellteilungsaktivität. In der Embryonalzone sind Meristeme mit einer hohen Zellteilungsaktivität, jedoch nimmt diese Aktivität bis in die Differenzierungszone ab und es werden ihnen andere Aufgaben zugeteilt (HESS, 2004).

### Primäre Sprossachse

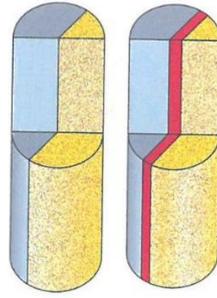
Bei der primären Sprossachse lassen sich folgende Gewebearten nach LÜTTGE & KLUGE (2012) unterscheiden:

- **Abschlussgewebe** – dieses ist an der Oberfläche der Sprossachse zu finden, es ist ein einschichtiges Hautgewebe, welches als Epidermis bezeichnet wird.
- **Festigungsgewebe** – diese Gewebearten sind meist lang gestreckte Zellen mit verdickten Wänden, die für die Festigung der Pflanze verantwortlich sind. Dabei werden jedoch auch Kollenchyme, die aus lebenden Zellen bestehen, und Sklerenchyme, die sich aus toten Zellen zusammensetzen, unterschieden.
- **Grundgewebe** – dieses besteht aus Zellen, die in alle Richtungen etwa den gleichen Durchmesser besitzen, was auch als isodiametrisch bezeichnet wird. Die Zellen dieses Gewebes werden Parenchym genannt. Parenchymzellen können je nach Form differenziert werden und finden sich in der Rinde, den primäre Markstrahlen und dem Mark wieder.
- **Leitgewebe** – das Leitgewebe ist in Strängen zusammengefasst. Dabei wird zwischen Xylem und Phloem unterschieden. Das Xylem dient zum Transport von Wasser und Nährstoffen. Im Phloem werden die von den Blättern produzierten Assimilate in der Pflanze verteilt. Beim Aufbau der Leitbündel wird zwischen Dikotyloden und Monokyloden differenziert.
  - Leitbündel von Dikotyloden – Beim kollateral offenen Leitbündel sind Xylem und Phloem durch ein Kambium voneinander getrennt (siehe Abbildung 3 und 4).
  - Leitbündel von Monokyloden – Ein kollateral geschlossener Leitbündeltyp ist für diese Pflanzenunterteilung typisch. Dabei liegen Xylem und Phloem direkt nebeneinander (siehe Abbildung 3 und 4).

Abbildung 3 und 4 zeigt links ein kollateral geschlossenes und rechts ein kollateral offenes Leitbündel. Abbildung 3 veranschaulicht den Querschnitt von Leitbündeln und in Abbildung 4 sind diese in der Mitte quer halb geschnitten. Blau eingefärbt ist der Teil des Xylems, gelb gekennzeichnet ist der Teil des Phloems und rot ist das Kambium.



**Abbildung 3: Anordnung der Leitbündel im Querschnitt**  
 (links) kollateral geschlossenes, (rechts) kollateral  
 offenes Leitbündel (verändert nach SCHÜTZ, 2013)



**Abbildung 4: Anordnung der Leitbündel im Querschnitt**  
 durch den Stängel (verändert nach NULTSCH, 2001)

## Sekundäre Sprossachse

Die sekundäre Sprossachse wird auch als sekundäres Dickenwachstum bezeichnet und ist bei mehrjährigen Pflanzen, wie Sträuchern und Bäumen von enormer Wichtigkeit. Leitbahnen müssen erneuert werden und die Festigung der Pflanze ist notwendig.

Bei einjährigen oder mehrjährigen krautigen Pflanzen ist das primäre Dickenwachstum ausreichend. Die Sprossachse wird bis zum Absterben durch den relativ kleinen Kormus ausreichend versorgt und gefestigt.

### 2.1.3 Das Blatt

Die Blätter sind in der Regel Organe, die für die Photosynthese zuständig und somit auch als Energielieferant für die Pflanze verantwortlich sind. Das Blatt ist ein weiteres Grundorgan des Kormus. Blätter weisen eine hohe Vielfalt auf, was genetisch determiniert und artspezifisch ist. Dies kann auch durch Anpassungen an unterschiedliche Umwelteinflüsse geändert werden. Die innere und äußere Organisation der Blätter ist daher artspezifisch, was zur Vielfalt der Blattstrukturen und -texturen beiträgt (NULTSCH, 2001).

### 2.1.4 Die Wurzel

Die Wurzel ist das zentrale unterirdische Organ von Pflanzen und verkörpert die im Boden wachsende Komponente. Die Embryonen der Kormophyten sind bipolar angeordnet, der Wurzelpol und der Sprosspol sind gegenüber festgesetzt. Das heißt, bei der Keimung wächst der Spross in Richtung Licht bzw. Sonne (produziert oberirdische Biomasse) und die Wurzel in den Boden (entwickelt unterirdische Biomasse). Die Wurzeln verzweigen sich und bilden je nach Wurzeltyp und –art ein komplexes Wurzelsystem. Der Scheitel der Wurzel differenziert sich von der Sprossachse durch fehlende Blattknospen und durch eine bestehende Wurzelhaube, die Kalyptra. Wie bei der Sprossachse sind die Initialzellen stockwerkartig angeordnet. Bei den Dikotyledonen findet die Teilung bei den äußeren

Initialzellen antiklin statt und bei der Rhizodermis wird eine perikline Teilung durchgeführt, welche die Wurzelhaube bildet. Bei Monokotyledonen sind die Initialzellen nicht so deutlich geschichtet. Unterhalb der Wurzelhaube, fast ganz an der Spitze der Wurzel, teilen sich die Zellen fast gar nicht (NULTSCH, 2001).

Die Wurzeln sind beschränkt dazu in der Lage, sich an die jeweiligen Standortbedingungen anzupassen und unterschiedliche Wurzelsysteme auszubilden. Wurzeln werden i.d.R. nach ihrer Funktion bzw. Durchmesser klassifiziert. Skelettwurzeln bezeichnen jene Wurzelabschnitte, die sekundär verdickt sind. Die jüngsten Wurzelverzweigungen werden als Faserwurzeln bezeichnet. Sie dienen der Aufnahme von Wasser, Nährstoffen und Sauerstoff. Im Alter entwickeln sich diese zu anderen Wurzeln, wie Grob- oder Starkwurzeln. Die kurzlebigen Wurzelhaare leisten dem Aufnahmeorgan Hilfe (BALDER, 1998).

Die Klassifizierung der Wurzeldurchmesser wird nach KÖSTLER et al. (1968) (siehe Tabelle 1) und POLOMSKI & KUHN (1998) (siehe Tabelle 2) angegeben. Gem. KÖSTLER et al. (1968) werden drei Wurzeltypen und deren Durchmesser in Zentimeter unterteilt, wohingegen POLOMSKI & KUHN (1998) vorerst zwei Wurzeltypen grob einteilen und diese weiter in Untergruppen gliedern:

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

Wurzeltyp	Durchmesser
Schwachwurzel	> 0,2 bis 0,5 cm
Feinwurzel	> 0,1 bis 0,2 cm
Feinstwurzel	< 0,1 cm

**Tabelle 2: Einteilung der Wurzeln nach ihrem Durchmesser laut POLOMSKI & KUHN (1998)**

Wurzelgruppe	Wurzeltyp	Durchmesser
<i>Skelettwurzeln</i>	Starkwurzeln	> 50 mm
	Derbwurzeln	> 20-50 mm
	Grobwurzeln	> 5-20 mm
	Schwachwurzeln	> 2-5 mm
<i>Feinwurzeln</i>	Langwurzeln	> 1-2 mm
	Kurzwurzeln	< 1 mm

## Aufbau der Wurzel

Typisch für die meisten Kormophyten ist die Ausprägung der Scheitelmeristeme (Apikalmeristeme). Bei den Angiospermen und Gymnospermen ist anstatt eines Scheitelmeristemes ein vielzelliges

Bildungsgewebe im Wurzelvegetationspunkt vorhanden (Apikalmeristem). Ebenfalls wie bei den Blättern sind die Wurzelausprägungen abhängig von der Pflanzenart und der Genetik (LÜTTGE & KLUGE, 2012).

Folgende Abbildung gibt eine Übersicht über die Entwicklung der Wurzel:

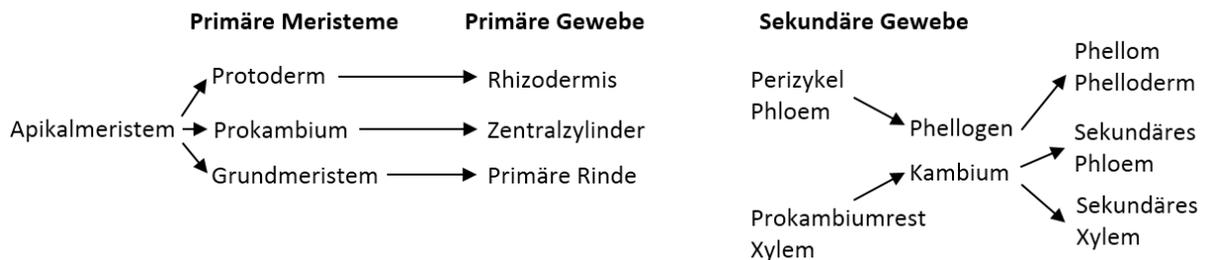


Abbildung 5: Entwicklung der Wurzel (verändert nach HIETZ et al., 2009)

Nachdem die Wurzel lediglich im vorderen Bereich neues Gewebe produziert, nimmt das Alter des Wurzelgewebes von der Basis bis zu den einzelnen Wurzelspitzen ab und der Differenzierungsgrad ändert sich.

Die Wurzel lässt sich im Längsschnitt betrachtet in vier Abschnitte einteilen: **Wurzelhaarzone**, **Streckungszone**, **meristematische Zone** und **Wurzelhaube**. Diese Zonen unterscheiden sich in der Art ihrer Meristeme und Zellteilungsaktivität. Die Wurzelhaube schützt die meristematischen Zellen vor mechanischen Beschädigungen und verschleimt zum Schutz. Die Schleimschicht schützt die Wurzel beim Wachsen in den Boden. Die meristematische Zone geht ohne erkennliche Grenze in die Streckungszone über. Dort findet, anders als beim Spross, die Zellstreckung statt. Die Wurzelhaarzone ist äußerlich an den Wurzelhaaren erkennbar und die Lebensdauer der einzelnen Wurzelhaare beschränkt sich auf nur wenige Tage. Die Oberfläche der Wurzeln wird durch unzählige kleine Wurzelhaare vergrößert, was die technischen Funktionen, Aufnahme von Nährstoffen, Wasser und Luft, verstärkt. Durch die Ausbildung von Seitenwurzeln können die Wurzeln verzweigen (HESS, 2004).

Abbildung 6 zeigt den Bau der Wurzel im Längsschnitt nach MERBACH et al., 2001):

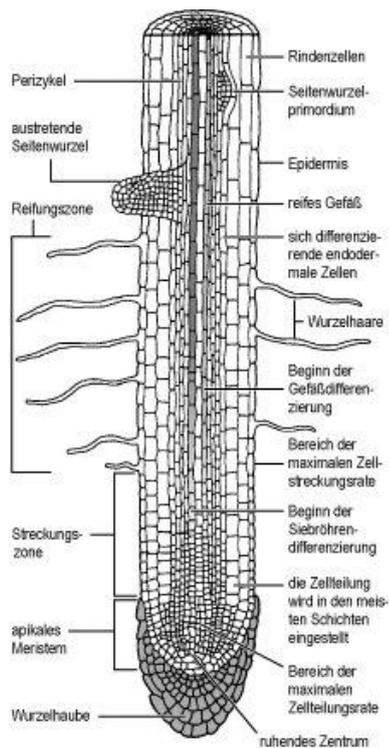


Abbildung 6: Bau der Wurzel schematisch dargestellt (MERBACH et al., 2001)

### Primärer Bau

Nach der Differenzierung der Gewebe liegen nachfolgend angeführte Primärgewebe vor. Ihre Anordnung unterscheidet die Pflanzen in Einkeimblättrige und Zweikeimblättrige. Im Querschnitt der Wurzeln ist das Gewebe radiärsymmetrisch angeordnet. Das radiäre Muster bleibt im Teil der Primärwurzel unverändert.

Der primäre Bau der Wurzel ist durch unterschiedliche Gewebe und Wurzelbestandteile gestaltet: Die Wurzelepidermis (Rhizodermis) umgibt von außen das Gewebe, in Form einer einschichtigen Zellschicht, von der später die Wurzelhaare ausgebildet werden. Sie ist das wichtigste Absorptionsgewebe der Pflanze. Gleich angrenzend ist die Wurzelrinde verortet. Ihre äußerste Schicht, die Exodermis, bildet nach Absterben der kurzlebigen Rhizodermis das sekundäre äußere Abschlussgewebe der Wurzel. Zwischen ihr und der innersten Zellschicht der Wurzelrinde, der Endodermis, liegen Parenchymzellen (Rindengewebe), welche die Speicherung von Nährstoffen zur Aufgabe haben. Die äußerste Schicht des Zentralzylinders, das Perizykel, besteht aus teilungsfähigen Zellen und ist für das (sekundäre) Dickenwachstum einer Wurzel verantwortlich (siehe Abbildung 7). Im Zentralzylinder befinden sich die Leitungssysteme (LÜTTGE & KLUGE, 2012). Im Zentralzylinder liegen, je nach Pflanzenart, ring- bzw. strahlenförmig angeordnet, die zum Leitgewebe gehörenden

Elemente Xylem und Phloem. Das Xylem ist für den Transport von Wasser und Ionen aus der Wurzel in den Spross verantwortlich. Das Phloem wiederum transportiert mit den Sieb- und Begleitzellen die Assimilate aus dem Spross in die Wurzel (NULTSCH, 2001).

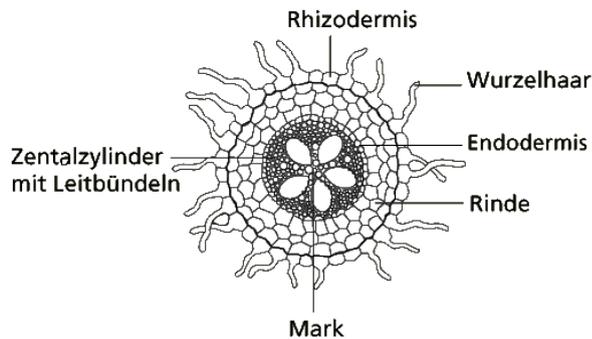


Abbildung 7: Querschnitt der Wurzel (verändert nach Bibliographisches Institut GmbH, 2017)

Die Leitsysteme sind in Gruppen durch das primäre Xylemelement und dem primären Phloem zusammengesetzt. Nachdem die Ausbildung und die Anzahl der Gruppen der Leitsysteme zwischen den Pflanzen unterschiedlich sind, lassen sich Wurzeln in diarche, triarche, tetrarche und polyarche Leitbündelsysteme unterteilen (siehe Abbildung 8). Innerhalb der dikotylen Angiospermen ist die diarche und tetrache Anordnung der Leitbündel die am häufigsten vorkommende. Vielstrahlige, polyarche Leitsysteme werden bei monokotylen Angiospermen und ebenfalls bei einigen Gymnospermen ausgebildet.

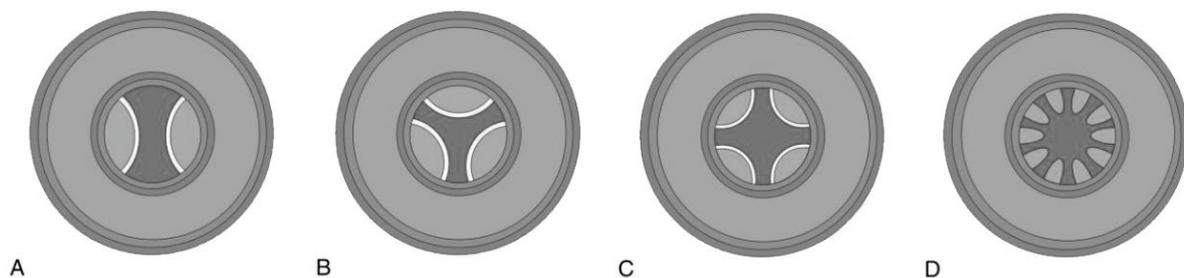


Abbildung 8: Leitbündeltypen in Wurzeln: (A) diarch; (B) triarch; (C) tetrarch; (D) polyarch (verändert nach DÖRKEN, 2010)

### Seitenwurzeln

Pflanzen verzweigen sich mit der Zunahme der oberirdischen Biomasse. Die Seitenwurzeln entstehen bei Angiospermen und Gymnospermen endogen, also von innen. Die Bildung der Seitenwurzeln findet nicht am Vegetationspunkt, sondern an älteren Wurzelabschnitten, oberhalb der Wurzelhaarzone statt. Bei den Gymnospermen und Angiospermen erfolgt die Bildung der Seitenwurzeln aus dem

Perikambium. Da diese Wurzeln endogen gebildet werden, müssen diese die Rinde durchbrechen (LÜTTGE & KLUGE, 2012). Eine grafische Darstellung ist in folgender Abbildung ersichtlich:

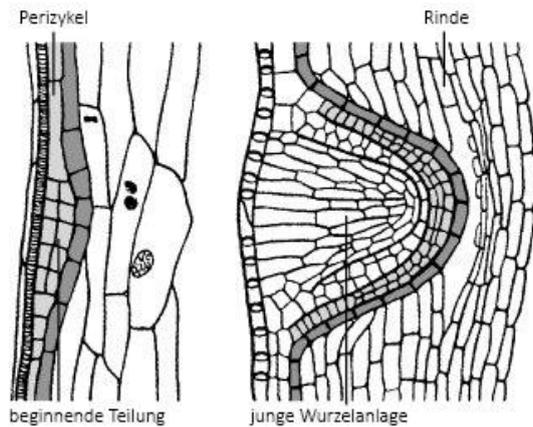


Abbildung 9: Seitenwurzelbildung ((MERBACH et al., 2001)

### Sekundärer Bau

Etwa zeitgleich zum sekundären Dickenwachstum des Sprosses beginnt auch das sekundäre Dickenwachstum der Wurzel. Das im Zentralzylinder vorhandene parenchymatische Gewebe, Kambium, das Xylem und Phloem teilt sich. Das Kambium bildet nach beiden Seiten Tochterzellen. Dadurch entsteht ein durchgängiger Kambiumzylinder, der den Bau des radialen Leitsystems entspricht und im Querschnitt betrachtet eine sternförmige Form aufweist, was folgende Abbildung veranschaulicht (NULTSCH, 2001):

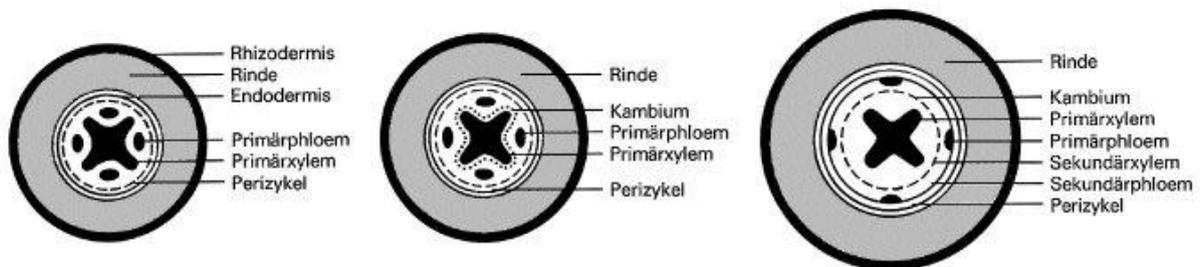


Abbildung 10: Sekundäres Dickenwachstum einer Wurzel mit tetrarch angeordneten Leitbündel (BRECHNER et al., 2001)

### Wechselbeziehung zwischen Wachstumsverlauf von Wurzel und Spross

Im Wesentlichen hängt das Wachstumsvermögen von der Zufuhr der in den Sprosstteilen gebildeten Nährstoffe und Wuchsstoffe ab. Bei der generativen Vermehrung ist das Wurzelwachstum durch die in den Samen eingelagerten Nährstoffe besonders gefördert. Bei der vegetativen Vermehrung die

Nährstoffe von den Blättern und Stängel aufgebracht werden müssen. Im Laufe des generativen Wachstums ist die Wurzelbildung aktiver, während jene vom Spross sich erst im Laufe der späteren Entwicklung zeigt. Die größte Wurzelmenge wird in der Regel zu Beginn der Blüte erreicht. Im Anschluss daran nimmt die Wurzelmenge ab, da Nährstoffe, anstatt für die Wurzelbildung, zur Bildung der Blütenanlagen verwendet werden. Bei Verringerung der Wurzelmasse sterben einzelne Wurzeln ab (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 1960).

### **Funktion der Wurzel**

Wurzeln erfüllen wichtige Aufgaben für Pflanzen bzw. deren Standort und sind mit unterschiedlichen anatomischen, physiologischen und morphologischen Eigenschaften ausgestattet. Folgend werden die Funktionen der Wurzel nach KUTSCHERA & LICHTENEGGER (2002) detaillierter aufgelistet:

- *„Verankerung der Pflanzen im Boden,*
- *die Ausscheidung von Stoffen zur Erschließung von Nährstoffen im Boden,*
- *die Aufnahme, Speicherung und Weiterleitung von Wasser und den darin gelösten Nährstoffen,*
- *die Rückführung von Assimilaten in den Spross,*
- *der Austausch von Luft mit den Spross,*
- *die gelegentliche Assimilation,*
- *die Symbiose mit Pilzen zur besseren Bereitstellung von Stoffen aus dem Abfall der Pflanzen,*
- *die Symbiose mit Bakterien zur Bindung von Luftstickstoff,*
- *die Bildung von Wurzelknospen zur Erhaltung und Vermehrung der Pflanzen und die Erschließung des Bodens durch das Richtungswachstum der Wurzelspitzen“ (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2002. S.11).*

Aus Sicht der Ingenieurbiologie spielen zudem mechanische Wirkungen der Wurzeln durch Verankerung bzw. Verdübelung eine zentrale Rolle.

### ***Bewegungsmechanismen der Wurzeln***

Bodengebundene Pflanzen führen mit ihren Organen bestimmte Bewegungen aus, um somit ihren Lebensraum optimal zu nutzen. Bei den Pflanzenbewegungen wird zwischen Taxien, Nastien, Tropismen und autonomen Bewegungen differenziert. Die Bewegungen werden durch Reize, beispielsweise durch Lichtreize angeregt.

Der Reiz bestimmt bei Tropismen den Ablauf und die Orientierung der Reaktion des gereizten Organs. Da Wurzeln Luft, Wasser und Nährstoffe im Boden „suchen“ werden diese durch gewissen Tropismen gelenkt. Tropismen sind Bewegungen, die durch ungleiche Streckungen in verschiedenen Bereichen des Organs bewirkt werden. Dies geschieht durch differenzielles Wachstum oder differentielle elastische Dehnung. Die Bewegungsmechanismen werden durch Umweltfaktoren herbeigeführt und

ausgerichtet SCHOPFER & BRENNICKE (2010) unterscheiden bei den Wurzeln folgende Tropismus-Typen:

- **Phototropismus:** Reaktion auf Licht - Abwendung des Lichtreizes, daher erfolgt ein negativer Tropismus.
- **Gravitropismus:** Reaktion auf Gravitation – die Erdanziehungskraft, der sich die Wurzeln orientieren.
- **Chemotropismus:** Die Wurzeln reagieren auf chemische Reize.
- **Hydrotropismus:** Die Wachstumsreaktion der Wurzeln orientiert sich an der Feuchtigkeit.
- **Thermotropismus:** Reaktion auf Wärme.
- **Thigmotropismus:** Die Reaktion des Wachstums wird durch Berührung, wie beispielsweise dem mechanischen Widerstand des Bodensubstrates, gelenkt.

Der Gravitropismus bei Keimwurzeln erfolgt, wenn alle Zellen der Wurzel dem Schwerereiz ausgesetzt sind, dadurch ist eine differenzielle Wachstumsreaktion der Organflanken zu bewältigen. Die sensorischen Prozesse finden in den zentralen Columellazellen der Kalyptra statt, die Amyloplasten beinhalten. Diese werden aufgrund ihrer Funktion als Schwerkraftsensoren, Statolithen bezeichnet. Die Statolithen werden bei Horizontalstellung von ihrer symmetrischen Position in eine asymmetrische Position gebracht (SCHOPFER & BRENNICKE, 2010).

Wird nun die Wurzel in eine horizontale Position gebracht, findet die Wachstumsreaktion nicht nur im Bereich der Streckungszone, sondern bereits davor, in der Nähe vom Apex (Scheitel- oder Spitzenbereich), statt. In dieser Zone findet an der Wurzeloberseite eine starke Zellstreckung statt, wiederum an der Wurzelunterseite eine Zellhemmung. Wodurch vorübergehend ein Wachstumsgradient hervorgerufen wird. Es kommt zu einer Umorientierung des Auxinstroms. Das Auxin fließt nach unten und bewirkt eine Hemmung der Zellstreckung auf der Wurzelunterseite. Durch das ungleiche Wachstum entsteht folglich eine Krümmung nach unten. Wenn die Spitze ausreichend nach unten zeigt, erlischt das gravitrope Wachstumssignal und die Wurzel wächst folglich wieder gerade (SCHOPFER & BRENNICKE, 2010).

Abbildung 11 veranschaulicht (a) die vertikale Orientierung der Wurzelzellen und (b) die horizontale Orientierung dieser Zellen. In beiden Fällen herrscht ein Ungleichgewicht, der Zellenformation, welches durch unterschiedliche Signalintensität hervorgerufen wird.

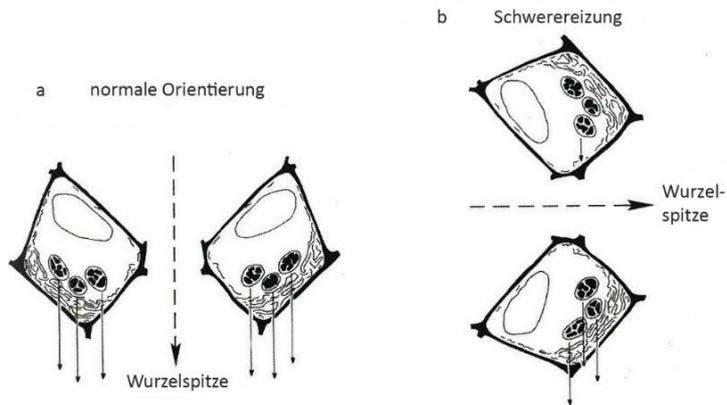


Abbildung 11: Schema einer Wurzelzelreaktion der Statocyten durch Gravitropismus (SCHOPFER & BRENNICKE, 2010)

### Wurzelformen und -typen

Je nach Wachstum der einzelnen Wurzeln und Wurzelabschnitte kann man verschiedene Wurzelsysteme unterscheiden (Bewurzelungsformen). Sie entstehen in Anpasstheit an Boden- und Standortbedingungen. Dikotyledonen und Monokotyledonen haben maßgebende Unterschiede in Herkunft und Ausformung des Wurzelsystems. Das liegt an den genetischen Vorgaben der Pflanzen. Zu Beginn bildet eine jede Samenpflanze bei der Keimung eine Keimwurzel aus dem Wurzelpol des dipolaren Embryos. Die Primärwurzel bei den monokotylen Pflanzen wird früh durch sprossbürtige Wurzeln ersetzt, wohingegen diese bei den Dikotylen geotrop weiter wächst (POLOMSKI & KUHN, 1998).

Die meisten zweikeimblättrigen Pflanzen bringen eine positiv gravitrope in die Tiefe wachsende Hauptwurzel, die fortlaufend neue Nebenwurzeln bildet (= allorhizes Wurzelsystem). Entlang der Hauptwurzel entspringen weitere Wurzeln und somit Verzweigungen, die dementsprechend zweit- bzw. drittrangig zur Hauptwurzel sind. Die meisten einkeimblättrigen Pflanzen (Gräser) bilden nur eine kurzlebige Primärwurzel aus, die unmittelbar aus der Keimwurzel entsteht. Aus der Primärwurzel gehen die Seitenwurzeln hervor und bilden ein komplexes Wurzelgeflecht. Die kurzlebige Primärwurzel und die Seitenwurzeln sind gleichrangig, was auch als homorhize Bewurzelung bezeichnet wird (LÜTTGE & KLUGE, 2012). Abbildung 12 verdeutlicht den Unterschied zwischen dem allorhizen Wurzelsystem von zweikeimblättrigen und dem homorhizen Wurzelsystem von einkeimblättrigen Pflanzen.

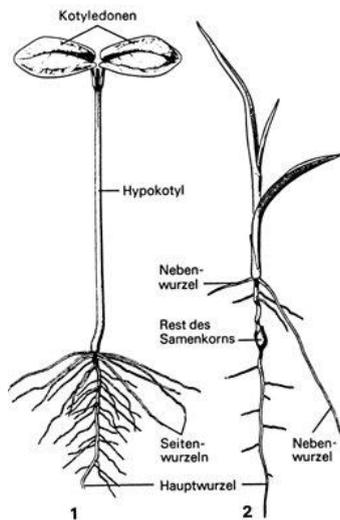


Abbildung 12: Wurzelbild von (1) dikotylen und (2) monokotylen Pflanzen (BRECHNER et al., 2001)

Die typischen Wurzelformen differenzieren sich hauptsächlich in der Tiefendurchwurzelung, der Dichte der Feinwurzeln und im Wurzel-Spross-Verhältnis (BALDER, 1998). Die Wasserverfügbarkeit und die Bodenbeschaffenheit beeinflussen laut BALDER (1998) die Wurzelform am stärksten.

Da die Umwelteinflüsse der Pflanzenstandorte und die genetische Anlage der Pflanzen meist sehr variieren, ist es schwierig Grundtypen der Wurzeln zu bestimmen. Im Allgemeinen können Wurzeltypen definiert werden, die innerhalb von Großklimaräumen mit denselben Bodentypen kennzeichnend sind. Deshalb werden zur Bestimmung dieser, bestimmte Standorte mit denselben Bodentypen in den gleichen Großklimaräumen herangezogen.

Die nachstehende Abbildung stellt die charakteristischsten Formen der von KUTSCHERA & LICHTENEGGER (1997) erforschten Wurzeltypen krautiger Pflanzen dar: strangförmig (2, 3), strang-kegelförmig (4), zylinderförmig (5, 6), zylinder-kegelförmig (7), verkehrt kegelförmig (8, 9), pilzförmig (10, 11), hantelförmig (12), eiförmig (13), schirmförmig (14), schalenförmig (15) und scheibenförmig (16).

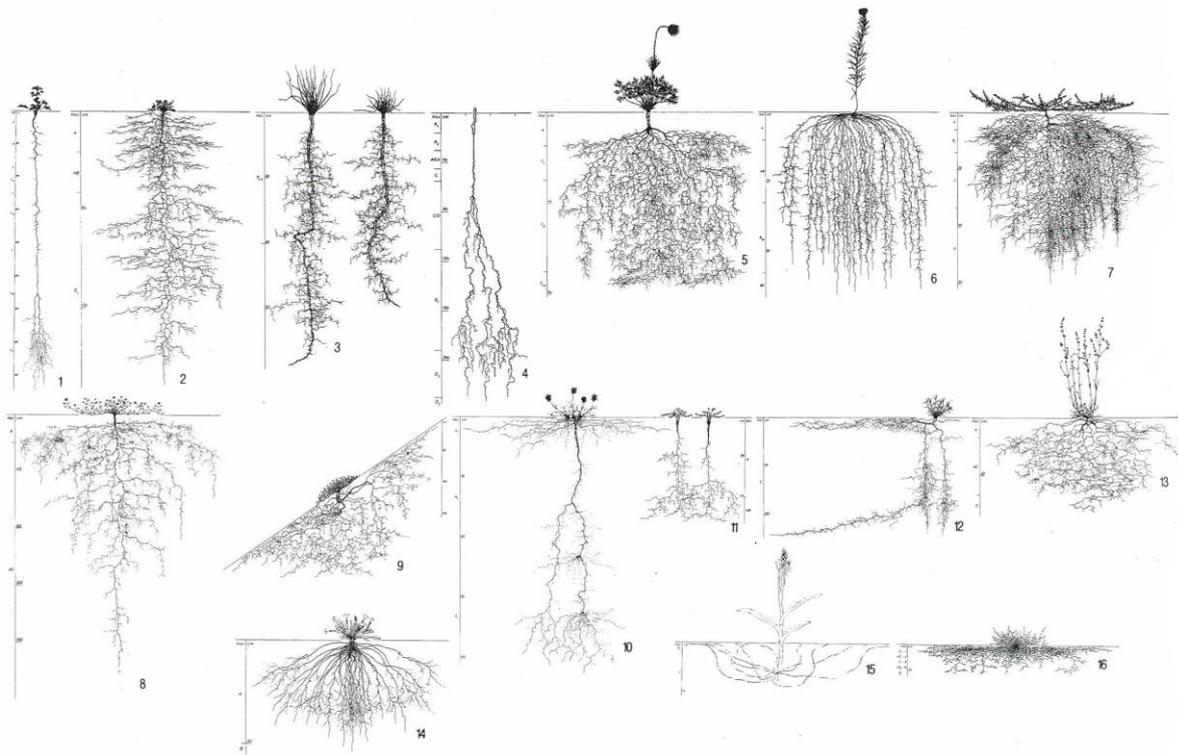


Abbildung 13: Wurzeltypen nach KUTSCHERA & LICHTENEGGER (1997)

### Wurzelentwicklung und Wachstumsfaktoren

Grundsätzlich strebt jede Pflanze an, das von der genetischen Anlage vorgegebene Wurzelbild zu produzieren. Im Laufe der Evolution haben sich Pflanzen an die unterschiedlichen Umwelteinflüsse angepasst. Auch haben sie eine Vielzahl unterschiedlicher Bewegungsmechanismen gebildet, um bei Bedarf reagieren zu können (SCHOPFER & BRENNICKE, 2010).

Als die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Wurzelform von Pflanzen gelten Bodentemperatur, Bodenfeuchte, Bodenluft, Nährstoffverhältnisse, Schadstoffeinträge, sowie Poren- und Skelettanteile (BALDER, 1998). Entscheidend für die Pflanzen mit unterschiedlichen Standortbedingungen ist, dass die Wachstumsfaktoren für sie zugänglich sind und ihren Bedürfnissen entsprechen. Diese Bedürfnisse sind je nach Pflanzenart variabel (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 1960).

Auch klimatische Rahmenbedingungen beeinflussen die Wurzelformen. So sind beispielsweise flache oder tellerförmige Wurzelsysteme in hohen Lagen, in nördlichen Breiten oder in Mooren vorherrschend. In höheren Lagen, bei anstehendem Grundwasser, fehlendem Platz und bei Wasserüberschuss, wurzeln auch tiefwurzeln Arten weniger tief. In Lagen, die eher trocken und warm sind, streben die Wurzeln mehr nach unten, sodass hier häufig zylinderförmige Wurzelkörper zu finden sind (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2002).

Auch die Textur und Struktur des Bodens ist maßgebend für das Wurzelwachstum. Einerseits durch die bessere oder schlechtere Verfügbarkeit von Wasser und Nährstoffen, andererseits durch die Hemmung des Wurzelverlaufs, wenn eine zu hohe Verdichtung oder ein zu hoher Grundwasserstand das Tiefenstreben der Wurzel verhindert (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2002). Tabelle 3 stellt die Punkte der Pflanzenansprüche und die der Standorteigenschaften gegenüber:

**Tabelle 3: Pflanzenansprüche und Standorteigenschaften (STAHR et al., 2008)**

Pflanzenanspruch	Standorteigenschaften
Wurzelraum	Gründigkeit; Durchwurzelbarkeit
Wärme	Wärmehaushalt
Luft	Lufthaushalt
Wasser	Wasserhaushalt
Nährstoffe	Nährstoffhaushalt
Stabilität	Standortdynamik

### ***Wachstumsfaktor Wärme***

Zu einem der wichtigsten Wachstumsfaktoren zählt Wärme. Diese ist bereits bei der Keimung, des ersten Wachstumsvorganges von Wurzel und Spross ein ausschlaggebendes Kriterium. Je nach Pflanzenart ist ein unterschiedliches Temperaturniveau zur Keimung notwendig. Die Wärme dringt umso tiefer in den Boden, je stärker sich der Boden erwärmt. Dadurch werden größere Temperaturschwankungen und Feuchteschwankungen im Boden in wärmeren Regionen erreicht als in kühleren. Durch diese Schwankungen wird das Wurzelwachstum der Pflanzen vermehrt angeregt.

Mit der Erhöhung des Tiefenwachstums variiert auch die Verteilung der Wurzelmasse im Boden. Daher verteilt sich die Wurzelmasse in wärmeren Lagen in die Tiefe und in kälteren zur Seite. Das hat zur Folge, dass in wärmeren Lagen Böden tiefgründiger und humushaltiger sind als in kühleren. Ein schnellerer Ausgleich der Wärmeschwankungen kann auch durch eine höhere Bodenfeuchte bewirkt werden. Die Wurzeln reichen daher bei zunehmender Feuchtigkeit weniger tief in den Boden (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2002).

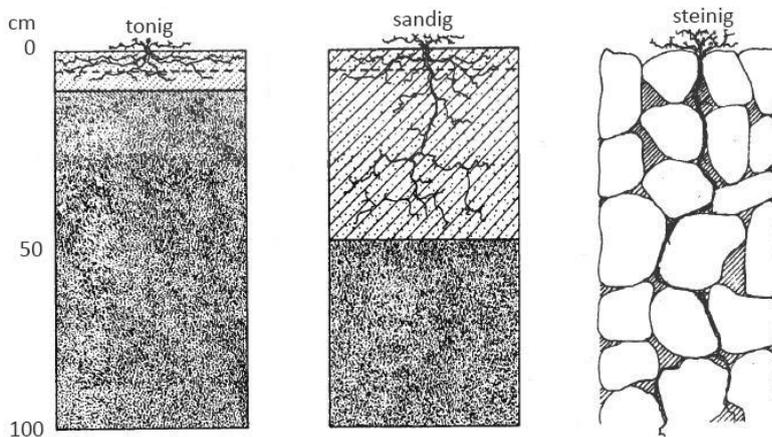
Die Seehöhe nimmt ebenfalls Einfluss auf die Temperatur des Bodens. Mit zunehmender Seehöhe und erhöhter Einstrahlung nimmt die Temperatur ab. Dadurch ergeben sich unterschiedliche Artenzusammensetzung in den jeweiligen Höhenstufen, was bei Bergen mit über 1.000 Metern gut ersichtlich ist. Die untere Temperaturgrenze für das Wurzelwachstum liegt gemäß TURNER & STREULE (1983) bei 2-5 °C.

**Wachstumsfaktor Wasser**

Ein Pflanzenkörper besteht im Durchschnitt aus etwa 70 bis 80 % Wasser (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 1997). Wasser dient der Entwicklung und Erhaltung des Zelldruckes, dem Wärmeausgleich und dem Stoffwechsel der Pflanze. Der größte Anteil der Wasseraufnahme erfolgt durch die Wurzeln. Die Verfügbarkeit von Wasser ist jedoch abhängig vom Standort, der Exposition der Art und Textur des Bodens und dem Einfluss der Temperatur. Die Wasseraufnahme der Wurzeln erfolgt solange, wie die Saugkraft der Wurzel größer ist als die des Bodens. Ist ein Ungleichgewicht vorhanden schützt sich die Wurzel, indem sie die nicht aktiv Wasser aufnehmenden Wurzelabschnitte verkorken lässt. SCHWARZ (1964) fand bei Versuchen von Tomaten und Kartoffeln heraus, dass Wurzelsysteme in trockenen Böden wesentlich mehr Seitenwurzelsätze aufwiesen als in feuchten Böden. Ebenfalls stellte WEAVER (1926) bei Versuchen in der Kurzgrasprairie fest, dass bei einem mittleren Jahresniederschlag von 432 mm die Pflanzen eine höhere Feinwurzelvezweigung aufwiesen als bei einem höheren Niederschlag von 737 mm. Durch diese Erkenntnisse wird deutlich, dass die Wasserverfügbarkeit einen Einfluss auf die Ausprägung des Feinwurzelsystems hat. Die Anpassung von Pflanzen an die unterschiedlichsten Standorte wird durch unterschiedliche Strategien ersichtlich. Eine ökologisch wichtige Anpassung ist neben der stärkeren Verzweigung, der Tiefenstrebung oder der Steigerung der Saugkräfte von Wurzeln auch die relative Vergrößerung der Wurzelmasse. Das heißt, dass sich das Wurzel-Spross-Verhältnis zugunsten des Wurzelanteils ändert (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 1997).

Die Verteilung der Wurzelmasse übt eine stark regulierende Wirkung auf den Wasserhaushalt aus. Das Wurzelsystem breitet sich bei reichlicher Oberbodenfeuchte, geringer Verdunstung oder bei hoch anstehendem Grundwasser vermehrt in den am stärksten erwärmten oberen Bodenschichten aus. Nimmt die Bodenfeuchte ab und die Erwärmung des Bodens ist tieferreichender, reicht die Bewurzelung weiter in die Tiefe, die Hauptwurzelmasse bleibt jedoch in den oberen Bodenschichten. Die Feuchtigkeit beeinflusst auch das Verhältnis von Wurzel und Spross. Je trockener der Boden ist, umso mehr nimmt die Wurzelmasse im Vergleich zur Sprossmasse zu (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 1960).

Die Bodenart und die damit verbundene Wasserspeicherkapazität sind ebenfalls entscheidend für das Wurzelwachstum. Wie sich das Wurzelwachstum bei unterschiedlichen Böden verhält, zeigt Abbildung 14, dabei wird die Zone der Wasserspeicherkapazität in hellgrauer Schraffur dargestellt. Die Wurzeln bleiben bei tonigem Boden in den obersten Zentimetern und wurzeln eher seitwärts, wohingegen sie bei sandigem Boden tiefer wurzeln, um an Wasser und Nährstoffe zu gelangen. Bei steinigem Verhältnissen müssen Pflanzen oft besonders tief wurzeln, damit sie für sie verfügbares Wasser und Nährstoffe finden und aufnehmen können. In Böden mit hohem Grobporenanteil wird pflanzenverfügbares Wasser nur in geringen Teilen gespeichert.



**Abbildung 14:** Schematische Darstellung der Wasserspeicherung (hellgrau schraffiert) von unterschiedlichen Böden nach einem Regenfall von 50 mm in ariden Gebieten (verändert nach KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2002)

### ***Wachstumsfaktor Licht***

Das Licht nimmt direkten und indirekten Einfluss auf das Wurzelwachstum. Der direkte Einfluss ist eher selten zu beobachten, da vermehrt der Spross und nicht die Wurzel auf einen Lichtentzug reagieren. Indirekt wird das Wurzelwachstum durch Photosynthese beeinflusst. Nach Untersuchungen von COMBES (1910) entwickeln Pflanzen bei erhöhter Lichtzufuhr mehr Wurzelmasse als bei reduzierter Lichtzufuhr. Durch den erhöhten Lichteinfluss kommt es zu einem Assimilateüberschuss, welcher das Wurzelwachstum antreibt. Durch die Beschattung findet neben einer geringeren Bildung von Assimilaten auch eine geringere Bodenerwärmung statt, welche das Wurzelwachstum schwächt. Somit nimmt die Bewurzelungstiefe mit zunehmender Beschattung ab.

Aus den Zusammenhängen von Licht und Temperatur wird deutlich, warum im Herbst, bei Abnahme von Lichtintensität und Wärme, das Spross- und Wurzelwachstum, sowie die Nährstoffaufnahme durch die Wurzeln reduziert werden (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 1960).

### ***Wachstumsfaktor Luft***

Die Wurzel benötigt für das Wachstum eine ausreichende Versorgung mit Luft. Gerade die Wurzelspitzen benötigen viel Sauerstoff für eine aktive Ionenaufnahme und zur Ausbildung eines ausreichend großen Wurzeldrucks. Bei unzureichender Luftversorgung kann die Wurzel schnell zum Faulen beginnen. Auch eine zu hohe Anreicherung von CO<sub>2</sub> und anderen, für das Wurzelwachstum schädliche Stoffe, können das Faulen der Wurzel begünstigen. Pflanzen haben unterschiedliche Anpassungsstrategien entwickelt, um eine ausreichende Versorgung der Pflanzenwurzeln an Sauerstoff zu gewährleisten. Viele Pflanzenarten versuchen das Vordringen in sauerstoffarme Bodenschichten zu vermeiden oder weichen zunächst seitlich aus bzw. wachsen sogar zurück in Richtung Bodenoberfläche. Eine typische Tellerwurzelbildung ist die Folge. Andere Arten hingegen wirken durch stärkere Verzweigung der Wurzeln in sauerstoffreichere Bodenschichten entgegen oder

bilden vermehrt sprossbürtige Wurzeln. Schlechte Durchlüftung des Bodens in tiefer liegenden Bodenschichten, kann das Tiefenwachstum der Wurzel auch völlig verhindern (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 1960).

### **Wachstumsfaktor Nährstoffe**

Wie Wasser werden Nährstoffe der Pflanze hauptsächlich über die Wurzeln aufgenommen. Analog zur Wasseraufnahme lässt sich hierbei in eine aktive und passive Aufnahme der Wurzeln differenzieren. Im Bereich der Wurzelspitze und der Wurzelhaare findet die aktive Aufnahme statt. Durch die Bildung von Schleim in diesem Bereich, ist die Pflanzenwurzel mit dem Bodenteilchen am engsten miteinander verbunden, was die Aufnahme der Mineralstoffe durch die Verwitterung ermöglicht. Die passive Aufnahme der Mineralstoffe erfolgt mit Hilfe des Transpirationsstromes. Dabei werden die gelösten Salze im Wasser durch den eindringenden Wasserstrom in die Wurzel mitgerissen (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 1960).

## **2.2 Boden**

In der ÖNORM L 1050 (2004, S. 5) wird der Boden beschrieben als *„der oberste Bereich der Erdkruste, der durch Verwitterung, Um- und Neubildung (natürlich oder anthropogen verändert) entstanden ist und weiter verändert wird; er besteht aus festen anorganischen (Mineralanteil) und organischen Teilen (Humus und Lebewesen) sowie mit Wasser, den darin gelösten Stoffen und mit Luft gefüllten Hohlräumen und steht in Wechselwirkung mit Lebewesen.“*

STAHR et. al. (2012) beschreibt die Gesamtheit aller Böden als Pedosphäre. Die Pedosphäre ist die Überschneidung aller Natursphären, da Böden im Laufe der Zeit unterschiedliche Eigenschaften annehmen können. So können Böden nass oder trocken, hell oder dunkel, grob oder fein, klebrig oder spröde sein. Ein Boden ist das Produkt von abiotischen bodenbildenden Faktoren wie Gestein, Klima und Relief, aber auch von biotischen Faktoren wie Flora, Fauna und dem Menschen.

Der gewachsene Boden ist eine an der Erdoberfläche vorhandene Schicht, die sich aus vier Bodenbestandteilen zusammensetzt. Die Mächtigkeit oder Tiefgründigkeit ist je nach geographischer Lage unterschiedlich (BLUM, 2007). Böden bestehen aus drei Phasen und stehen in engem Zusammenhang mit Niederschlags- und Grundwasser. Die drei Phasen des Bodens sind:

- Bodenwasser: flüssige Phase
- Bodenmatrix: feste Phase
- Bodenluft: gasförmige Phase

Böden stellen komplexe Systeme der Erdoberfläche, Pedosphäre, dar, die wiederum mit den anderen Sphären, Lithosphäre, Hydrosphäre, Atmosphäre und Biosphäre in Verbindung steht. Der Boden dient

auch als Pflanzenstandort für höhere Pflanzen und im weiteren Sinn als Nahrungsgrundlage. Komplexe chemische und physikalische Bodeneigenschaften und die Dynamik eines Bodens bilden die Grundlage für die Eignungsbewertung eines Bodens (HARTGE & HORN, 2014).

### 2.2.1 **Bodenfunktion**

Laut BLUM (2007) weisen Böden drei ökologische, drei technisch-industrielle, eine kulturelle und eine sozioökonomische Funktionen auf, die folglich kurz zusammengefasst sind.

- **ökologische Funktionen:**
  - Produktion von Biomasse aus der Land- und Forstwirtschaft;
  - Filter-, Puffer- und Transformationsfunktion zwischen der Atmosphäre und dem Grundwasser bzw. dem Boden und der Biosphäre;
  - Boden als Genreserve und Genschutz, weil in Böden eine größere Anzahl und Vielfalt an Organismen lebt als auf der Erdoberfläche;
- **technisch-industrielle Funktionen:**
  - Physische Basis für Siedlungen, Industrie, Verkehrseinrichtungen, Freizeit-, Sport- und Erholungseinrichtungen sowie Abfalldeponien;
  - Rohstoffgewinnung wie Sande, Kiese, Schotter u.v.m.;
- **Sozio-ökonomische und kulturelle Funktionen:**
  - Kulturfunktion, da Böden archäologische und paläontologische Zeugen der Landschafts- und Kulturgeschichte sind;

### 2.2.2 **Bodenbestandteile**

Böden setzen sich aus vier wesentlichen Komponenten zusammen und werden durch die verhältnismäßige Zusammensetzung der Bodenbestandteile eingeteilt (BLUM, 2007):

- Mineralische Bestandteile
- Organische Bestandteile
- Bodenwasser
- Bodenluft

#### **Mineralische Bestandteile**

Die anorganische Komponente der Böden bildet sich aus Mineralien und Gesteinen. Diese sind ein Teil der festen Substanz des Bodenkörpers und liefern den Pflanzen die notwendigen Nährstoffe. Ausgangsmaterial sind Fest- und Lockergesteine, die mit unterschiedlichen Mineralien und Zusammensetzungen in der Umwelt vorzufinden sind. Die Gesteine werden zwischen Magmatite,

Sedimente und Metamorphite unterteilt. Diese drei Gruppen entstanden im Laufe der Bodenbildung (Pedogenese) unter differenten Bedingungen (BLUM, 2007).

### **Organische Bestandteile**

Der Humuskörper wird von der organischen Substanz im Boden gebildet und macht gemeinsam mit den mineralischen Bestandteilen die feste Bodensubstanz aus. Diese Komponente des Bodens hat einen bedeutenden Einfluss auf die Bodenfunktion und spielt eine zentrale Rolle im Kohlenstoffkreislauf. Die organischen Bestandteile sind essentiell für die Bildung des Bodengefüges, aber auch wichtige Lieferanten der Pflanzennährstoffe und beeinflussen entscheidend den Wasser-, Luft-, und Wärme-Haushalt des Bodens, was in weiterer Folge für die Bodenfruchtbarkeit ausschlaggebend ist. Die Gesamtmasse an organischer Substanz im Boden beinhaltet in den meisten Oberböden im Gegensatz zu den anderen Bodenbestandteilen nur geringe Anteile. Die organische Substanz setzt sich sowohl aus lebenden Organismen der Bodenflora und -fauna als auch aus lebenden und abgestorbenen Pflanzenwurzeln zusammen (BLUM, 2007).

### **Bodenwasser**

Das im Boden enthaltene Wasser wird als Bodenwasser bezeichnet, welches über atmosphärische Niederschläge, wie Regen, Schnee und Tau dem Boden oder aus dem Grundwasser durch kapillarem Aufstieg zugeführt wird. In der Natur vorkommende Böden enthalten ständig eine gewisse Menge an Wasser, was für die Bodenlebewesen, Pflanzen und bodenbildende Prozesse essenziell ist. Das Bodenwasser ist in den Bodenporen vorzufinden und untergliedert Sickerwasser und Haftwasser.

Das Sickerwasser bildet das Grund- oder Stauwasser und kann durch kapillaren Aufstieg das Haftwasser wieder ergänzt werden. Das Haftwasser hingegen wird von festen Bodenpartikel, in Kapillaren oder in Poren festgehalten, es haftet entgegen der Schwerkraft im Bodenkörper und ist für Pflanzen verfügbar, wenn sich dieses in Mittelporen befindet. Das Haftwasser setzt sich wiederum aus Absorptionswasser und Kapillarwasser zusammen (BLUM, 2007).

### **Bodenluft**

Die gasförmige Komponente wirkt als ökologischer Standortfaktor, zur Atmung und als Gasaustausch und als pedogenetischer Faktor, bei der Bodenentwicklung. Bodenluft ist Gegenspieler des Bodenwassers, was sich je nach Wasserkapazität verlagert. Die Bodenluft ist wichtig, damit die Pflanzenwurzeln nicht faulen (BLUM, 2007).

#### **2.2.3 Bodengefüge und Bodenstruktur**

Das Bodengefüge oder auch Bodenstruktur genannt, beschreibt die räumliche Anordnung der festen mineralischen und organischen Bodenbestandteile und deren Hohlräume bzw. Poren, die Luft und

Wasser enthalten. Dies macht das gesamte Bodenvolumen, das sich aus Volumen der festen Bodensubstanz und dem Porenvolumen zusammensetzt, aus. Bodengefüge kann in Mikro- und Makrogefüge unterteilt werden (siehe ÖNORM L 1050:2004). Die Bodenbildung findet durch physikalische, chemische und biologische Prozesse statt, die jahrelang dauern und ständig im Wandel sind. Beispiele dazu sind u.a. Quellung und Schrumpfung bzw. energetische Wechselwirkung zwischen Bodenkolloiden. Die räumliche Anordnung der Bodenbestandteile schließen sich je nach Art in Aggregate zusammen, die unterschiedliche Größen aufweisen. Nach deren Aufteilung bilden sich größere und kleinere Hohlräume, die wichtig für das pflanzliche, tierische und mikrobielle Leben sind. Nach der Art der Aufteilung des Bodenvolumens wirkt sich der Wasser-, Luft-, Wärme- und Nährstoffhaushalt, die Durchwurzelbarkeit und Bearbeitbarkeit, der Verlagerungsprozesse bei der Bodenentwicklung sowie die Filter-, Puffer- und Transformationsfunktion aus (BLUM, 2007, SCHEFFER & SCHACHTSCHNABEL, 2010).

Wichtig für das Bodengefüge sind sowohl die physikalische Neuordnung von Bodenteilchen, als auch die Stabilisierung dieser Neuordnungen. Für die Stabilität sind vor allem die organischen Bodenbestandteile zuständig, die mineralische Teilchen miteinander verknüpfen und Tonminerale und Sesquioxide bilden. Auch die chemischen Eigenschaften sind für das Bodengefüge von großer Bedeutung, da die Bindung zwischen den Tonpartikeln von den Ionen abhängt, die an der Oberfläche sortiert werden oder sich in der Bodenlösung befinden (REWELL, 1997).

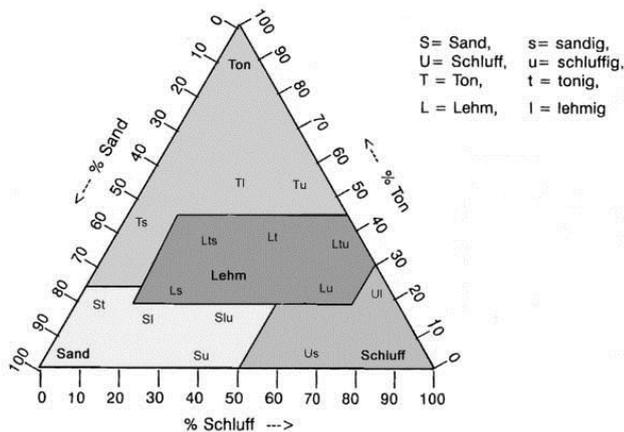
### **Korngrößenverteilung und Bodenart**

Die Einzelteilchen des Bodens und deren festen Teile sind unterschiedlich ausgebildet und unterscheiden sich durch ihre Größe, Form und Zusammensetzung. Die einzelnen Körner liegen durch Verklüftung, Verklebung oder durch Wassermiskenkräfte als Aggregate vor. Erst durch Vorbehandlung oder Auflösung dieser Zusammensetzungen, können die einzelnen Partikel bestimmt werden (HARTGE & HORN, 2014).

Die Korngröße und Kornverteilung sind ein Maßstab für die Einteilung und Benennung der mineralischen Lockergesteine. Dabei wird die Gesamttrockenmasse in Prozent angegeben. Korngrößen über 0,063 mm (Sand, Kies) werden durch Siebung, Korngrößen unter 0,125 mm (Schluff, Ton) durch Sedimentation, festgestellt (PRINZ & STRAUSS, 2011).

Die Bodenart wird gemäß ÖNORM L 1050 (2004, S. 5) wie folgt beschrieben: Die Bodenart beschreibt die *„Verteilung der Bodenteilchen auf die einzelnen Korngrößenklassen des Feinbodens, wie sie nach einer Dispergierung der Aggregate vorliegen. Die Bezeichnung der Bodenart ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen Sand, Schluff und Ton.“*

Abbildung 15 zeigt die Einteilung der Kornfraktion anteilmäßig in Prozent und teilt diese in Bodenarten ein:



**Abbildung 15:** Einteilung der Bodenarten (verändert nach AD-HOC-AG BODEN, 2005)

Die Korngrößen, in Bodenkörpern, variieren von großen Blöcken bis hin zu feinsten Partikeln. Nachdem nicht alle Körner eine einheitliche Form aufweisen wird ein Äquivalentdurchmesser angegeben. Dabei wird der Außenkreis und Innenkreis eines Partikels genommen und der Mittelwert gezählt, Ausgangsform ist immer ein Kreis. Tabelle 4 zeigt die Einteilung und Bezeichnung der Kornfraktionen (HARTGE & HORN, 2014).

ALBRECHT DANIEL THAER führte den Begriff „Bodenart“ um 1800 ein. Die Körnung und Bodenart stehen in engem Zusammenhang zu Wasser-, Luft und Nährstoff-Haushalt sowie zur Durchwurzelbarkeit und Bearbeitbarkeit. Sie bestimmen gemeinsam mit anderen Faktoren die Bodenfruchtbarkeit (BLUM, 2007).

Mithilfe der Korngrößenzusammensetzung der mineralischen Teilchen kann die Bodenart bestimmt werden. Die Korn-Fraktionen des Feinbodens werden in die Bodenhauptgruppen Ton (t), Schluff (u), Lehm (l) und Sand (s) angegeben (siehe Tabelle 4).

**Tabelle 4: Einteilung der Kornfraktion in Anlehnung auf ihren Äquivalentdurchmesser (VELTY, 2017)**

Äquivalentdurchmesser in $\mu\text{m}$	Äquivalentdurchmesser in mm	Unterfraktion	Kurzzeichen
Ton			T
< 0,2	< 0,0002	Feinton	fT
0,2 - 0,6	0,0002 - 0,0006	Mittelton	mT
0,6 - 2,0	0,0006 - 0,002	Grobton	gT
Schluff			U
2 - 6,3	0,002 - 0,0063	Feinschluff	fU
6,3 - 20	0,0063 - 0,02	Mittelschluff	mU
20 - 63	0,02 - 0,063	Grobschluff	gU
Sand			S
63 - 200	0,063 - 0,2	Feinsand	fS
200 - 630	0,2 - 0,63	Mittelsand	mS
630 - 2000	0,63 - 2	Grobsand	gS
Kies (gerundet) / Grus (eckig, kantig)			
	2 - 6,3	Feinkies/~grus	
	6,3 - 20	Mittelkies/~grus	
	20 - 63	Grobkies/~grus	
Steine/Blöcke			
	63 - 200	Steine	
	200 - 630	Blöcke	
	> 630	Großblöcke	

Aus dem Feinboden werden die Fraktionen Sand, Schluff und Ton mit einem Äquivalentdurchmesser von < 2,0 mm gebildet. Der Grobboden, welcher auch als Bodenskelett bezeichnet wird, umfasst die Fraktionen Kies/Grus, Steine und Blöcke, also die Fraktionen mit einem Äquivalentdurchmesser von > 2,0 mm bis > 200,0 mm. Die Abstufung der Fraktionen erfolgt, nach einem Vorschlag von ATTERBERG (1912) logarithmisch in Intervallen von Zehnerpotenzen mit den Faktoren 2 und 6,3 da der sehr große Korngrößen-Bereich von < 0,0002 mm bis > 200 mm nur logarithmisch darstellbar ist (VELTY, 2017).

### ***Bodenmechanische Eigenschaften***

Bodentypen sind mit einem Kürzel versehen, das für eine bestimmte Kombination von Merkmalen, Eigenschaften und Zustände Aussage trifft.

Die Benennung der mineralischen Lockergesteine erfolgt nach Korngrößen und ist nicht vom Material oder der Kornform (kubisch, flach -plattig, länglich -stängelig) abhängig. Laut PRINZ & STRAUSS (2011) werden drei Hauptgruppen von Bodenarten unterschieden:

- Grobkörnige kohäsionslose Bodenarten
- Gemischtkörnige Böden
- Feinkörnige oder bindigen Bodenarten

Ebenfalls werden Böden als bindig oder nicht bindig klassifiziert, was die Zusammensetzung der Kornfraktionen bestimmt.

**Grobkörnige Böden**

Die Benennung von grobkörnigen Böden erfolgt nach Gewichtsanteilen. Grobkörnige Böden bestehen aus Kies und/oder Sand und können bis zu 5 % an Schluff und Ton enthalten. Für die Bezeichnung maßgebend ist der Kornanteil von > 40 %. Bodenarten wie Kies und Sand beinhalten beispielsweise mehr als 40 % Sand- oder Kiesanteile. Zwischen den einzelnen Körnungen treten gewöhnlich keine Kohäsionskräfte auf.

Die Überleitung von nicht bindigen zu bindigen Böden findet im Schluffbereich, vorwiegend zwischen den Korngrößen 0,02 bis 0,06 mm (Mittelschluff) statt. In diesem Bereich macht sich das Wasserbindevermögen bedeutend bemerkbar, wenngleich es sich bei den Schluff-Fractionen vorwiegend um Quarz und Feldspat (zerkleinerte Gesteinskörner) handelt (PRINZ & STRAUSS, 2011).

**Gemischtkörnige Böden**

Bei den gemischtkörnigen Böden handelt es sich um Böden mit Schluff- und Tonanteilen zwischen 5 und 40 %. Je nach Anteil der Kornfraktionen sind Mischböden vorwiegend rollig und bindig. Der Kornanteil aus Kies und Sand liegt bei 10 %. Für bautechnische Zwecke werden hauptsächlich diese Bodenarten verwendet (PRINZ & STRAUSS, 2011).

**Feinkörnige Böden**

Feinkörnige Böden enthalten über 40 % Schluff- und Ton-Fractionen. Sie werden bestimmt nach ihrer Plastizität und ihrer geringen Durchlässigkeit, den Schrumpf- und Quelleigenschaften, dem Konsolidierungsverhalten sowie ihrem Rückhaltevermögen. Sie bestehen immer aus einer Mischung beginnend bei Schluff- und Tonteilen bis hin zu größeren Kornfraktionen (PRINZ & STRAUSS, 2011).

**Bindige und nicht bindige Böden**

Laut RVS 08.03.04 (2008) sind Böden mit folgender Bezeichnung als bindige Böden anzusehen:

*„Schluffe (U), Tone (T), Sand-Schluff-Gemische (SU) und Kies-Schluff-Gemische (GU) mit 15 bis 40 M-% Feinkornanteil  $\leq 0,06$  mm und weniger als 40 % mit Korndurchmesser  $> 2$  mm, Sand-Ton-Gemische (ST) und Kies-Schluff-Gemische (SU) mit 5 bis 15 M-% Feinkornanteil  $\leq 0,06$  mm und weniger als 40 % mit Korndurchmesser  $> 2$  mm sowie Schluffe (OU) und Tone (OT) mit organischen Beimengungen bzw. anorgane Schluffe und Tone mit jeweils mehr als 40 % Feinkornanteil  $\leq 0,06$  mm.“ (RVS 08.03.04, 2008, SS. 3)*

Nicht bindige Bodenarten sind jene, die nicht den bindigen Böden zugeordnet werden können.

PRINZ & STRAUSS (2011) beschreiben noch zusätzlich, je höher der organische Anteil im Boden, umso mehr kann der Boden zusammengedrückt und die Scherfestigkeit dadurch minimiert werden. Böden mit einem organischen Anteil bis 3 % werden als nicht bindige Böden bezeichnet, ab 3 % als bindige.

### **Porenvolumen**

Der Anteil vom Porenvolumen im gesamten Bodenvolumen beträgt je nach Bodenart zwischen 30-65 % (BLUM, 2007). Feinporen enthalten Wasser, das für die Pflanzen als nicht mehr verfügbar gilt. Die Mittelporen dagegen enthalten Wasser, das von den Pflanzen aufgenommen werden kann und somit als pflanzenverfügbar gilt. Die Grobporen wiederum, haben eher eine drainende Wirkung und sind Hohlräume für Luft. Die Porengröße ist auch ein ausschlaggebender Punkt für die Lebewesen. Pflanzenwurzeln und die Wurzelhaare ( $\varnothing > 10 \mu\text{m}$ ) sind nur in Grobporen im Stande zu wurzeln, wohingegen Pilzmyzele ( $\varnothing$  ca. 3-6  $\mu\text{m}$ ) auch in Mittelporen leben können (SCHEFFER & SCHACHTSCHNABEL, 2010).

- **(weite) Grobporen:**  $> 50 \mu\text{m}$ , schnell drainend, nach Abzug von Sickerwasser mit Luft gefüllt;
- **(enge) Grobporen:** 10-50  $\mu\text{m}$ , Sickerwasser führend;
- **Mittelporen:** 10-0,2  $\mu\text{m}$ , verfügbares Haftwasser wird gehalten, wird bei Austrocknung mit Luft gefüllt;
- **Feinporen:**  $< 0,2 \mu\text{m}$ , halten nicht verfügbares Haftwasser, füllen sich nur bei „stärkerer“ Austrocknung mit Luft;

## **2.3 Boden als Pflanzenstandort**

Höhere Pflanzen sind an Böden und deren Raum gebunden, um dort ein Wurzelsystem zu bilden und für die Pflanzen zum Überleben an wichtige Grundbedürfnisse wie Wasser, Sauerstoff und Nährstoffen zu gelangen. Dafür ist eine gute Durchwurzelbarkeit und Gründigkeit der Böden wichtig. Zusätzlich müssen die Böden ausreichend pflanzenverfügbares Wasser speichern können und eine zureichende Durchlüftung, Bodenwärme und Nährstoffe, welche ebenfalls für die Pflanzen verfügbar sind, sollten gewährleisten sein. Die Mächtigkeit des durchwurzelten Bodenkörpers bestimmt die Eigenschaften des Bodens wesentlich. Da Böden und die darauf bzw. darin wachsenden Pflanzen eng miteinander verbunden sind und für uns Menschen als Nahrungsgrundlage dienen, muss die Ressource Boden vor Schädigungen und Zerstörungen geschützt werden, damit ihre Fruchtbarkeit gesichert und das Leben für Pflanzen, Tiere und Menschen weiterhin möglich bleibt (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2010).

### **Wurzel und Boden**

Die Pflanzen und der Boden sind unmittelbar miteinander verbunden und üben einen Einfluss aufeinander aus. Als primären Teil ist der spezifische Einfluss des Bodens und der Wurzeln auf die

chemisch-physikalischen Eigenschaften des Ausgangsmaterials der Bodenbildung beschränkt. Die klimatischen Bedingungen sind maßgebend für die Art und Weise wie diese Eigenschaften wirksam werden. Beide Einflüsse sind essentiell und bestimmen in welche Richtung sich die Lebensgemeinschaften entwickeln (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2013).

Die Textur und Struktur des Bodens ist von der Mineralzusammensetzung des Bodens abhängig. Hartgesteine wie Granite und Gneise verursachen ein grobkörniges Bodengefüge mit Grobporen und mit hohem Luftgehalt, jedoch mit geringer nährstoff- und wasserspeichernder Kraft, da Fein- und Mittelporen nur in geringem Maße vorhanden sind. Umgekehrte Eigenschaften haben Phyllite und Tonschiefer. In humosen Schichten wird durch ausreichend Kalkgehalt die Krümelbildung und somit die Stabilität des Bodengefüges gefördert. In Feinsedimentböden wird durch einen hohen Alkaligehalt eine Verdichtung und Luftarmut hervorgerufen. Die klimatischen Eigenschaften und Einflüsse bestimmen, die auf die Vegetation und damit auf die Bewurzelung wirkenden, spezifischen Bodeneigenschaften (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2013).

Der Einfluss der Wurzeln auf die Struktur des Bodens (Bodengefüge) bewirkt eine Verbesserung der Bodendurchlüftung und Wasserführung, aber als auch eine weitere Vertiefung des durchwurzelten Bodenraumes (RAMANN, 1898). Verdichtete Bodenschichten können durch dickere Wurzeln aufgelockert werden. Bei starker Windeinwirkung kann auch eine mechanische Bodenlockerung durch die stark auf Zug beanspruchten Wurzeln erfolgen (KÖSTLER et al., 1968). Die Wurzeln verankern und stützen die Pflanzen. Dicke, starre Wurzeln haben eine gute Dübelfunktion, elastische und reißfeste Wurzeln wirken hingegen wie ein Anker. Für eine homogene Durchwurzelung des Bodens ist darauf zu achten, dass die Zusammensetzung von Pflanzengesellschaften unterschiedliche Wurzeleigenschaften aufweisen (FLORINETH, 2012). Gräser und Kräuter können den Boden von 0,75 bis 1,5 m festigen.

Als bedeutende bodenbildende Faktoren schaffen die Lebensgemeinschaften aus Pflanzen und Tieren die Grundvoraussetzungen, die für die Bewurzelung ausschlaggebend ist. Die Humusanreicherung trägt einen speziellen Teil dazu bei. Die Symbiose von Wurzeln mit Pilzen hat ebenfalls eine wichtige ökologische Rolle. Wenn der Abbau des Bestandsabfalls nicht durch das Bodenleben stattfindet, ermöglicht die Symbiose mit Pilzen diesen Vorgang. Die Abbaulebewesen heben die Rohhumusbildung und sorgen für die Entbasung des Bodens. Daraus ergibt sich der humusreiche Oberboden der sich vom mineralstoffreichen Unterboden absondert (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2013).

### **Wachstumsfaktor Boden**

Die tatsächliche Durchwurzelungstiefe ist als rechnerisch bestimmte Mächtigkeit von einer Bodenart, Trockenrohddichte und der abhängigen Bodenzone definiert. Diese wird als effektiver Wurzelraum bezeichnet (AD-HOC-AG BODEN, 2005). Im effektiven Wurzelraum kann, das für die Pflanzen nutzbare, Bodenwasser von den Wurzeln voll ausgeschöpft werden. Da der Hauptwurzelraum der meisten Wild-

und Kulturpflanzen auf den Oberboden beschränkt ist, entscheidet in Trockenperioden die Kapillarität des Unterbodens darüber, in welchem Umfang Wasser und gelöste Nährstoffe in den Hauptwurzelraum aufsteigen können (SCHROEDER, 1992; SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2011).

Zusätzlich zu der Bodenkonsistenz und den sich daraus ergebenden Faktoren können eine Vielzahl von exogenen Faktoren die Durchwurzelbarkeit eines Standortes entscheidend beeinflussen. Stark verdichtete Horizonte mit geringem Gehalt an Grobporen, Ortstein, Raseneisenstein, ein hoher Salzgehalt oder extreme pH- Werte können bewirken, dass der Wurzelraum nur Teile des eigentlich durchwurzelbaren Bodenkörpers umfasst (SCHROEDER, 1992). Unzureichende Wasserdurchlässigkeit und Durchlüftung in verdichteten lehmigen und tonigen Lagen der Unterböden hemmen die Durchwurzelung genauso stark wie verdichtete sandige Unterböden, die einen hohen mechanischen Eindringwiderstand für die Wurzeln aufweisen. Nährstoffarmut, Luftmangel und hoch anstehendes Grund- oder Stauwasser werden als höchst hindernde Faktoren des Wurzelwachstums und Tiefenwachstums angeführt (AD-HOC-AG BODEN, 2005; SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2010).

Neben dem Klima ist ein feinerdreicher Boden für die Erreichung einer tiefen Durchwurzelung des Bodens ausschlaggebend. KUTSCHERA & SOBOTIK (1997) haben Versuche bei der Gräserart Rohr-Schwingel *Festuca arundinacea* gemacht und diesen auf zwei unterschiedlichen Böden ausgesät: auf einem humusreichen Wiesenboden und auf einem Schotterboden. Dabei wurden signifikante Differenzen der Wurzeltiefen festgestellt und die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Böden neben dem Klima einen wesentlichen Teil zum Tiefenwachstum der Wurzel beitragen. Im Schotterboden verliefen die Wurzeln stärker gewunden und weniger gestreckt, das Eindringungsvermögen war gemindert und somit die Wurzellänge geringer. Wohingegen im feinerdreicheren Boden das Wachstum und das Eindringvermögen der Wurzel in dieser Bodenart für die Pflanze leichter war (KUTSCHERA et al., 1997).

### **Wurzelraum**

Untersuchungen haben gezeigt, dass bis zu 90 % der Wurzeltrockenmasse der meisten Wild- und Kulturpflanzen bei optimaler Wasser- und Nährstoffversorgung im Oberboden liegt und das im Bereich 0 und 30 cm Tiefe. Dadurch nimmt auch mit ansteigender Bodentiefe die Wurzelmasse ab (SCHROETTER, 2015). Wie gut der Boden durchwurzelt ist, hängt unmittelbar mit der Standfestigkeit des Bodens zusammen, was auch etwas über die Wasser- und Nährstoffversorgung aussagt. Bodenkomponenten wie Ortstein, Raseneisenstein, stark verdichtete Bodenhorizonte mit geringem Anteil an Grobporen, hoch anstehendes Grund- oder Stauwasser, Salzgehalt, pH-Wert können bewirken, dass die Pflanzenwurzeln nur Teile des Bodens erschießen (BLUM, 2007). Die mechanische Gründigkeit definiert die Durchwurzelungstiefe der Pflanze und wird in Dezimeter (dm) angegeben. Allerdings wird bei der physiologischen Gründigkeit von der maximalen tatsächlich erreichbaren

Durchwurzelungstiefe der Pflanze gesprochen. Gründe für die Einschränkung der physiologischen Gründigkeit sind meist Bodenhorizonte mit ungünstigen chemischen Eigenschaften, Stauwasser und ungünstigen Gefügeformen (STAHR et al., 2012).

### **Durchwurzelbarkeit**

Unter Durchwurzelbarkeit wird die Tiefe verstanden, bis zu der die Pflanzenwurzeln unter den gegebenen Standortbedingungen tatsächlich in den Boden eindringen können (AD-HOC-AG BODEN, 2005). Die maximal mögliche Durchwurzelungstiefe liegt standortabhängig zwischen 15 cm auf Böden mit flach anstehendem Felsgestein und ca. 250 cm auf tiefgründigen Schwarzerden aus Löß ohne Unterbodenverdichtungen (SCHROEDER, 1992). Da Wurzeln hauptsächlich in Grobporen wachsen (Wurzelhaare in Mittelporen), wird die Durchwurzelung bei einem Grobporenanteil von weniger als 6 % begrenzt. Bei Bodenhorizonten, die verdichtet sind, wird das Wachstum zusätzlich gehindert, da die Wurzeln Bodenteile verschieben und dadurch einen höheren Scherwiderstand zu überwinden haben (STAHR et al., 2012).

Die Durchwurzelungsintensität wird durch die Anzahl der Feinwurzeln (Durchmesser <2 mm) pro m<sup>2</sup> Boden bestimmt, die die Leistungsfähigkeit des Wurzelsystems kennzeichnet. Je größer die Durchwurzelungsintensität, umso besser erfolgt die Wasser- und Nährstoffaufnahme und daraus ergibt sich eine höhere Standfestigkeit. *„Die potentielle Durchwurzelungsintensität wird als Durchwurzelbarkeit bezeichnet. Sie ist eine Standorteigenschaft und hängt vom Steingehalt, der Lagerungsdichte (Masse des bei 105°C getrockneten Bodens bezogen auf sein Gesamtvolumen), dem Grobporenanteil und dem Gefüge des Bodens ab.“* (STAHR et al., 2012) Diese Standorteigenschaft wird in der Tabelle 3 gegenüber des Pflanzenanspruchs „Wurzelraum“ aufgestellt.

Tabelle 5 gibt einen Überblick über die Tiefe der Durchwurzelbarkeit von Böden, die in Stufen eingeteilt sind:

**Tabelle 5: Durchwurzelbarkeit der Böden (BLUM, 2012)**

<b>Bodentiefe</b>	<b>Durchwurzelbarkeit</b>
<10 cm	sehr flachgründig
10-25 cm	flachgründig
25-50 cm	mitteltiefgründig
50-100 cm	tiefgründig
>100 cm	sehr tiefgründig

### **Ausgewählte Wurzelparameter**

Damit das Wurzelwachstum und die Wurzelarchitektur beschrieben werden kann, sind die wichtigsten messbaren Parameter der Wurzeln in folgender Tabelle aufgelistet. Die zu ermittelnden Parameter

können anhand der Forschungsfrage abgeleitet werden und müssen oft miteinander kombiniert oder in Verhältnisse gesetzt werden, um verwertbare Ergebnisse zu bekommen. Dies wird im Kapitel 5 „Ergebnisse und Interpretation“ durchgeführt.

**Tabelle 6: Unterschiedliche Wurzelparameter (SMITH et. al., 2000)**

Parameter	Einheit	Beschreibung
Wurzelvolumen	[cm <sup>3</sup> ]	Raum, der vom Wurzelsystem eingenommen wird
Gesamtwurzellänge	[m]	Länge aller Wurzeln eines Systems
Volumen nach Durchmesserklassen	[cm <sup>3</sup> /Ø]	Volumen aller Wurzeln je definierter Durchmesserklasse
Länge nach Durchmesserklassen	[cm/ Ø]	Längen aller Wurzeln je definierter Durchmesserklasse
Root length density (RLD)	[cm/cm <sup>3</sup> ]	Root length density = Länge der Wurzel in einer Volumeneinheit Boden
Root weight density (RWD)	[mg/cm <sup>3</sup> ]	Verhältnis von Wurzelmasse [mg] zu einer Volumeneinheit Boden [cm <sup>3</sup> ]
Wurzeltrockengewicht	[g]	Bis zur Gewichtskonstanz getrocknete Wurzelprobe
Wurzel-Spross-Verhältnis	z. B.: 1:2	Verhältnis zwischen dem Trockengewicht der Wurzeln und dem Trockengewicht von Spross und Blättern

### 2.3.1 Einfluss der Vegetation auf die Bodenstabilität

Die Durchwurzelung des Bodens ist für Pflanzen und Boden von großer Bedeutung. Die Pflanzen bekommen Halt und für das Wachstum notwendiges Wasser, Luft und Nährstoffe. Der Boden wird durch die Pflanzenwurzeln durchwurzelt, festgehalten und somit vor Erosionen geschützt, auch liefern die abgestorbenen Pflanzenmaterialien Nährstoffe für Mikroorganismen. Das Gesamte ist ein geschlossener Kreislauf, der in der Ingenieurbiologie genutzt wird.

Die Pflanzenwurzeln erhöhen die Scherfestigkeit des Bodens und damit die Stabilität von Hängen und Böschungen. Eine Durchwurzelung von Böschungen erhöht deren Standsicherheit, weil sie als Bewehrungselemente betrachtet werden können. Sie erhöhen den Erosionswiderstand und vermindern die Rutschgefahr.

Für ingenieurbiologische Baumaßnahmen soll bei der Zusammensetzung der Pflanzengesellschaften auf die Durchwurzelungsarten, bei Gräser und Kräuter auf Intensiv- und Extensivwurzler, geachtet werden. Heterogene Wurzelbilder und eine Artenvielfalt sind wichtig, damit der Bodenkörper homogen durchwurzelt ist und die Anker- und Dübelwirkung den bestmöglichen maximalen Wert erreicht (E.F.I.B., 2015).

Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften die Böden aufweisen, wachsen die Pflanzenwurzeln aus Reaktion darauf verschieden. Die Eigenschaften haben sowohl Einfluss auf die

Wachstumsgeschwindigkeit, als auch auf die Ausrichtung und darauf ob sich die Pflanzenwurzeln gewissen Bereichen im Boden ab- oder zuwenden (DOUSSAN et al., 2003).

Laut DIN NORM 18 918 (1990) erfolgt die Einschätzung des Bodens unter Beobachtung folgender Parameter:

- Mächtigkeit des durchwurzelbaren Bodens,
- Anteil an Oberboden
- Körnung und Struktur,
- Bodenreaktion (pH-Wert, Nährstoffgehalt, Gehalt an organischer Substanz),
- Wasserdurchlässigkeit und Wasserspeicherfähigkeit,
- toxische Substanzen.

Da die unterschiedlichsten Pflanzen eine andere Durchwurzelbarkeit und damit verschiedene Wurzeltiefen erreichen, ist bei einer Begrünung speziell auf die Zusammensetzung einer gerechten Gräser-Kräuter-Leguminosen-Saatgutmischung aus Intensiv- und Extensivwurzlern zu achten. Sie sollten sich möglichst abwechseln, um den Wurzelkörper vorzugsweise homogen zu durchwurzeln (FLORINETH, 2012).

### **Erosionsschutz**

Durch die oberflächliche Bedeckung des Bodens wirkt die Vegetationsschicht wie eine Art Puffer und Prallschutz gegenüber Niederschlägen. Je nach Beschaffenheit des Bodens und der Witterungsverhältnisse kann das Wasser verzögert in den Boden eindringen und von den Bodenbestandteilen aufgenommen werden. Durch das Wurzelsystem der Vegetation werden die Bodenteilchen festgehalten, was zu einer Verringerung bis Verhinderung des Bodenabtrages und somit der Erosion führt (FLORINETH, 2012).

### **Bodenentwässerung und Standsicherheit**

Pflanzen verdunsten, durch ihren artabhängigen Stoffwechsel, Wasser und geben es an die Umgebung ab. Zugleich wird durch die Aufnahme von Wasser durch die Wurzeln, der Boden entwässert. Durch die Abnahme der Bodenfeuchtigkeit ergibt sich eine zunehmende Kohäsion der Bodenpartikel, gleichzeitig wird das Gewicht des Bodenkörpers verringert, wodurch eine erhöhte Standsicherheit von Böschungen erzielt werden kann. Bäume weisen einen höheren Verdunstungseffekt auf als Gräser. Jedoch können, je nach Standort oder Nutzung der Fläche, nicht immer Bäume zum Einsatz kommen. Mithilfe von Wurzelauflösungen werden im Boden Aggregate gebildet, die die Stabilität erhöhen und wiederum die Kohäsion anheben. Die abgestorbenen Pflanzenorgane tragen einen wesentlichen Teil zum Bodenleben bei, sie bieten Nahrungsgrundlage für Mikroorganismen, die ebenfalls das Krümelgefüge des Bodens positiv beeinflussen (FLORINETH, 2012).

Die Vegetation mit ihren unzähligen Arten weist einen hohen Wasserverbrauch auf. Der Deckungsgrad spielt dabei auch eine Rolle. In unseren Breiten liegt der Wasserverbrauch während der Vegetationsperiode im Grünland zwischen 300 und 400 mm/a (PRINZ & STRAUSS, 2011).

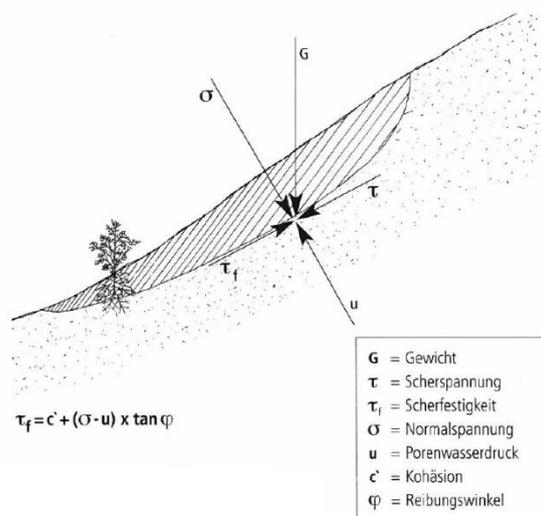
### Scherfestigkeit von Boden/Scherwiderstand als Bodeneigenschaft

Die Scherfestigkeit eines Bodens wird als Spannung, die auf eine Flächeneinheit ausgeübt wird, verstanden. Ausgedrückt wird die Scherkraft in der linearen Mohr-Coulomb'schen Gleichung, welche in Abbildung 16 angegeben wird.  $\tau$  ist der auf die Fläche angelehnte Scherwiderstand (= Schubspannung in der Scherfläche in Richtung der Scherbewegung im Grenzzustand).  $\sigma$  bezieht sich ebenfalls auf die Fläche und ist die Auflast (Normal- oder Gesamtspannung), als  $c$  und  $\phi$  werden die eigentlichen Eigenschaften des Materials beschrieben und definieren die Kohäsion und den Reibungswinkel (HARTGE & HORN, 2014).

Die Scherfestigkeit kann durch folgende Wirkungen der Vegetation erhöht werden:

- Erhöhung der Kapillar- und Kohäsion durch Wasserentzug;
- Erhöhung der Kohäsion durch Aggregatbildung infolge Wurzelausscheidung bzw. Aktivität von Bodenorganismen;
- Mechanische Stabilisierung durch die armierende Wirkung der Pflanzenwurzeln;

Die Wirksamkeit dieser Faktoren ist rechnerisch in der Formel von SELBY (1993) dargestellt:



**Abbildung 16: Sicherheit gegen Abrutschen durch Änderung der Bodeneigenschaften und Verankerung durch Wurzeln (SELBY, 1993)**

Der Reibungswinkel wird von Textur, Aggregierungsgrad, Kornform und Lagerung, dem Anteil und der Qualität der organischen Substanz als auch dem vertikalen Spannungsbestandteil im Boden geprägt.

Er ist somit die Summe aller, zwischen den Kornfraktionen wirkende Reibungskräfte, die ein gegenseitiges Vorbeigleiten verhindern. Entschwindet die potentielle Scherfläche durch ein verzahntes Bodenpartikel, müssen die Körner oder Aggregate selbst abgeschert oder in eine andere Lage gebracht werden. Dadurch wird während des Abschervorganges entweder aufgelockert, was bei dicht gelagertem Material der Fall wäre, oder verdichtet, was bei locker gelagertem Material zutreffen würde. In kohärentem Material nimmt der Reibungswinkel in der Regel kleinere Werte an als beispielsweise in reinen Sanden, Kiesen oder gut strukturierten Böden. Die Kräfte, welche gegen Bodenbewegungen wirken, basieren auf der Scherfestigkeit ( $\tau$ ) der Bodenmatrix (HARTGE & HORN, 2014).

Untersuchungen gemäß SEIFERT (2012), KRÄTTLI & SCHWARZ (2015) und STEINACHER et al. (2009) haben gezeigt, dass Pflanzenwurzeln die Kohäsion positiv beeinflussen. Die Angabe der Kohäsionszunahme durch die Pflanzenwurzeln gilt vielfach als aufwändig und ist mit Unsicherheiten anzusehen. Als „scheinbare Kohäsion“ wird der Anstieg der Bodenkohäsion mithilfe der Wurzeln beschrieben, was den Wurzelkohäsionswert ( $c_R$ ) angibt und von der Vegetationsform und den Bodenparametern untergeordnet ist.

Laut SEIFERT (2012) liegt der zusätzliche Kohäsionswert eines Bodens mithilfe von Graswurzeln in der Schweiz durchschnittlich bei  $c_R=8 \text{ kN/m}^2$ . KRÄTTLI und SCHWARZ (2015) geben die „scheinbare Kohäsion“ durch „Wurzelverstärkung“ mit  $0-20 \text{ kN/m}^2$  an. Gemäß der Arbeit von STEINACHER et al. (2009) sind ähnlich hohe Werte zwischen  $2$  und  $22 \text{ kN/m}^2$  eingetragen.

### 3 Versuchsdesign und Materialien

In diesem Kapitel werden der Versuchsaufbau, die verwendeten Materialien und die anschließenden Pflegemaßnahmen näher beschrieben. Dabei wird auf das Untersuchungsgebiet, die geografische Lage und die klimatischen Verhältnisse näher eingegangen.

#### 3.1 Untersuchungsgebiet

Der Versuchsaufbau und die damit verbundenen Untersuchungen, wurden im Jahr 2016 im Versuchsgarten der Universität für Bodenkultur des Institutes für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, welcher sich in Niederösterreich in Groß Enzersdorf befindet, gebaut und durchgeführt. Groß Enzersdorf gehört zur Gemeinde Gänserndorf und liegt 156 Meter über dem Meeresspiegel (STADTGEMEINDE GROSS ENZERSDORF, 2017). Der Versuchsgarten liegt östlich von Wien ist in der folgenden Abbildung mit einem roten Punkt markiert.

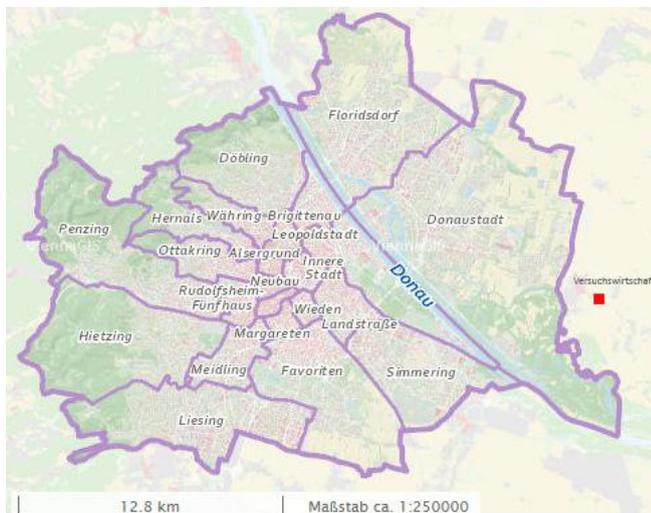


Abbildung 17: Wiener Bezirke mit Verortung der Versuchswirtschaft in Groß Enzersdorf (VIENNA GIS, 2017)

Das Gebiet liegt in einer Donauniederung, auf der quartären Prater- und Schotterterrasse der Donau. Über dem Schotter wurde ein  $\text{CaCO}_3$ -hältiges Sediment durch den Strom abgelagert, welches das Ausgangssubstrat der Bodenbildung ist - der Schotter ist jedoch nicht an der Bodenbildung beteiligt. Aufgrund der Anschwemmung des Schotters verläuft der Schotterkörper nicht geradlinig sondern wellig. Wo er tiefer liegt, konnte mehr Sediment abgelagert werden, daher ist der Boden tiefgründiger - bis zu 2 m. Der gewachsene Boden der Versuchsanlage in Groß Enzersdorf ist ein Tschernosem, das sich aus den Donausedimenten gebildet hat, der Bodenkörper erreicht hier eine Tiefgründigkeit von bis zu 80 cm (IBF, 2016).

Die Versuchsanlage liegt im pannonischen Klimagebiet und ist durch heiße, trockene Sommer und kalte, schneearme Winter geprägt. Die mittlere Jahrestemperatur beträgt 9,8 C und die mittlere

Niederschlagssumme 545 mm. Die Versuchswirtschaft liegt in offener, windiger Lage (DNW BOKU, 2016a).

Abbildungen 18 und 19 zeigen den durchschnittlichen Niederschlag und die Temperatur, gemessen an der Wetterstation Raasdorf des Departments für Nutzpflanzenwissenschaften, BOKU. Die Klimadaten werden für die Vegetationsperiode 2016 (07 bis 11/2016) präsentiert. Die Balken der Niederschläge lassen erkennen, dass im Juli 2016 die höchsten Niederschläge mit 25 und 27 mm/m<sup>2</sup> gemessen wurden. Die heißesten Monate waren Juli und August mit durchschnittlich 20,1°C und 19,6°C. Die kältesten Monate der gewählten Periode waren der November 2016 mit durchschnittlich +7°C.

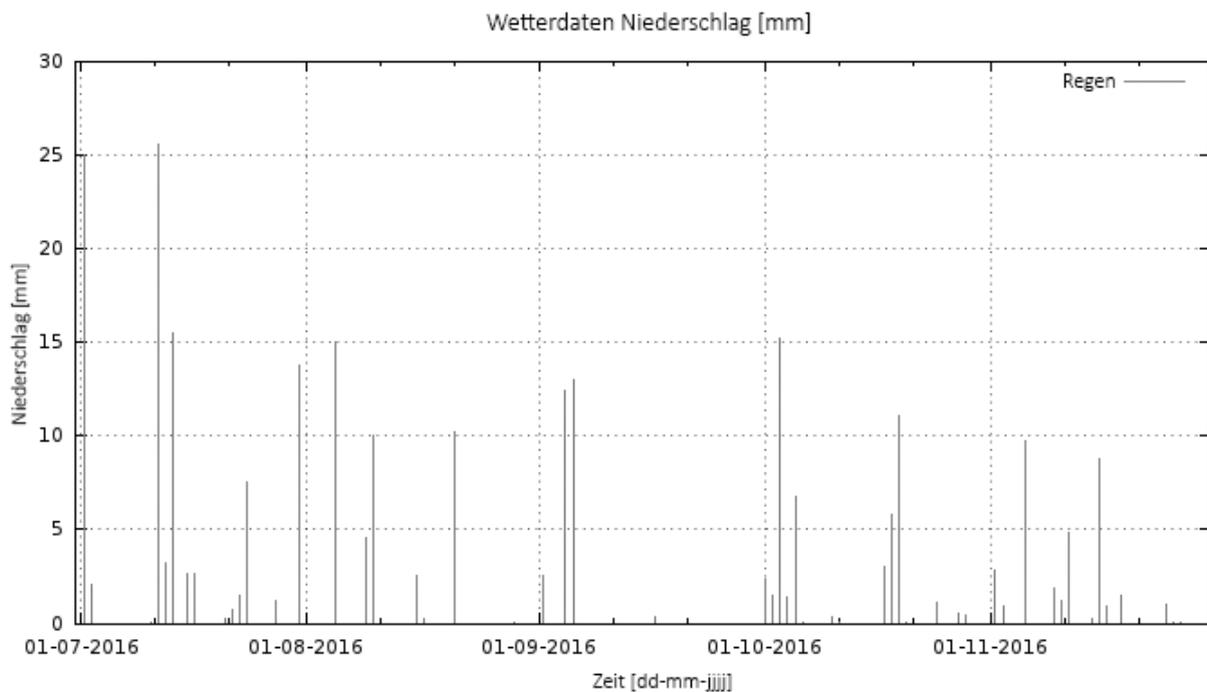


Abbildung 18: Niederschlag der Wetterstation Raasdorf von Anfang Juli bis Ende November 2016 (verändert nach DNW BOKU, 2016b)

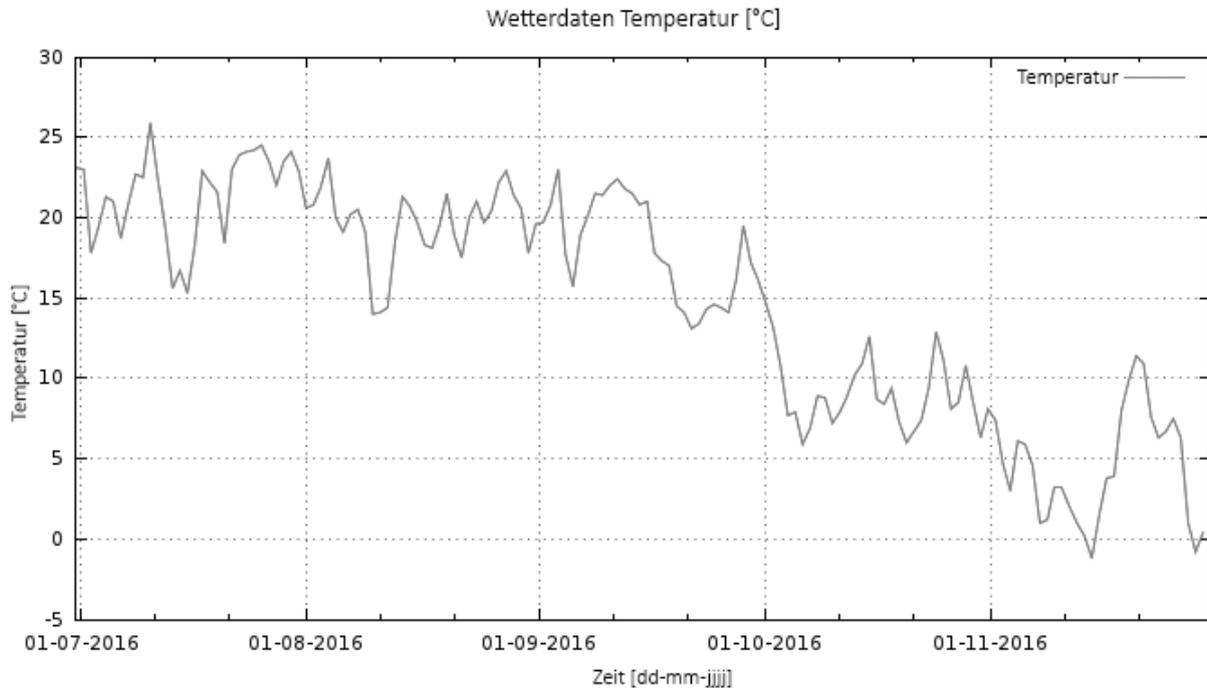
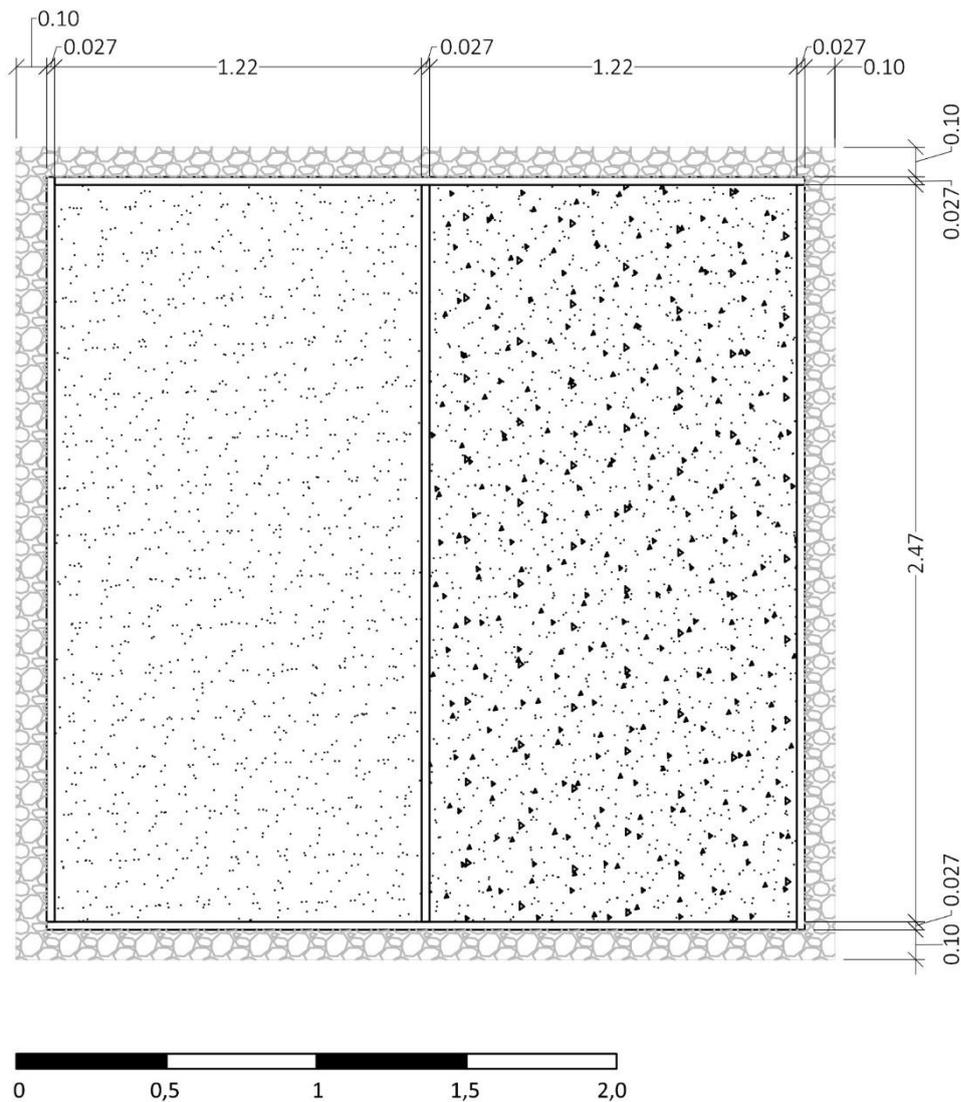


Abbildung 19: Temperatur der Wetterstation Raasdorf von Anfang Juli bis Ende November 2016 (verändert nach DNW BOKU, 2016b)

### 3.2 Versuchsaufbau und Varianten

Für den Versuchsaufbau wurden zwei Versuchs-Setups in einer Art „Hochbeet“ gebaut. Das Grundgerüst wurde aus 27 mm starken Schaltafeln angefertigt. Das Innenmaß beträgt 2473 x 2473 x 500 mm. Die zwei Versuchsfelder haben das idente Fassungsvermögen von 2,47 x 1,22 x 0,5 m und ein Volumen von 1,5 m<sup>3</sup>, welches jeweils mit Substraten unterschiedlicher Kornverteilung befüllt wurde.

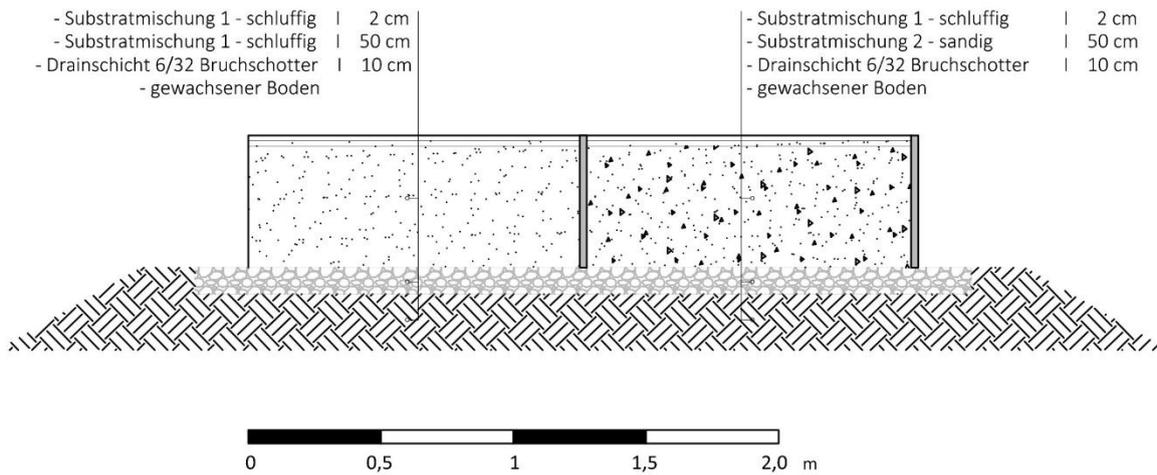
Abbildung 20 veranschaulicht das Flächenmaß und die Form des Versuchs-Setups mittels Grundrissplan.



**Abbildung 20:** Grundriss des Versuchsaufbaus in Meter dargestellt

Eine Fläche von 2,7 x 2,7 m wurde in der Versuchswirtschaft Groß Enzersdorf mittels Bobcat 10 cm abgeschält. Diese wurde mit 6/32 Bruchschotter aufgefüllt um eine Drainschicht zu erhalten und überschüssiges Wasser problemlos ableiten zu können. Direkt auf die Drainschicht wurde das „Hochbeetgerüst“ gebaut. Zur Stabilisation wurden zusätzliche Querhölzer eingeschraubt, damit dieses dem Druck und dem Gewicht der Substrate stand hält.

Abbildung 21 zeigen einen schematischen Schnitt des Versuchsaufbaus unter Angabe der verwendeten Materialien bzw. Aufbaumächtigkeit.



**Abbildung 21:** Schematischer Schnitt durch den Versuchsaufbau

Die Abbildungen 22 bis 25 stellen den Bau der Versuchsanlage, welche Anfang Juli 2016 angelegt wurde bildlich dar.



**Abbildung 22:** Abschälen der oberen Vegetationsschicht (12.07.2016)



**Abbildung 23:** Herstellung der Drainageschicht (12.07.2016)



**Abbildung 24: Bau der Rahmenkonstruktion (12.07.2016)**



**Abbildung 25: Verstärkte Rahmenkonstruktion (12.07.2016)**

Bei dem Versuchsfeld handelt es sich um eine 2,5 x 2,5 m große Fläche, die in zwei Versuchsfelder unterteilt ist. Beide weisen eine 50 cm mächtige Substratschicht auf, die unterschiedliche Zusammensetzungen der Substratkomponenten ausweisen.

Bei den Substratkomponenten handelt es sich um 0/7 Kiessand ungewaschen und gesiebte Erde, welche aus dem Wiener Raum stammt. Tabelle 7 gibt die Mischverhältnisse der Substratmischungen an. Kapitel 5.3.1 "Korngrößenverteilung und Bodenart" gibt genauen Aufschluss über die Korngrößenverteilung der zwei Substratmischungen. Die oberen 2 cm wurden bei beiden Feldern mit dem Substratkörper 1-schluffig aufgefüllt, um für beide Versuchsabschnitte die gleichen Keimbedingungen zu gewährleisten. Die hat zur Folge, dass auf den Abbildungen 26-29 kein erkennbarer Unterschied zwischen den beiden Substratmischungen ersichtlich ist.

**Tabelle 7: Mischverhältnis und Komponenten der Substratvarianten**

Substratmischungen	Substratkomponente
Substratvariante 1 - schluffig	10 % 0/7 Kies und 90 % Erde
Substratmischung 2 - sandig	90 % 0/7 Kies und 10 % Erde

Der Bau des Versuchsfeldes war innerhalb von vier Tagen abgeschlossen. Das Substratmaterial wurde am Mittwoch, den 13.07.2016 von der Firma Günther SPINDLER Ges.m.b.H geliefert und vor Ort gemischt und mittels LKW-Kranschaufel größtenteils in die Versuchsfelder geschüttet. Aufgrund von starkem Regen wurden die Bauarbeiten verschoben. Am darauffolgenden Tag, den 14.07.2016 konnten die Feinarbeiten durchgeführt werden, das restliche Substrat wurde in die Versuchsfelder geschaufelt und die Flächen planiert. Nachdem über Nacht erneut Regenwetter angesagt war, wurde auf die Einsaat gewartet und das Substrat über Nacht „setzen“ gelassen.

### 3.3 Begrünungsmaßnahmen und -technik

Nach dem Bau und der Befüllung der Versuchsfläche wurden die Flächen angesät, das Saatgut leicht angewalzt und bewässert. Die Ausführung der Gräser-Kräuter Ansaat erfolgte händisch als einfache Trockensaat bei einer Saatgutmenge von 10 g/m<sup>2</sup>. Abbildungen 26-29 veranschaulichen die einzelnen Arbeitsschritte der Ansaat:



**Abbildung 26: Ansaat der Gräser-Kräuter-Leguminosen-Saatgutmischung (15.07.2016)**



**Abbildung 27: Anwalzen des ausgebrachten Saatguts (15.07.2016)**



**Abbildung 28: Bewässern der fertigen Versuchsanlage (15.07.2016)**



**Abbildung 29: Fertiggestellte Versuchsanlage mit (li) V 1 - schluffig und (re) V 2 - sandig (15.07.2016)**

Für den Versuchsaufbau wurde die Gräser-Kräuter-Saatgutmischung „S8 Gumpensteiner Schotter- und Parkplatzrasenmischung für mittlere und höhere gelegene Standorte“ von der Firma Kärntner Saatbau reg.Gen.m.b.H. verwendet. Durch die Artenvielfalt, die diese Saatgutmischung aufweist, sind die unterschiedlichsten wurzelphysiologischen Eigenschaften vertreten. Neben horstbildenden und tief- bzw. flachwurzelnden Arten sind auch ausläuferbildende Arten vertreten. Die horstbildenden Arten zeichnen sich durch ein dichtes Wurzelnetz nahe der Bodenoberfläche aus. Die tief wurzelnden Arten hingegen fungieren armierend und verbinden die unterschiedlichen Bodenschichten. Die Artenzusammensetzung der Saatgutmischung kann aus den Tabellen 8 und 9 entnommen werden.

**Tabelle 8: ReNatura® S8 Gumpensteiner Schotter- und Parkplatzrasenmischung für mittlere und höhere gelegene Standorte – Gräseranteil (KÄRNTNER SAATBAU, 2014)**

Gräsermischung 85 %		
Botanischer Name	Deutscher Name	Anteil (%)
<i>Agrostis capillaris</i>	Rotstraußgras	2,00 %
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	Ruchgras	2,00 %
<i>Cynosurus cristatus</i>	Kammgras	5,00 %
<i>Festuca rubra trychophylla</i>	Kurzausläuferbildender Rotschwingel	10,00 %
<i>Festuca nigrescens</i>	Schwärzlicher Rotschwingel	10,00 %
<i>Festuca rupicola</i>	Furchenschwingel	18,00 %
<i>Festuca ovina</i>	Schafschwingel	5,00 %
<i>Lolium perenne</i>	Englisches Raygras	5,00 %
<i>Poa angustifolia</i>	Schmalblättrige Rispe	8,00 %
<i>Poa annua</i>	Jährige Rispe	4,00 %
<i>Poa compressa</i>	Platthalm Rispe	8,00 %
<i>Puccinellia distans</i>	Salzschwaden	8,00 %

**Tabelle 9: ReNatura® S8 Gumpensteiner Schotter- und Parkplatzrasenmischung für mittlere und höhere gelegene Standorte – Kräuteranteil (KÄRNTNER SAATBAU, 2014)**

Kräutermischung 15 %		
Botanischer Name	Deutscher Name	Anteil (%)
<i>Achillea millefolium</i>	Schafgabe	1,30 %
<i>Anthyllis vulneraria</i>	Wundklee	1,00 %
<i>Dianthus deltoides</i>	Heidenelke	0,20 %
<i>Galium album</i>	Wiesenlabkraut	0,20 %
<i>Galium verum</i>	Echtes Labkraut	0,10 %
<i>Hieracium pilosella</i>	Kleines Habichtskraut	0,10 %
<i>Leontodon autumnalis</i>	Herbst-Löwenzahn	0,20 %
<i>Leontodon hispidus</i>	Rauer-Löwenzahn	1,00 %
<i>Leucanthemum vulgare</i>	Margerite	2,20 %
<i>Lotus corniculatus</i>	Hornklee	1,00 %
<i>Medicago lupulina</i>	Gelbklee	1,30 %
<i>Plantago media</i>	Mittlerer Wegerich	0,50 %
<i>Prunella vulgaris</i>	Gemeine Braunelle	0,50 %
<i>Rumex acetosella</i>	Kleiner Sauerampfer	0,15 %
<i>Salvia pratensis</i>	Wiesensalbei	2,10 %
<i>Sanguisorba minor</i>	Kleiner Wiesenknopf	0,60 %
<i>Silene vulgaris</i>	Gemeines Leimkraut	2,35 %
<i>Thymus pulegioides</i>	Gemeiner Thymian	0,50 %

### 3.4 Anwuchspflege/Fertigstellungspflege

Aus der Tabelle 10 kann herausgelesen werden, dass eine Bewässerung in Form eines Rechteckregners fast ein Monat nach Aufbau der Versuchsflächen installiert wurde. Der Grund dafür lag an einer defekten Wasserpumpe. Die Flächen wurden einstweilen händisch gegossen. Die Bewässerungsautomatik berechnete die Fläche einmal am Tag in der Früh für ca. 3-5 Minuten. Aufgrund der fehlenden regelmäßigen Bewässerungen, des starken Windes und der Vögel keimte das aufgebrauchte Saatgut in der initialen Anwuchsphase nur unregelmäßig. Aus diesem Grund fand am 25.08.2016 eine Nachsaat mit weiteren 10 g/m<sup>2</sup> statt. Nach dieser Übergangsphase wurde am 13.09.2016 mit den Fotoaufnahmen für die Deckungsgradermittlung begonnen.

**Tabelle 10: Zeitlicher Ablauf der Arbeitsschritte**

Tätigkeit		Datum
Versuchsaufbau	Bau des Versuchs-Setups	12.07.2016
	Mischung der Substrate; Befüllung der Versuchsfelder	13.07.2016
	Planieren der Felder	14.07.2016
	Ansaat	15.07.2016
Pflegetmaßnahmen	Nachsaat	25.08.2016
	Installation der Bewässerung	26.08.2016
	Beikräuter entfernen	regelmäßig
Datengewinnung	Deckungsgradermittlung	13.09.2016
		21.09.2016
		13.10.2016
		27.10.2016
		02.11.2016
	Deckungsgradermittlung; Entnahme der Bohrkernen; Ermittlung der Sprosslänge; Messung der Scherfestigkeit	30.11.2016
	Trockengewicht Sprosse	12.2016
	Wurzelscans	12.2016
	Trockengewicht der Wurzeln	12.2016
	Korngrößenverteilung	03.2017
	Wasserspeicherkapazität; Porenvolumen	04.2016
	organische Bestandteile	04.2017

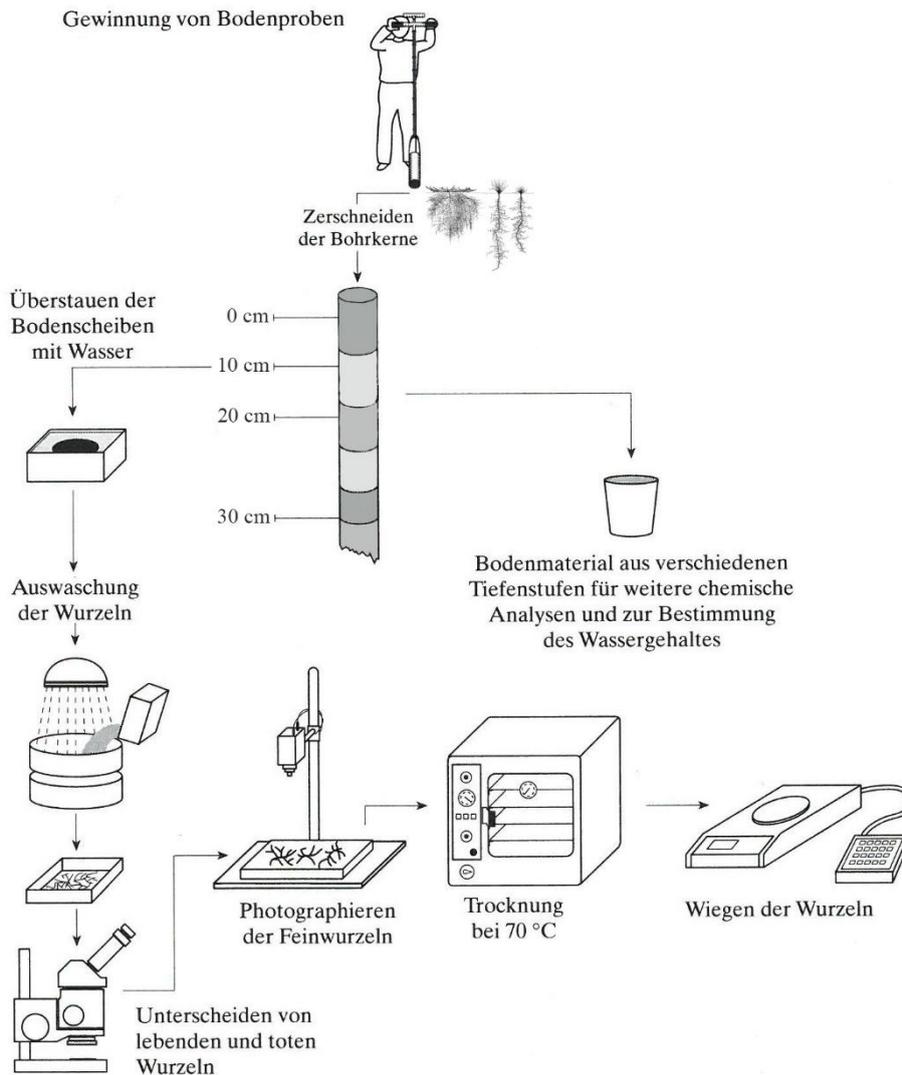
## 4 Untersuchungsparmeter und Methodik

Die folgende Tabelle 11 gibt einen kurzen Überblick, welche Parameter für die Beantwortung der Forschungsfrage wichtig sind und welche Methoden zur Gewinnung der Daten angewendet wurden.

**Tabelle 11: Übersicht von Untersuchungsparametern und Methoden**

	Untersuchungsmaterial	Methodik	Untersuchungsparameter	Einheit
Spross	oberirdische Biomasse	Sprossmessung & Maßband	Länge	[mm]
		Aufnahme-Foto, Auswertung-ImageJ und visuelle Analyse	Deckungsgrad	[%]
		Trockenschrank & Waage	Trockengewicht	[g]
	ausgewaschene Wurzeln	Bildanalysesoftware (WinRHIZO)	Wurzelvolumen	[cm <sup>3</sup> ]
			RLD (root length density)	[cm/cm <sup>3</sup> ]
		Trockenschrank & Waage	Trockengewicht	[mg]
		Trockenschrank & Waage	RWD (root weight density)	[mg/cm <sup>3</sup> ]
Wurzel/ Spross	ober- und unterirdische Biomasse (Trockengewicht)	Trockenschrank & Waage	Wurzel-Spross-Verhältnis	bsp.: 10:1
Boden	Bodenproben (Rückstellprobe)	Siebturm & Trockenschrank	Sieblinie/Korngrößenverteilung	[%]
	Bodenproben (Rückstellprobe)	Zylinder & Trockenschrank	Porenvolumen	[%]
	Bodenproben (Rückstellprobe)	Zylinder & Trockenschrank	Wasserspeicherkapazität	[%]
	Bodenproben (Rückstellprobe)	Zylinder & Trockenschrank	Wasserspeicherkapazität gravimetrisch	[%]
	Bodenproben (Rückstellprobe)	Verglühen mittels Glühofen	organischer Anteil im Boden	[%]
Boden/ Wurzeln	Versuchsfläche	Scherflügelsonde	Scherfestigkeit	[k <sub>N</sub> /m <sup>2</sup> ]

Zu Beginn wurden die Bodenproben mittels Bohrsonde entnommen und für die weiteren Untersuchungen im Labor verpackt und beschriftet. Die Länge der oberirdischen Biomasse wurde bereits am Feld ermittelt und ebenfalls sorgfältig dokumentiert. Im Labor wurden die Bodenproben mit Wasser überstaut, damit die Wurzeln von den Bodenaggregaten und Bodenmaterial getrennt werden konnten. Die Wurzeln wurden gescannt, getrocknet und schlussendlich gewogen. Für die Bodenanalysen wurde vor dem Bau der Versuchsanlage eine Rückstellprobe der beiden Substratmischungen entnommen. Abbildung 30 veranschaulicht die jeweiligen Arbeitsschritte, die zur Ermittlung der Daten durchgeführt wurden. Die genaue Durchführung der Untersuchungsmethoden wird in den nächsten Kapiteln detaillierter beschrieben.



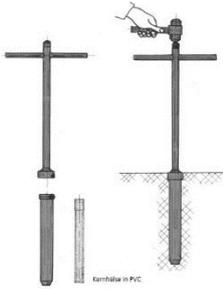
**Abbildung 30:** Arbeitsschritte bei der Entnahme und der Untersuchung der unterirdischen Biomasse mittels Bohrern-Methode (verändert nach MURACH 1984, in POLOMSKI & KUHN 1998)

#### 4.1 Entnahme von Bohrkernen

Die Anzahl an Proben pro Versuchsfläche ist speziell von der Homogenität eines Pflanzenbestandes abhängig. Wegen der geringen Variabilität der einzelnen Versuchsflächen, Wurzel- und Bodeneigenschaften betreffend, wurden acht Proben entnommen.

Mittels Bohrzylinder (siehe Abbildung 31 & 32) mit einem Durchmesser von 5 cm und der Länge von bis zu 50 cm wurden die Bohrkerns direkt am Feld gestochen (siehe Abbildung 33). Die Bohrkerns wurden im Anschluss in die jeweiligen Tiefenschichten (Layer) aufgeteilt, in 10 cm lange Abschnitte getrennt und für weitere Untersuchungen im Labor verpackt bzw. beschriftet.

Im Labor sind die noch frischen Bohrkernscheiben für weitere Untersuchungen vorbereitet worden.



**Abbildung 31: Handsonde (Skizze) (verändert nach BURCH, 2016)**



**Abbildung 32: Bodenbohrer bei der Entnahme des Bohrkerns (30.11.2016)**



**Abbildung 33: Frischer Bohrkern mit oberirdischer Biomasse (30.11.2016)**

Abbildung 34 zeigt die Versuchsfläche zum Zeitpunkt der Probenentnahme. Links ist die Versuchsfläche 1 - schluffig zu erkennen und rechts die Versuchsfläche 2 - sandig, dabei ist der Unterschied zwischen den zwei Versuchsvarianten auch visuell ersichtlich.



**Abbildung 34: Versuchsfläche zum Zeitpunkt der Entnahme der Bohrkerns (30.11.2016)**

## 4.2 Oberirdische Biomasse

Die oberirdische Biomasse beinhaltet die gesamte Sprossbildung und Blattmasse der Gräser-Kräuter-Leguminosen-Saatgutmischung, die sich in den drei Monaten entwickelt hat. Im Zuge der Untersuchungen zur oberirdischen Biomasse wurden folgende Parameter aufgenommen:

- Deckungsgrad [%]
- Maximale Sprosslänge im Bereich der Proben [mm]

- Trockengewicht der Blattmasse der jeweiligen Proben [g]

Die Erhebung der oberirdischen Biomasse wurde im November 2016 durchgeführt, wobei die Deckungsgradermittlung zur Anwuchs- und Fertigstellungsphase ab September 2016 ermittelt wurde. Die Parameter werden in den nachfolgenden Kapiteln näher erläutert.

#### 4.2.1 Deckungsgrad

Die Vegetationsdeckung wird durch die vertikale Projektion, die Pflanzenteile einnehmen quantifiziert. Dabei wird ein Bruchteil der Gesamtfläche bestimmt und auf die Gesamtfläche ausgedrückt (MUELLER-DOMBOIS & ELLENBERG, 1974). Die Ermittlung des Deckungsgrades erfolgt also durch senkrechte Projektion auf die Bodenoberfläche. Das „Dominanzmerkmal“, die „Deckung“ einer Pflanzenart oder einer Pflanzengesellschaft ist der prozentuale Anteil ihrer senkrechten Projektion auf den Boden und wird ins Verhältnis zu einer gegebenen Aufnahme­fläche gesetzt. Die Dominanz kann gemessen oder direkt am Feld geschätzt werden (TREMPEL, 2005). Die Ermittlung des Deckungsgrades kann über visuelle Deckungsschätzung, Punkt-Quadrat-Methode, Line-Intercept-Methode, Basalflächenmessungen, bestimmte Distanz-Methoden, fotografische Methoden und Zeichenmethoden festgestellt werden (BONHAM, 1989, FERRIS-KAAN & PATTERSON, 1992).

Durch geeignete Methoden der Bildverarbeitung wurde aus den Spektralanteilen (rot/grün/blau) einer herkömmlichen Farbkamera als Sensorsignal der Deckungsgrad der grünen Pflanzenmasse berechnet. Mithilfe des Computerprogrammes „ImageJ“ kann der Deckungsgrad in Prozent [%] ermittelt werden.

Zur Ermittlung des Deckungsgrades und des Begrünungserfolges wurden Fotos durch senkrechte Projektion in gleichem Höhenabstand zur Begrünungsfläche in unterschiedlichen zeitlichen Abständen aufgenommen. Nach Abschluss der Fotodokumentation wurden diese einheitlich zugeschnitten und mit „ImageJ“ analysiert. Hierbei werden diejenigen Bildanteile, die innerhalb des definierten Grünspektrums liegen, gefiltert (siehe Abbildung 36). Gemessen an der Gesamtpixelanzahl ist es schließlich möglich, die erfassten Pixel prozentuell zu berechnen und darzustellen.

Abbildung 35 zeigt ein Beispielbild einer Versuchsfläche und deren Vegetation. Abbildung 36 veranschaulicht die Analyseergebnisse der Deckungsgradermittlung mittels „ImageJ“.



**Abbildung 35:** Senkrechte Projektion der Versuchsvariante 2 -sandig (13.09.2016)



**Abbildung 36:** Analysiertes Bild (Versuchsfläche 2 - sandig) (13.09.2016)

#### 4.2.2 Maximale Sprosslänge und Trockengewicht der oberirdischen Biomasse

Die Längen der maximalen Sprosse wurden vor der Bodenbohrung erhoben. Dabei wurde pro Bodenbohrung der längste in der Fläche ( $19,6 \text{ cm}^2$ ) befindliche Spross abgemessen. Zur Ermittlung des Trockengewichtes der oberirdischen Biomasse wurden die gesamten Sprossen der Fläche der Bohrkern ( $19,6 \text{ cm}^2$ ) abgeschnitten und in ein Behältnis gegeben. Im Anschluss kamen die Biomasseproben in den Trockenschrank und wurden bei  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und im Anschluss gewogen (siehe Abbildung 37). Die Gewichtskonstante kann überprüft werden, wenn beim ersten wiegen und beim zweiten wiegen mit einer Stunde Abstand, kein Gewichtsunterschied festzustellen ist.



**Abbildung 37:** Oberirdische Biomasse zum Trocknen im Trockenschrank

#### 4.3 Unterirdische Biomasse

Gleichzeitig zu den Erhebungen der oberirdischen Biomasse wurde im November 2016 die Ermittlung der unterirdischen Biomasse durchgeführt. Dabei wurden am Feldversuch Bodenproben entnommen, die weiter im Labor mittels den nachfolgend beschriebenen Methoden untersucht wurden.

Für die Erhebung der unterirdischen Biomasse wurden folgende Parameter erhoben:

- Wurzelscans mit:
  - Wurzelvolumen [cm<sup>3</sup>]
  - Root length density (RLD) [cm/cm<sup>3</sup>]
- Trockengewicht der Wurzelabschnitte [mg]
- Root weight density (RWD) [mg/cm<sup>3</sup>]
- Wurzel-Spross-Verhältnis

#### 4.3.1 Wurzelanalysen/Wurzeln auswaschen

Um Wurzeln zu untersuchen, müssen diese vorbereitet und von Bodenaggregaten, Sand und abgestorbenem organischem Material getrennt werden. Dies kann manuell mittels Siebe oder maschinell von statten gehen (SMITH et al., 2000).

Fürs Auswaschen bedarf es an zwei Sieben, einem größeren mit der Maschenweite von 4 mm und einem feineren von 0,5 mm. Die Bohrkern werden mit lauwarmen Wasser ausgespült, da sich dabei die Bodenaggregate besser von den Wurzeln lösen. Bei den Sieben die Wurzeln mittels Pinzette in ein leeres Behältnis geben. Das Wasser soll auch aufgefangen werden, da es sein kann, dass Feinstwurzeln bis dahin ausgewaschen werden und damit die Möglichkeit besteht diese rauszusuchen. Bei diesem Arbeitsschritt muss auf eine genaue Arbeitsweise geachtet werden, da es leicht zu Verlusten von leichten und feinen Wurzeln kommen kann (POLOMSKI & KUHN, 1998). Die folgenden Abbildungen zeigen den Aufbereitungs- und Auswaschvorgang der Wurzeln vom Bodenkörper.

Die Praxis hat gezeigt, dass die Probenentnahmen rasch durchzuführen sind, jedoch die methodische Schwierigkeit im hohen Zeitaufwand beim Auswaschen und den weiteren Untersuchungen der Wurzelproben liegt.



Abbildung 38: Bohrernabschnitt



Abbildung 39: Grobe Auswaschung des Bohrerns



**Abbildung 40:** Feinere Auswaschung des Bohrkerns



**Abbildung 41:** Ausgewaschene Wurzeln und die verwendeten Materialien

#### 4.3.2 Wurzelanalyse (WinRHIZO)

Bei WinRHIZO handelt es sich um eine Bildanalysesoftware, welche speziell für die Messungen von Wurzeln entworfen wurde. Mit WinRHIZO können zahlreiche Wurzelparameter wie die Morphologie (Wurzellänge, -durchmesser, -volumen), die Topologie bzw. die Architektur eines Wurzelsystems analysiert werden. Bei WinRHIZO handelt es sich um zwei Komponenten, einer Bildaufnahmekomponente und einer Computerprogrammkomponente (LOBET, 2013).

Abbildung 42 zeigt das Bearbeitungsfenster vom Programm WinRHIZO und die möglichen Funktionen genau beschrieben.

The **Command area** is for receiving commands and displaying information.

The **Acquisition icon** shows the image origin (scanner , camera or disk ). Click it, to acquire an image from the source it represents (it has the same effect as activating *Image / Acquire*). See "IMAGE ACQUISITION" ON PAGE 15.  
**Note:** If you get the error message *Protection key not found...* when you click it, see *Appendix B, Question 6*.

The **Working mode selectors**. To change the working mode that WINRHIZO is in.  
 *Image edition*  
 *Interactive measurement*  
 *Automatic analysis*  
 See "THE WORKING MODES" ON PAGE 27.

The **Region shape selectors**. To select the shape of analysed and exclusion regions.  
 *Rectangular*  
 *Circular*  
 *Free-style (lasso)*  
 See "ON PAGE 22.

The **Image selectors** to select the displayed image.  
 *Original image*  
 *Pixel classification image*  
 *Analysed image*  
 *Color classes image*  
 Some are visible only after an analysis. See "IMAGES USED BY THE ANALYSIS" on page 32 for details.

Messages to the operator and partial analysis data. More data can be found in WinRHIZO's data files. See "THE ANALYSIS DATA" ON PAGE 18. The information displayed and their text size can be selected in *Display / Command Area* (or right clicking the mouse in the *Command Area*). On small screens there

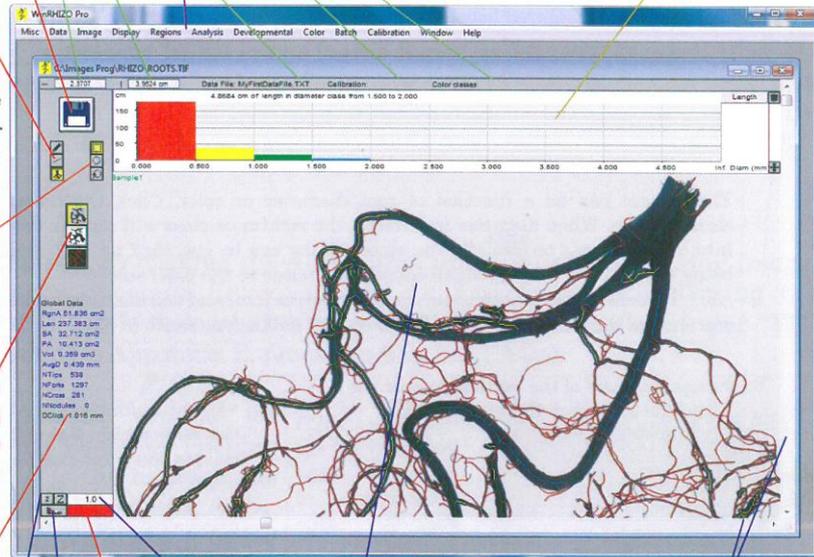
The **Image edition buttons** are visible only when WinRHIZO is in image edition mode.  
 The **Pen size tools**:  
 *Small brush*  
 *Medium brush*  
 *Large brush*  
 *Lasso tool*  
 The **Pen color tools**:  
 *Black*  
 *White*  
 *Grey*. The grey color can be changed to any color by shift-clicking in the image. The selected color is shown under the magnification factor below. See "THE EDITION WORKING MODE" ON PAGE 27 for details.

**The Information area**

- Horizontal mouse position in the image relative to top left corner.
- Vertical mouse position in the image relative to top left corner.
- Data file open (measurements data go to this file until it is closed).
- Name of active calibration file: It can be *Scanner.cal* (for *Intrinsic calibration*) or any file you have loaded manually (*Object of known dimensions calibration method*).
- Name of the open color classes file (for color analysis). If a star (\*) is appended to it, that means the classes have been edited since they were loaded.

The **Graphic area** (not in *Basic version*) is explained on next page. If it is not visible, click the *Show / Hide graphic button* in the lower left corner.

The menu bar. Its commands are described in "REFERENCE" on page 85.



The selected edition color. Click it to change the color or shift click in the image the desired color (while in *Edition working mode*)

The **Image area** is used to display, scroll and zoom the image.

To scroll the image, click the scrollbars or press the following keyboard keys:  
*Page Up* or *Up arrow* to scroll up, *Page Down* or *Down arrow* to scroll down, *Home* or *Left arrow* to scroll left, *End* or *Right arrow* to scroll right.  
*Ctrl+Page Up*, *Ctrl+Page Down*, *Ctrl+Home* and *Ctrl+End* to scroll to the top, bottom, left or right respectively.  
 You can also roll the *mouse wheel* to scroll vertically or press *Ctrl* then roll the *mouse wheel* to scroll horizontally.

The **Show / Hide Graphic button**. Click it to hide or show the root distribution graphic above the image.

Click the large "Z" button to zoom in the image (to see more details).  
 Click the small "z" button to zoom out the image (to see a larger area with less details).

The **Magnification factor**. To go directly from one magnification to another, click the button and select the desired value from the pop-up menu. A value of 1 is the magnification at which one pixel in the image corresponds to one pixel on screen. When *Fit* is selected, the image is resized to fit entirely in the *Image area*.

- 32
- 16
- 10
- 8
- 6
- 4
- 3
- 2
- 1
- 1/2
- 1/3
- 1/4
- 1/6
- 1/8
- 1/10
- 1/16
- 1/32
- Fit

Abbildung 42: Darstellung der Bearbeitungsfläche von WinRHIZO (WinRHIZO™, 2009)

Die Wurzelparameter wurden mittels destruktiver Methode nach Auswaschung der Bohrkernscheiben mittels WinRHIZO 2009 durchgeführt. Für die Analysen werden die ausgewaschenen Wurzeln im Flachbrettscanner (Epson Perfektion V700 Photo) bei einer Auflösung von 600 dpi gescannt. (siehe Abbildung 43). Dafür werden die Wurzeln in eine eigens angefertigte Plexiglas Schale, mit der Größe von 20 x 25 cm gegeben. Anschließend wird das Behältnis mit destilliertem Wasser 3-5 cm befüllt, so

dass die Wurzeln „schwimmen“. Bei der Aufteilung der Wurzeln darauf achten, dass die einzelnen Wurzeln nicht übereinander liegen, da dies die Analyse verfälschen würde. Ebenfalls ist auf ein sauberes Auswaschen der Wurzeln zu achten. Das erwies sich im oberen Layer, wo eine starke Verwurzelung der Fall war als Herausforderung. Nachdem die Wurzeln ordnungsgemäß im Behältnis verteilt sind, kann der Scan und die Analyse durch das Programm durchgeführt werden, hierfür das Analysewerkzeug „Morphology Analysis“ auswählen. Abbildung 44 stellt die gescannten Wurzeln dar und in Abbildung 45 sind bereits die Wurzeln analysiert. Die daraus hervorgehenden Daten illustrieren die Wurzelmerkmale wie durchschnittlicher Wurzelradius, Gesamtwurzellänge oder die Wurzellänge bestimmter Wurzelradius und das Wurzelvolumen.

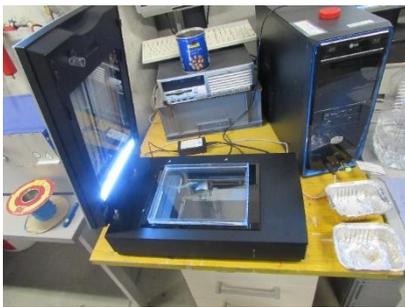


Abbildung 43: Wurzelscan mithilfe eines Flachbrettscanners

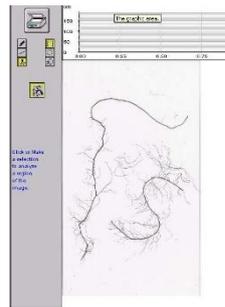


Abbildung 44: Wurzelscan mit WinRHIZO 2009

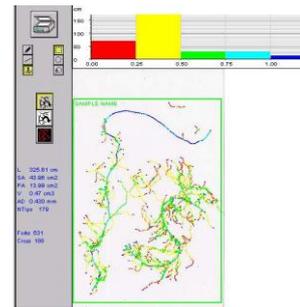


Abbildung 45: Wurzelscan und Analyse mit WinRHIZO 2009

## Wurzelvolumen/Wurzelmasse

Das Wurzelvolumen beschreibt den Raum der Wurzeln [cm<sup>3</sup>] zu dem verfügbaren Bodenvolumen [cm<sup>3</sup>].

### Root length density (RLD )

Die „root length density“ (RLD) gibt das Verhältnis von Wurzellänge [cm] zu dem verfügbaren Bodenvolumen [cm<sup>3</sup>] wieder. Root weight density (RWD) [mg/cm<sup>3</sup>].

### 4.3.3 Trockengewicht Wurzelmasse

Nach den Wurzelscans, kamen die Wurzeln in den Trockenschrank und wurden wieder bei 105°C auf die Gewichtskonstante getrocknet und nach dem Auskühlen gewogen. Damit konnte das Trockengewicht der Wurzelmasse ermittelt werden.

### **Root weight density (RWD)**

Die „root weight density“ (RWD) beschreibt das Verhältnis von Wurzelmasse [mg] zu dem verfügbaren Bodenvolumen [cm<sup>3</sup>] und ist ein Indikator für den Einfluss der Bodendichte auf das Wurzelwachstum und die Nährstoffaufnahme.

Wurzelmasse, experimentell am einfachsten fassbare Kenngröße zur Charakterisierung von Wurzeln und deren Verbreitung im Boden, meist als Wurzelrockenmasse angegeben.

Wurzelmasseverteilungen über die Wurzeltiefe hinweg, sind wichtige Parameter um die Ursachen von Trockenheitstoleranz umfassend bewerten zu können.

#### **4.3.4 Wurzel-Spross-Verhältnis**

Das Wurzel-Spross-Verhältnis ergibt sich aus dem Gewicht bzw. dem Volumen von ober- und unterirdischer Biomasse. Dieses Verhältnis zueinander beschreibt die Wuchskraft der kompletten Pflanze und ihre Fähigkeit, Böden entsprechend zu bewurzeln (FLORINETH, 2012).

Damit das Wurzel-Spross-Verhältnis berechnet werden kann, werden die Gewichtswerte der, im Trockenschrank auf die Massenkonstanz gebrachten, Sprosse und Wurzeln genommen und der Quotient aus dem Spross-Wurzelgewicht wird ermittelt. Daraus ergibt sich dann das Verhältnis (GINGON et al., 2004).

### **4.4 Bodenparameter**

Um weitere Aufschlüsse auf den Zusammenhang zwischen Wachstumsfaktor Boden und Wurzeln zu bekommen, wurden die zwei Substratmischungen im Labor folgenden Untersuchungen unterzogen:

- Korngrößenverteilung [%]
- Wasserspeicherkapazität [%]
- Wasserspeicherkapazität (gravimetrisch) [%]
- Porenvolumen [%]
- Organische Bestandteile [V<sub>gl</sub>]
- Scherfestigkeit [kN/m<sup>2</sup>]

Für die geotechnischen Untersuchungen wurden die Rückstellproben vor dem Einbau in die Versuchsanlage genommen, da diese noch keine Wurzeln von der ausgebrachten Vegetation beinhielten. Die Scherfestigkeit [kN/m<sup>2</sup>] wurde bei der Bohrkernentnahme im November am Versuchsfeld festgestellt.

#### 4.4.1 Siebanalyse und Sedimentation

Die Ermittlung der Korngrößenverteilung des verwendeten Materials erfolgt durch Siebanalyse. Dafür wird eine Teilprobe vom zu untersuchenden Bodenkörper genommen. Die Menge ist laut ÖNORM L 1061-2 (2002) vorgeschrieben und bezieht sich auf das Größtkorn des Materials (BEGEMANN & SCHIECHL, 1994). Die Siebung erfolgt mit Sieben nach DIN ISO 3310-1 (2001) in unterschiedlichen Maschenweiten.

Sowohl die Korngröße als auch die Kornverteilung sind ein Prinzip für die Einteilung und Benennung des mineralischen Anteils des Bodenkörpers. Der Anteil der jeweiligen Korngrößen wird in Prozent der Gesamttrockenmasse angegeben. Das Verfahren und die dafür notwendigen Geräte sind in der ÖNORM L 1061-1 (2002) und ÖNORM L 1061-2 (2002) festgelegt. Die Durchführung der Korngrößenverteilung ist in der ÖNORM B 4412 (1974) festgehalten. Korngrößen über 0,063 mm werden durch Siebung und Korngrößen unter 0,125 mm durch Sedimentation ermittelt (PRINZ & STRAUSS, 2011).

Bei Böden mit nur geringem oder ohne Feinanteil  $< 0,063$  mm wird die Trockensiebung angewendet.

Bei Böden mit höheren Ton- und Schluffanteilen wird nach dem Trocknen auf die Temperaturkonstante bei  $105^{\circ}\text{C}$  und anschließendem Wiegen die Probe aufgeschlämmt und durch ein Feinsieb mit der Maschenweite 0,063 mm gewaschen (Nasssiebung) (PRINZ & STRAUSS, 2011).

Die Korngrößenverteilung der Kornanteile unter 0,125 mm wird in der Bodenmechanik nach dem Aräometerverfahren festgestellt. Das Prinzip des Aräometers beruht darauf, dass verschieden große Körner in einer Aufschlämmung mit unterschiedlicher Geschwindigkeit absinken (=Sedimentation). Durch das Stock'sche Gesetz wird der Bezug zwischen Korngröße, Korngewicht und Sinkgeschwindigkeit angeführt. Durch diese Methode wird keine Trennung nach Korngrößen ermittelt, sondern nach Korndurchmessern. Die Dichte des Kornes wird als einheitlich angenommen. Zur Verhinderung von Koagulation (=Flockenbildung) bei der Sedimentation wird zur Probe ein Dispergierungsmittel (Natriumpyrophosphat) dazugegeben (PRINZ & STRAUSS, 2011).

Das lufttrockene Material über 0,5 mm wird gewogen und in einen Siebturm nach ÖNORM vorgeschriebenen Sieben mit vorgegebener Maschenweite gegeben. Die Siebgrößen 63 mm, 45 mm, 31,5 mm, 16 mm, 8 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm und 0,5 mm kommen zum Einsatz. Für die Siebung wird der Siebturm geschlossen und auf der Rüttelplatte 5 min bei Schwingungsintensität 5 und Amplitude von 0,4 gerüttelt. Anschließend werden die Rückstände der Siebe der Reihe nach wie folgt gewogen:

- 1 Das Sieb nehmen und über einem Blech händisch nachsieben. Alles, was auf das Blech fällt, ins nächst kleinere Sieb geben.

- 2 Den Rückstand im Sieb in ein Gefäß schütten, mit dem die Waage schon auf Tara gestellt wurde. Daraus wird das Gewicht pro Siebgröße gewonnen.
- 3 Den Vorgang mit allen Sieben wiederholen. Bei den grobmaschigeren Sieben wird eine Drahtbürste und bei den feinmaschigeren Sieben eine Haarbürste zu Hilfe genommen, um alle Teilchen aus dem Sieb zu bekommen.

Die folgenden Abbildungen veranschaulichen die Arbeitsschritte der Grobsiebung.



**Abbildung 46: Nasssiebung**  
(14.03.2017)



**Abbildung 47: Siebturm mit Trockenschrank**  
(15.03.2017)



**Abbildung 48: Siebturm auf Rüttelplatte**  
(15.03.2017)

Das lufttrockene Material für die Feinsiebung wird genommen und wieder geschwemmt, diesmal durch ein feinmaschigeres Sieb (0,063 mm). Der Rückstand wird für die Feinsiebung erneut getrocknet. Der getrocknete Rückstand der Teilprobe wird nun händisch durch die Siebe 0,25 mm, 0,125 mm und 0,063 mm gesiebt. Dafür einen feinen Pinsel verwenden, damit alle kleineren Teilchen durch das Sieb kommen.

Die vorbehandelte Suspension wird in einen normgerechten Zylinder (Durchmesser 6 cm, Marke bei 1000 cm<sup>3</sup>) gegeben mit destilliertem Wasser auf 1000 cm<sup>3</sup> Inhalt aufgefüllt und gut umgerührt. Das Ganze wird über Nacht gestehen gelassen, damit sich die Probe auflöst. In der ersten Versuchsphase wird die Suspension mit einem Handrührer durchmischt und bei dessen Entfernung sogleich die Stoppuhr eingeschaltet. Der Aräometer wird langsam in den Galszylinder mit der aufgerührten Suspension geben. Nach 0,5, 1 und 2 Minuten werden an der Skala des Aräometers Ablesungen durchgeführt. Dieser Vorgang wird dreimal wiederholt und die Ablesung gemittelt. In der darauffolgenden zweiten Versuchsphase wird nach neuerlichem Durchmischen der Suspension die Uhrzeit des Versuchsbeginns niedergeschrieben und der Aräometer zu den Ablesezeitpunkten

(zweckmäßig bei 5, 15, 45 min und 2, 4, 6, 24 h) in die Suspension gegeben. Ebenfalls ist es notwendig für die spätere Auswertung die Temperatur zu messen (IGT, 2010).

Abbildung 49 zeigt den Sedimentationsanalyse der zwei Substratvarianten. Die Abbildung 50 veranschaulicht skizzenhaft den Messzylinder mit Aräometer.



Abbildung 49: Aräometerversuch (25.03.2017)

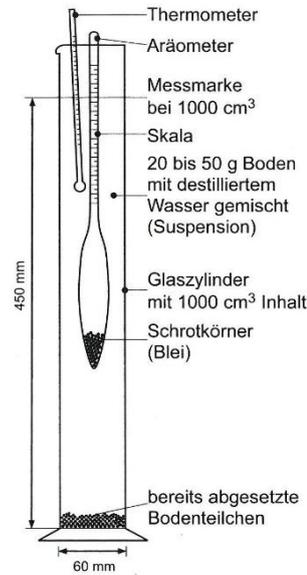


Abbildung 50: Messzylinder für Sedimentationsanalyse (PRINZ & STRAUSS, 2011)

### Darstellung und Beschreibung der Kornfraktionen

Die Verteilung der Kornfraktionen einer Substratmischung wird in der Regel als Körnungslinie oder Sieblinie dargestellt. Die Sieblinie wird als Summenkurve in einfach logarithmischem Maßstab (Logarithmus zur Basis 10) aufgetragen, womit auch die kleinsten Kornfraktionen ersichtlich werden. Die Neigung der Körnungslinie gibt an, wie Gleichkörnig oder Ungleichkörnig ein Boden ist. Daraus kann auch die Bodeneigenschaft gelesen werden, ob dieser vielleicht eine hohe Verdichtbarkeit aufweist oder nicht (PRINZ & STRAUSS, 2011).

Laut DIN EN ISO 14688-2 (2004) ist der zahlenmäßige Ausdruck für die Sieblinie die Ungleichförmigkeitszahl

$$C_u = d_{60}/d_{10}$$

und die Krümmungszahl  $C_c$

$$C_c = (d_{30})^2 / (d_{10} * d_{60})$$

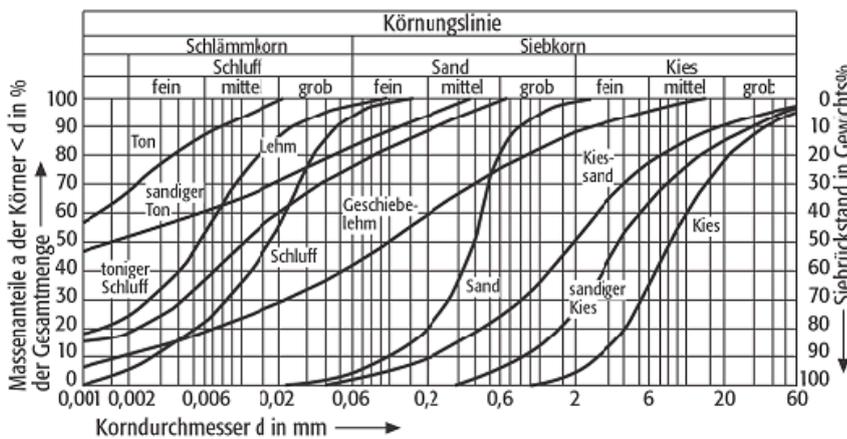
Die  $d_{60}$  und  $d_{10}$  sind die Korngrößen in mm, bei denen die Summenkurve die 60 % bzw. 10 % Linie schneidet (PRINZ & STRAUSS, 2011).

**Tabelle 12: Ungleichförmigkeitszahl nach PRINZ & STRAUSS (2011)**

Eng eingestuft = $C_u < 6$ (steil verlaufend)
mittel gestuft = $C_u > 6$ (mäßig steil verlaufend)
Weit gestuft = $C_u > 15$ (flach verlaufend)

Sieblinienkurven mit geringem Anstieg ( $C_u > 6$ ,  $C_c$  zwischen 1 und 3) stellen dar, dass der Bodenkörper ein relativ breites Korngrößenspektrum hat. Das bedeutet, dass sie viele verschiedene Kornfraktionen und diese in annähernd gleichen Anteilen enthält. Bei solchen Proben ist von einem weitgestuften Material die Rede. Sieblinienkurven mit abschnittsweise sehr steilem Anstieg zeigen, dass die Bodenprobe ein relativ schmales Korngrößenspektrum aufweist - diese enthält nur wenige und ähnliche Kornfraktionen und diese Fraktionen sind stark vorherrschend. In solchen Fällen wird von einem enggestuften Material gesprochen (siehe Tabelle 12) (PRINZ & STRAUSS, 2011).

Die folgende Abbildung stellen die Sieblinien typischer Bodenarten dar.



**Abbildung 51: Beispiele von Körnungslinien typischer Bodenarten (PÖSCHL, 2017)**

#### 4.4.2 Porenvolumen

Aufgrund der Kornstruktur und Aggregate enthalten Böden immer ein gewisses Porenvolumen. Dies kann sich entweder aufs Gesamtvolumen beziehen oder auf die porenfreie Festmasse, was als Porenanteil ( $n$ ) oder Porenzahl ( $e$ ) benannt wird (PRINZ & STRAUSS, 2011). Der mit Wasser und Luft gefüllte Teil des Bodenvolumens, in dem alle Wasserbewegungs- und Belüftungsvorgänge ablaufen, wird als Porenraum oder Porenvolumen bezeichnet. Das Porenvolumen kann sowohl durch Berechnung aus der Trockenrohichte als auch durch direkte Messung ermittelt werden (VELTY, 2017). Das Porenvolumen (PV) wird in der Maßeinheit [% , Vol.-% oder % v/v] angegeben. Ermittelt wird das Porenvolumen durch Trockenmasse des Probekörpers und der Masse des wassergesättigten Probekörpers.

Die Tabelle 13 macht die Einteilung der Bodenhauptgruppen nach dem Porenvolumen ersichtlich.

**Tabelle 13: Bodengruppen mit Porenvolumen (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2010)**

Bodenhauptgruppe	Porenvolumen (PV) [%]
Ton	65...35
Lehm	55...30
Schluff	56...38
Sand	56...36

Zur Gewinnung der Daten werden drei Zylinder zuerst mit getrocknetem Filterkies 5/8er mit einer Mächtigkeit von 25 cm aufgefüllt, dann werden 30 cm getrocknetes Substrat und im Anschluss erneut Filterkies 5 cm mächtig in die Säulen gefüllt (siehe Abbildung 53). Zwischen dem Filterkies und dem Substrat werden jeweils Netze mit geringerer Maschenweite eingelegt, damit sich später beim Wasseranstau die Schichten geringstmöglich vermischen. Die gefüllten Zylinder ( $\varnothing$  10 cm) werden bis zur Überstaugrenze von unten langsam mit Wasser gefüllt (siehe Abbildung 54). Die Wassermenge notieren und das Substrat wird nun mindestens vier Stunden mit dem Wasser sättigen gelassen. Nachdem die Proben mit Wasser voll gesättigt sind, wird erneut der Überstau gemessen. Im Anschluss kann aus dem Volumen der Proben das Porenvolumen errechnet werden.

#### 4.4.3 Wasserspeicherkapazität

Die Wasserspeicherkapazität ist im Wesentlichen von der Dichte ("bulk density"), der Korngrößenverteilung, welche den Porenraum zusammen bestimmen und dem Gehalt an organischer Substanz abhängig. Die Menge an Wasser, die der Bodenkörper gegen die Schwerkraft halten kann, nennt man Feldkapazität. Dieser Wert entspricht der Wasserspeicherfähigkeit des Bodens. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Pflanzen nur einen Teil der Wassermenge im Boden nutzen können, da ein gewisser Prozentsatz des Wassers sehr stark an den Boden gebunden ist, und damit für Pflanzen nicht verfügbar ist. Zieht man diesen Anteil („Totwasser“) von der Feldkapazität ab, erhält man den Anteil pflanzenverfügbares Wasser des Wasserspeichers - die nutzbare Feldkapazität (GARTNER, 2017)

Für die Überprüfung der Wasserspeicherkapazität der Substratmischungen wurden Untersuchungen in Anlehnung an die ÖNORM B 2506-3:2016-01 durchgeführt. Für den Prüfvorgang wurde das Substrat in einen Zylinder mit 100 mm Durchmesser und 80 mm Höhe einschichtig eingebaut und ober- und unterhalb wurde eine Drainschicht verwendet (siehe Abbildung 51-53). Alle paar Zentimeter Substrateinbau wurde dieses mit dem Proctor-Hammer mit 4,5 kg verdichtet. Der gesättigte Substratkörper wurde gemischt und in den Trockenschrank gegeben, um das Substrat auf die Massenkonstanz zu bringen. Nach der Trocknung der Proben erfolgt die Feststellung der Trockenmasse. Laut ÖNORM B 2506-3:2016-01 sind pro Substrat drei Prüfungen durchzuführen.

Der Wassergehalt  $[W_k]$  ergibt sich als Quotient aus der Masse des im Boden befindlichen Wassers, welches bei  $105^\circ\text{C}$  verdampft, und der Trockenmasse. Die Wasserkapazität  $W_k$  in Prozent des Volumens errechnet sich wie folgt (ÖNORM B 2606-1, 2009:21):

$$W_k = \frac{(m_w - m_d) \times 100}{V}$$

$m_w$  Nettomasse der feuchten Probe in g

$m_d$  Nettomasse der trockenen Probe in g

$V$  Volumen der Probe in  $\text{cm}^3$

Die folgenden Abbildungen zeigen die Proctorsäulen und den Einbau sowie den Anstau des Bodenkörpers.



**Abbildung 52:** Säulen zur Messung der Wasserspeicherkapazität und des Porenvolumens



**Abbildung 53:** Schichtweiser Einbau des Substrates und Drainschicht (KOS, 2017)



**Abbildung 54:** Säulenversuch mit Wasser aufgefüllt (KOS, 2016)

Nach mindestens vier Stunden Anstauzeit der Bodenproben, wird das Verbindungsstück zwischen Anstauschlauch und dem Zylinder entfernt. Das abtropfende Wasser wird in einem darunter stehenden Kübel aufgefangen. Genau vier Stunden wird das Wasser im Kübel gesammelt. Nach diesen vier Stunden wird das im Kübel befindliche Wasser gewogen. Davon werden das Überstauwasser, die aufgenommene Wassermenge des Filterkieses und das Porenvolumen des Substrates subtrahiert, woraus sich die Wasserspeicherfähigkeit des Substratkörpers ergibt.

Zur Ermittlung der Wasserspeicherkapazität (gravimetrisch) wird das gesamte Substrat nach der vierstündigen Anstauphase und Abtropfphase aus dem Zylinder genommen und in einem Kübel durchmischt. Dabei ist darauf achten, dass der Filterkies getrennt wird. Von drei hitzebeständigen Schalen das Volumen und Gewicht ermitteln und notieren (am besten auf der Schale). Die Schüsseln bis zur Oberkante mit der durchmischten Probe auffüllen und wägen. Da die Bodenproben relativ

feucht sind, müssen diese mindestens 3 Tage im Trockenschrank bei 105°C auf Massenkonzanz getrocknet werden. Anschließend werden die Proben aus dem Trockenschrank entnommen, abgekühlt und erneut gewogen. Die Differenz zwischen wassergesättigtem und trockenem Substrat ergibt schließlich die gravimetrische Wasserspeicherkapazität in [%].

#### 4.4.4 Organische Bestandteile

Der Gehalt an organischen Bodenbestandteilen kann durch den Massenverlust bei Verglühung im Muffelofen in Bezug auf die Trockenmasse bestimmt werden. Laut DIN 18 128 (2002) wird das Glühen im Muffelofen bei einer Temperatur von 550°C bis zur Massenkonzanz der Probe empfohlen. Dabei oxidieren im Temperaturbereich von 200 bis 500°C die organischen Bestandteile und entweichen als Gas (CO<sub>2</sub>). Ab 400°C wird Kristallwasser der Tonminerale freigesetzt (PRINZ & STRAUSS, 2011).

Die DIN 18 128 (2002) schreibt auch die Mindest-Probenmenge vor, die in folgender Tabelle aufgelistet sind:

**Tabelle 14: Mindest-Probenmenge bei Glühverlustbestimmung (nach DIN 18128, 2002)**

Bodenart	Mindest-Probenmenge [g]
Organische Böden, feinkörnige Böden	15
Sande	30
Kiesiger Sand	200
Kies	1000

Für die Durchführung zur Ermittlung der CO<sub>2</sub> Masse wurde nach dem Mischen der Substrate am Feld, jeweils eine Rückstellprobe mit ungefährem Umfang von 10 Liter genommen. Zur Ermittlung der organischen Bestandteile im Boden werden im Labor Teile (etwa 150 g) beider Rückstellproben entnommen, in eine hitzebeständige Schale gegeben und in einen Trockenschrank bei einer Temperatur von 105°C bis zur Massenkonzanz gegeben. Dies dauert etwa zwei Tage, je nach Feuchtegehalt des Bodens. Anschließend werden, ebenfalls in eine hitzebeständige Schale, zwischen 30 und 50 g der Substrattrockenmasse eingewogen und in den Muffelofen (siehe Abbildung 55) gegeben, der bereits auf die gewünschte Temperatur (550°C) vorgeheizt hat. Abhängig von der Probenmasse verglühen die Substratproben in etwa 180 bis 240 Minuten im Muffelofen. Wenn die Probe eine weiß-gräuliche oder rötliche Färbung annimmt, ist der Verbrennungsprozess beendet (siehe Abbildung 57). Zur Abkühlung werden die Proben, zur Vermeidung von Wasseraufnahme aus der Luft, im Exsikkator (siehe Abbildung 56) gelagert und im abgekühlten Zustand wieder abgewogen. Um eine Vergleichbarkeit zu erhalten wird der Versuch pro Substratvariante dreimal wiederholt. Der Glühverlust des jeweils untersuchten Bodens ergibt sich dann als Mittelwert der drei Einzelergebnisse.

Aus der Differenz des Gewichts der getrockneten und verglühten Substanz kann der Anteil des gespeicherten Kohlenstoffs ermittelt werden. Aus der Trockenmasse  $m_d$ , der Bodenprobe vor dem Glühen, und der Masse  $m_{gl}$ , der Bodenprobe nach dem Glühen, (Massenermittlung in g) ergibt sich der Glühverlust durch folgende Formel:

$$V_{gl} = \frac{m_d - m_{gl}}{m_d}$$

$m_d$  = Trockenmasse vor dem Glühen (g)

$m_{gl}$  = Masse nach dem Glühen (g)

Mit dem Glühverlust (g) und der Einwaage (g) lässt sich das % Glühverlust ermitteln.

$$\% \text{ Glühverlust} = \frac{\text{Glühverlust (g)}}{\text{Einwaage (g)}} \cdot 100$$

Laut EN ISO 14 688 -2:2004 kann für den Gehalt an organischer Substanz im Boden folgende Einteilung angewendet werden (siehe Tabelle 15).

**Tabelle 15: Bodeneinteilung nach % Anteil an organischer Substanz (EN ISO 14 688 -2:2004)**

Bodeneinteilung	% Anteil org. Substanz
schwach organisch	2-6 %
mittel organisch	>6-20 %
Stark organisch	> 20 %



Abbildung 55: Muffelofen



Abbildung 56: Exsikkator



Abbildung 57: Bodenproben (li) nach dem Verglühen (re) vorm Verglühen

#### 4.4.5 Scherfestigkeit

Zur Bestimmung der Scherfestigkeit [kN/m<sup>2</sup>] wurden mittels Flügelsonde Feldversuche durchgeführt. Bei dem Messgerät handelte es sich um den Typ „Leichter Scherfestigkeitsmesser FL 1407“ der Firma Wille Geotechnik – APS Antriebs-, Prüf- und Steuertechnik GmbH. Die Untersuchung wurde mit einem Flügel der Größe 20 x 40 mm (Breite x Länge) mittels Torsionsfelder in unterschiedlichen Tiefen vorgenommen. Die Sondenspitze wird senkrecht in den Boden gedrückt oder mittels Gummihammer

in die gewünschte Tiefe eingeschlagen. Die Sondenspitze besteht aus vier Flügeln, welche jeweils 90° zueinander versetzt sind, und bei gleichmäßig, langsamer Drehung des Griffes ein Abscheren des Bodens der jeweiligen Bodensäule auslösen (PREGL, 1999b). Unterhalb des Griffes, welcher mit der Torsionsfeder verbunden ist, liest man nach dem Durchdrehen der Sonde den Wert an einer 20 kPa-Skala ab, welcher die Scherkraft anzeigt. Der Bereich in dem die Flügelsonde misst, liegt zwischen 0 und 26 t/m<sup>2</sup>. Die Genauigkeit der Messungen befindet sich im Bereich von 10 % der Ablesung. Die Skaleneinteilung am Schiebering beträgt 0 bis 13, welcher mit dem Faktor 10 multipliziert wird. Daraus erhält man die Einheit kN/m<sup>2</sup> (WILLE GEOTECHNIK, 2012).

Die folgende Abbildung stellt das Messgerät die Flügelsonde dar:



**Abbildung 58:** Flügelsonde zur Bestimmung der Scherfestigkeit

Insgesamt wurden je Versuchsfläche fünf Messungen in allen Tiefen (0-4 cm, 10-14 cm, 20-24 cm und 30-34 cm) vorgenommen. Um vergleichbare Werte zu erhalten, wurden die Untersuchungen der Tiefen direkt nebeneinander durchgeführt. Damit eine Exaktheit der Messungen gewährleistet werden konnte, wurde nach jeder Sondierung der Flügel gereinigt und der Schiebering in der Skala auf „Null“ gestellt.

## 5 Ergebnisse und Interpretation

In diesem Abschnitt sind die Ergebnisse der Vegetationserhebungen bzw. der weiterführenden Bodenuntersuchungen dargestellt und erläutert. Die Struktur der Ergebnisdarstellung, getrennt nach den beschriebenen Untersuchungsparametern, orientiert sich hierbei am Aufbau von Kapitel 4.

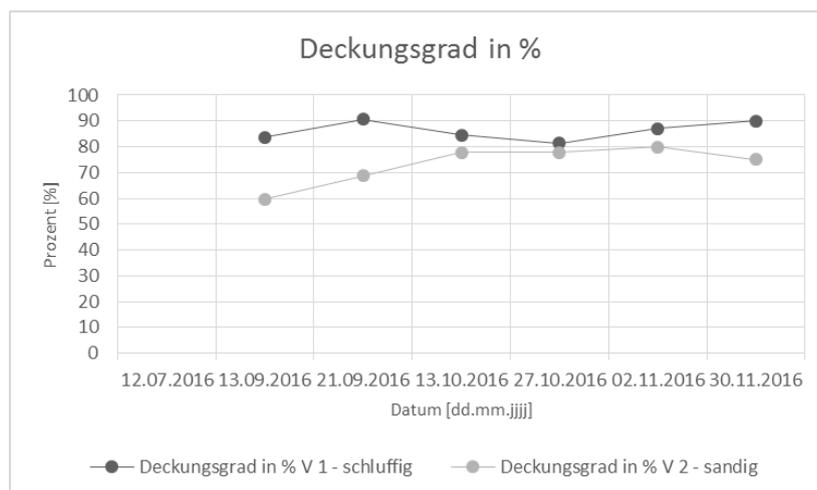
Die beiden Versuchsvarianten 1 und 2 wurden nach Untersuchungen der Sieblinien, welche im Kapitel 5.3.1 „Korngrößenverteilung und Bodenart“ näher beschrieben sind, mit der zusätzlichen Abkürzung „schluffig“ und „sandig“ ergänzt, um diese besser voneinander unterscheiden zu können.

### 5.1 Oberirdische Biomasse

#### 5.1.1 Deckungsgrad

Der Deckungsgrad der Vegetation wurde an den Versuchsflächen an sechs Zeitpunkten ermittelt (13.09.2016, 21.09.2016, 13.10.2016, 27.10.2016, 02.11.2016, 30.11.2016). Mittels Fotodokumentation, digitaler und visueller Deckungsgradbestimmung wurden die Daten aufgenommen und analysiert. Die folgende Grafik gibt einen Überblick über den Verlauf der Vegetationsbedeckung der beiden Systeme (V 1 - schluffig und V 2 - sandig), die mittels Trockensaats aufgebracht wurde:

Diagramm 1: Deckungsgradanalyse der Versuchsvarianten (V 1 - schluffig und V 2 - sandig)



Die Deckungsdaten beider Versuchsvarianten weisen unterschiedliche Verläufe auf. Variante 1 - sandig zeigt Ende September einen Anstieg des Deckungsgrades auf 91 %, welcher Ende Oktober auf 81 % abnimmt und Ende November wieder auf einen Wert von 90 % zunimmt. Beim Datenverlauf von Variante 2 - schluffig ist ersichtlich, dass zu Beginn der Aufnahme der Deckungsgrad bei 60 % liegt und bis Mitte Oktober ein stetiger Anstieg bis zu 78 % bemerkbar ist. Bis Ende November nehmen die Deckungswerte nur gering ab, die Vegetationsdeckung beträgt 75 %. Die Daten zeigen, dass der

Deckungsgrad der Versuchsvariante 1 - schluffig bei allen Aufnahmezeitpunkten höher ist, als bei Versuchsvariante 2 - sandig. Zum Zeitpunkt vom 27.10.2016 sind die Unterschiede beider Varianten mit 3 % am geringsten.

Zu den ersten vier Zeitpunkten fand die Vegetationsbedeckung mittels digitaler Bestimmung durch ein Bildbearbeitungsprogramm und zu den letzten zwei Zeitpunkten erfolgte die Analyse mittels visueller Deckungsschätzung. Dies hatte den Grund, da die Analyse ab November keine brauchbaren Ergebnisse lieferten und die in die Vegetationsruhe zurückziehenden Pflanzen bei der Analyse im Bildbearbeitungsprogramm nicht in das eingestellte Farbspektrum fielen und somit nicht zum Deckungsgrad gezählt wurden. Demnach ist diese Methode der Deckungsgradermittlung nur während der Vegetationsphase sinnvoll. Deshalb wurden die letzten zwei Werte visuell analysiert. Die Aufnahmen nach der ersten Ansaat erwiesen sich aufgrund der fehlenden regelmäßigen Bewässerung als schwierig. Auch die Ansaatmethode „Trockensaat“ ist an diesem Standort durch das erhöhte Windaufkommen problematisch, da Saatgut leicht verweht werden kann. Aufgrund dieser Schwierigkeiten fand die Datenerhebung erst nach der zweiten Ansaat statt, wo in Teilbereichen der Felder bereits Vegetation von der ersten Saat gekeimt war. Dadurch ist der Deckungsgrad bei der ersten Datenangabe bereits sehr hoch. Abbildung 59 zeigt die Problematik der fehlenden bzw. unregelmäßigen Bewässerung in der Keimphase – es kommt zu starken Ausfällen. Trotzdem ist bei dieser Aufnahme bereits zu erkennen, dass die Versuchsvariante 1 - schluffig einen höheren Deckungsgrad aufweist als Variante 2 - sandig. Es gilt anzumerken, dass beim Einbau der Substratmischungen beide Versuchsflächen die obersten zwei Zentimeter mit derselben Substratmischung abgedeckt wurden. Damit sollten gleiche Keimbedingungen für das Saatgut in beiden Varianten sichergestellt werden. Die Aufnahme vom 13.09.2016 macht einen flächendeckenderen Bewuchs sichtbar, ab diesem Zeitpunkt begannen die Fotoaufnahmen der Deckungsgradermittlung (siehe Abbildung 60).



**Abbildung 59: Versuchsfeld nach der ersten Aussaat und ohne regelmäßiger Bewässerung (25.08.2016)**

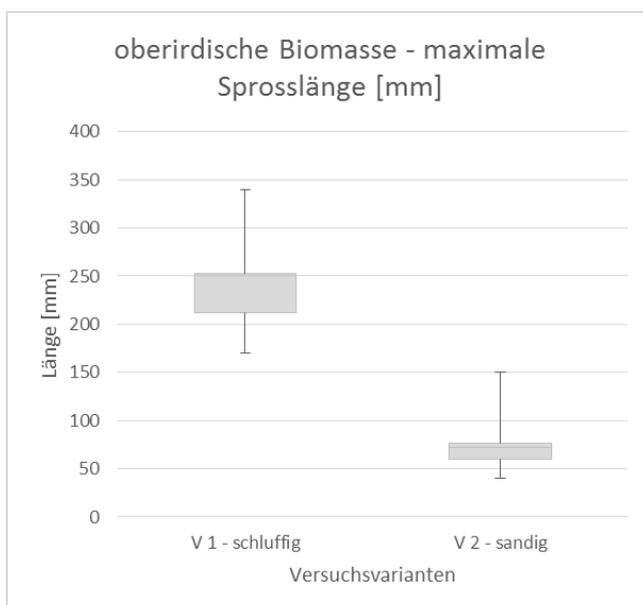


**Abbildung 60: Erste Aufnahme zur Deckungsgradermittlung mit Rechteckregner im vorderen Bereich des Bildes (13.09.2016)**

### 5.1.2 Maximale Sprosslänge

Die maximalen Sprosslängen wurden zum Zeitpunkt der Bodenprobenentnahmen am 30.11.2016 jeweils im Bereich sämtlicher Bodenproben gemessen. Innerhalb des Bohrkernbereichs wurde die Pflanze mit dem längsten Spross ermittelt. Zwischen der Ansaat am 15.07.2017 und der Entnahme der Sprossproben fanden keinerlei Schnittmaßnahmen statt. Die nachstehende Grafik zeigt die maximale Sprosslänge mittels Boxplot-Diagramm und stellt die Ergebnisse der zwei Versuchsvarianten gegenüber. Dabei gibt der untere Whisker den kleinsten Datenwert und der obere Whisker den größten Datenwert an. Die graue Box entspricht dem Bereich, in dem die mittleren 50 % der Daten liegen und der Strich innerhalb der Box gibt den Median an.

**Diagramm 2: Maximale Sprosslänge der Versuchsaufbauten (V 1 - schluffig und V 2 - sandig)**



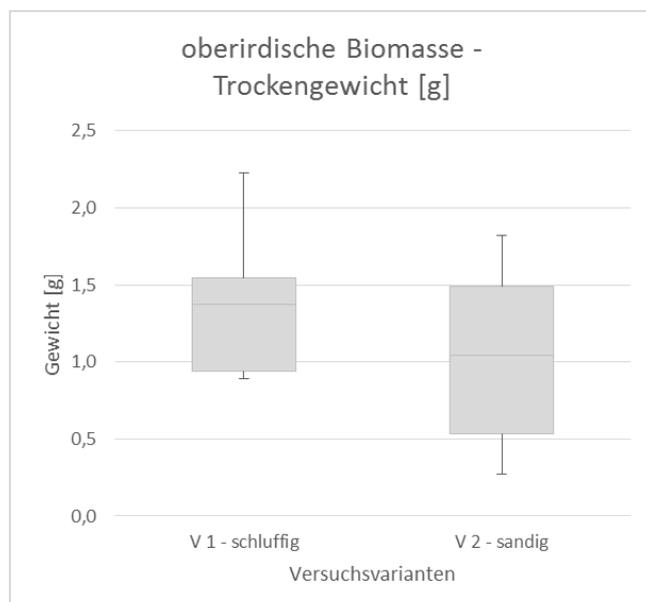
Die Ergebnisse der Variante 1 - schluffig und Variante 2 - sandig zeigen deutliche Unterschiede in der oberirdischen Biomasseproduktion. Der Median der maximalen Sprosslänge vom Versuchsaufbau 1 - schluffig beträgt 250 mm. Die geringste maximale Sprosslänge liegt bei 170 mm und die höchste bei 340 mm. Demgegenüber steht der Zentralwert der Versuchsvariante 2 - sandig, welcher 73 mm ergibt. Der Minimumwert der maximalen Sprosslänge beträgt 40 mm und der Maximumwert 150 mm.

Die Messungen beider Systeme zeigen große Unterschiede in der maximalen Sprosslänge. Das Mittel der maximalen Sprosslänge von Variante 1 - schluffig liegt deutlich über den von Varianten 2 - sandig, und zwar um 177 mm. Sowohl der maximale Wert von Variante 1 als auch der minimale Wert von Variante 2 weisen keine Überschneidung auf, es liegen 20 mm dazwischen. Aus dem Ergebnis der maximalen Sprosslänge lässt sich deuten, dass der organische Anteil im Boden und der Körnungsanteil der Boden-Fractionen einen starken Einfluss auf die Entwicklung und Wüchsigkeit der Sprosse nehmen.

### 5.1.3 Trockengewicht

Das Trockengewicht der oberirdischen Biomasse wurde je Bodenprobe auf einer Fläche von 19,63 cm<sup>2</sup> ermittelt. Dabei wurde auf der Oberfläche der Bohrkerns die gesamte Vegetation entnommen und das Gewicht der oberirdischen Biomasse bis zum Erreichen der Gewichtskonstante nach der Trocknung gemessen. Nachfolgend ist das Trockengewicht der oberirdischen Biomasse der zwei Versuchsvarianten (V 1 - schluffig und V 2 - sandig) anhand eines Boxplot-Diagrammes dargestellt. Die oberirdische Trockenbiomasse wird dabei in Gramm [g] angegeben.

**Diagramm 3: Trockengewicht – oberirdische Biomasse der Versuchsaufbauten (V 1 - schluffig und V 2 - sandig)**



Die Variante 1 - schluffig zeigt bei der Erhebung der Biomasse die höchsten Werte beider Systemaufbauten. Die oberirdische Biomasse liegt um 0,34 g über den Werten der Vergleichsfläche. Der Median der Variante 1 - schluffig gibt einem Wert von 1,38 g an. Der Minimumwert beläuft sich auf ein Trockenmassegewicht von 0,89 g und der Maximumwert auf 2,23 g. Der Zahlenwert des Trockengewichtes der Variante 2 - sandig liegt bei 1,04 g. Der geringste Wert beträgt 0,27 g und der höchste 1,82 g.

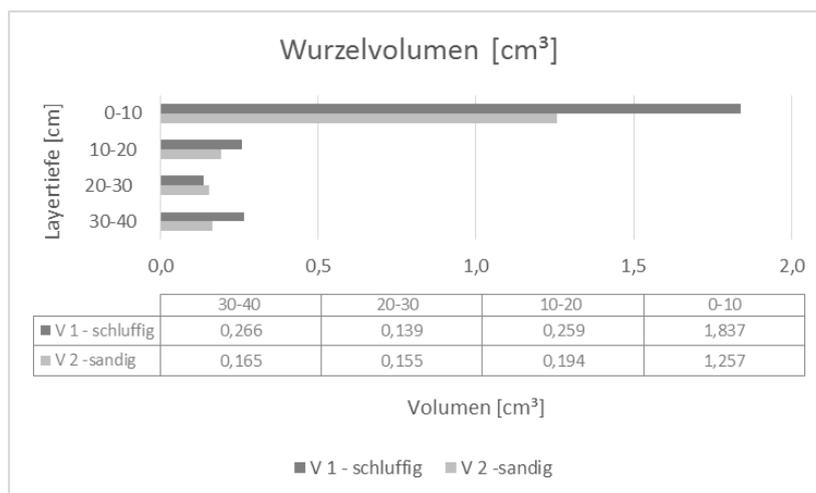
Die dargestellten Ergebnisse verdeutlichen, dass das Trockengewicht der Vegetation bei Variante 1 - schluffig höher ist, als das von Variante 2 - sandig. Nach den Ergebnissen der maximalen Sprosslänge war dies zu vermuten, da Variante 1 ebenfalls einen höheren Durchschnittswert erzielte, als jener der Vergleichsfläche 2. Jedoch ist anzumerken, dass der Unterschied beider Varianten im Gegensatz zu den Ergebnissen der maximalen Sprosslänge verhältnismäßig geringer ist als bei den Ergebnissen des Trockengewichts der Sprosse.

## 5.2 Unterirdische Biomasse

### 5.2.1 Wurzelvolumen

Für die Analyse der Wurzeldata wurden mithilfe eines Bodenbohrers pro Versuchsfeld acht Zufallsstichproben gezogen. Das Wurzelvolumen wurde in vier unterschiedlichen Bodentiefen ermittelt und mittels Wurzelscans und WinRHIZO analysiert und ausgewertet. Das folgende Diagramm zeigt das errechnete Wurzelvolumen der Versuchsvarianten (V 1 - schluffig und V 2 - sandig) als Mittelwert aus acht Bohrkernen und in vier Tiefen gegenübergestellt (0-10, 10-20, 20-30 und 30-40 cm). Das Volumen eines Bohrkerns beträgt  $196,35 \text{ cm}^3$ .

Diagramm 4: Wurzelvolumen der Versuchsvarianten (V 1 - schluffig und V 2 - sandig)



Das Wurzelvolumen von Versuchsvariante 1 - schluffig, welches im oberen Bereich des Bodenkörpers gemessen wurde, liegt bei  $1,837 \text{ cm}^3$ . In den darunterliegenden Schichten nimmt dieses erheblich ab. Zwischen 10 und 20 cm beträgt das Wurzelvolumen  $0,259 \text{ cm}^3$ . Die Schichtung im Bereich von 20-30 cm beinhaltet ein Wurzelvolumen von  $0,139 \text{ cm}^3$  und in einer Tiefe zwischen 30 und 40 cm beträgt der Wert  $0,266 \text{ cm}^3$ . Diesen Werten liegen die Ergebnisse vom Substratkörper 2 - sandig gegenüber. Im Layer zwischen 0 und 10 cm beträgt das Wurzelvolumen  $1,257 \text{ cm}^3$ , das wie bei Variante 1 - schluffig in die tieferen Bodenschichten stark abnimmt. Zwischen 10 und 20 cm beschränkt sich das Wurzelvolumen auf  $0,194 \text{ cm}^3$ , im Layer 20-30 cm und 30-40 cm ist dieses ähnlich groß mit  $0,155$  bzw.  $0,165 \text{ cm}^3$ . Die Statistiken geben an, dass im Bereich unmittelbar unter der Bodenoberfläche (bis 10 cm Tiefe) knapp unter 1 % des Probenvolumens die Wurzelmasse beinhaltet. In den tieferen Layern liegt die Prozentzahl bei unter 0,1 %. Es ist ersichtlich, dass V 1 - schluffig in der Bodenschicht zwischen 0-10 cm ein höheres Wurzelvolumen aufweist als die Variante 2 - sandig, und zwar um  $0,58 \text{ cm}^3$ . V 1 - schluffig hat ebenfalls in der Tiefe von 10-20 cm ein höheres Wurzelvolumen, dabei beträgt die Differenz  $0,065 \text{ cm}^3$  zur V 2 - sandig. In der Schichtung 20-30 cm weist die Versuchsvariante 2 ein

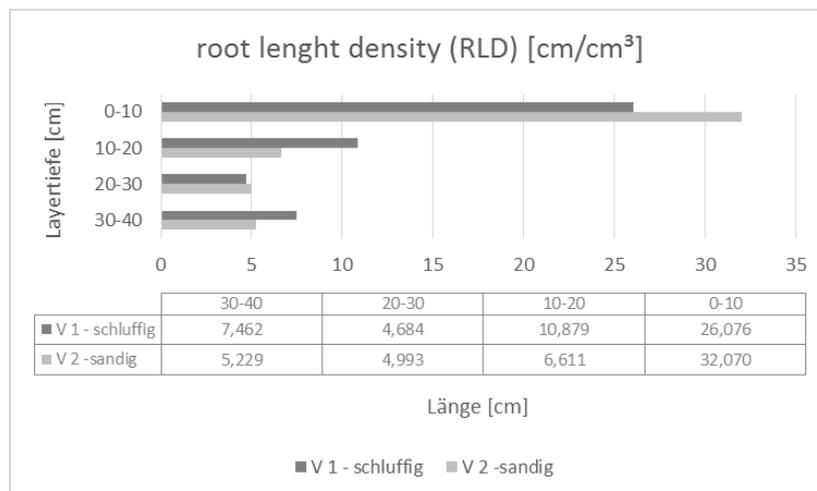
größeres Wurzelvolumen auf. In der tiefsten gemessenen Schichtung ist ersichtlich, dass die Variante 1 ein höheres Wurzelvolumen aufweist als die Variante 2.

Gemessen am Gesamtvolumen der Bodenproben und Verglichen mit dem Anteil an Wurzelvolumen ist die Durchwurzelungsintensität der Gräser-Kräuter-Mischung relativ niedrig und liegt beim Bodenkörper 1 - schluffig zwischen 0,07-0,94 %. Bei der Substratvariante 2 - sandig liegt die Durchwurzelungsintensität zwischen 0,08 und 0,64 %. Beim Auswaschen der Bohrkern wurde bei allen Varianten ein feines Wurzelgeflecht ersichtlich, bestehend aus feinsten Wurzeln von Gräsern und Kräutern der Saatgutmischung. Die Ergebnisse der folgenden Methode, der root length density geben diese visuellen Erkenntnisse wieder.

### 5.2.2 Root length density RLD

Die Bestimmung der root length density RLD wurde in vier Bodentiefen (0-10, 10-20, 20-30 und 30-40 cm) angewendet und mittels Wurzelscans und WinRHIZO aufbereitet. Im folgendem Diagramm ist die root length density RLD der Versuchsvarianten (V 1 - schluffig und V 2 - sandig) als Mittelwert aus jeweils acht Bohrkernen gegenübergestellt. Die root length density RLD wird in  $\text{cm}/\text{cm}^3$  angegeben.

Diagramm 5: Root length density (RLD) der Versuchsaufbauten (V 1 - schluffig und V 2 - sandig)



Der Bodenkörper mit der prozentmäßig höheren Zahl an Sand-Fractionen zeigt die größte Wurzellänge pro Bodenvolumen im Bereich unmittelbar unter der Bodenoberfläche (bis 10 cm Tiefe) an, der Wert beträgt 32 cm. Dabei weist die Versuchsvariante 1 - schluffig im Layer 1 zwischen 0-10 cm eine Wurzellänge von 26,08 cm pro Bodenvolumen auf. In die unteren Layer nimmt die Länge ab. Bei 10-20 cm Tiefe ergibt die Länge 10,9 cm, im darunterliegenden Layer 4,7 cm und im Bereich zwischen 30-40 cm beträgt die RLD 7,5 cm pro  $\text{cm}^3$ . Dem gegenüber veranschaulicht die Versuchsvariante 2 - schluffig in der oberen Bodenschicht zwischen 0-10 cm eine Wurzellänge von 32 cm pro  $\text{cm}^3$ . Die darunter befindliche Schicht (10-20 cm) weist eine Wurzellänge von 6,6 cm auf. Eine Wurzellänge von

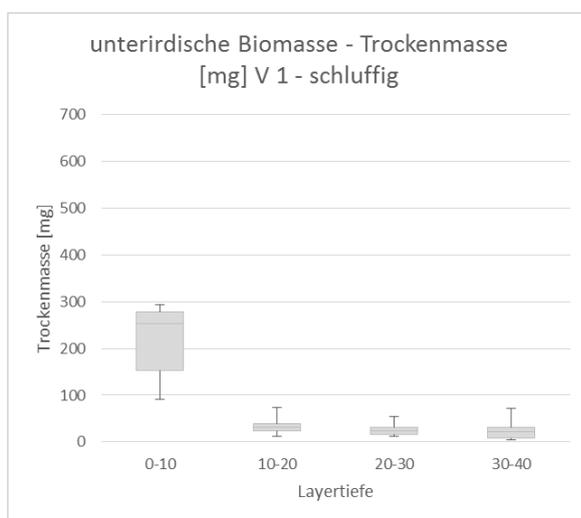
4,9 cm konnte in Layertiefe zwischen 20 und 30 cm festgestellt werden. Die am tiefsten gelegene Messschicht hat eine Wurzellänge von 5,2 cm pro cm<sup>3</sup>.

Die Ergebnisse zeigen, dass Versuchsvariante 2 - sandig im obersten Layer eine um 6 cm höhere RLD aufweist als die Variante 1 - schluffig. Dies lässt vermuten, dass in Variante 2 ein höherer Feinwurzelanteil vorhanden ist, im Gegensatz zu Variante 1. Im Bereich zwischen 10 und 20 cm weist Variante 1 eine RLD von 10,9 cm auf und hat somit um 4,9 cm eine höhere Wurzellänge als Variante 2. Zwischen 20 und 30 cm liegt die Differenz bei 0,3 cm, wobei Variante 2 sandig den höheren Wert aufweist. In der tiefsten gemessenen Layerschicht zeigt Variante 1 - schluffig eine Wurzellänge von 7,5 cm pro cm<sup>3</sup> und somit einen höheren Wert als Variante 2 - sandig auf.

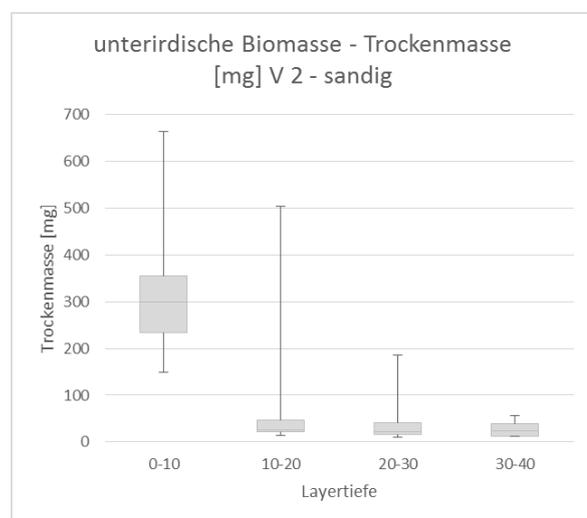
### 5.2.3 Trockengewicht

Das Trockengewicht der unterirdischen Biomasse wurde je Substratkörper auf einer Fläche von 19,63 cm<sup>2</sup> ermittelt, dabei wurden auf der Versuchsfläche acht Bohrkerne entnommen und in 10 cm Layer unterteilt. Durch Auswaschen der Bohrkerne und Trocknung auf die Gewichtskonstante konnte in vier Abschnitten die Wurzelmasse bestimmt werden. Die folgenden Diagramme zeigen den Median (Strich in der graugefärbten Box) der ermittelten Wurzel trockenmasse der vier Abschnitte, als auch den minimalen und maximalen Wert. Die unterirdische Trockenbiomasse wird in Milligramm [mg] angegeben.

**Diagramm 6: Trockengewicht – unterirdische Biomasse des Versuchsaufbaues V 1 - schluffig**



**Diagramm 7: Trockengewicht – unterirdische Biomasse des Versuchsaufbaues V 2 - sandig**



Beim Bodenkörper mit hohen Schluff-Fractionen beträgt der Median im Bereich unmittelbar unter der Bodenoberfläche (bis 10 cm Tiefe) 254 mg an Wurzelmasse. Die Wurzelmasse nimmt in die tiefer gelegenen Layer stark ab. Der Median der Trockenbiomasse beträgt zwischen 10-20 cm 32 mg, in

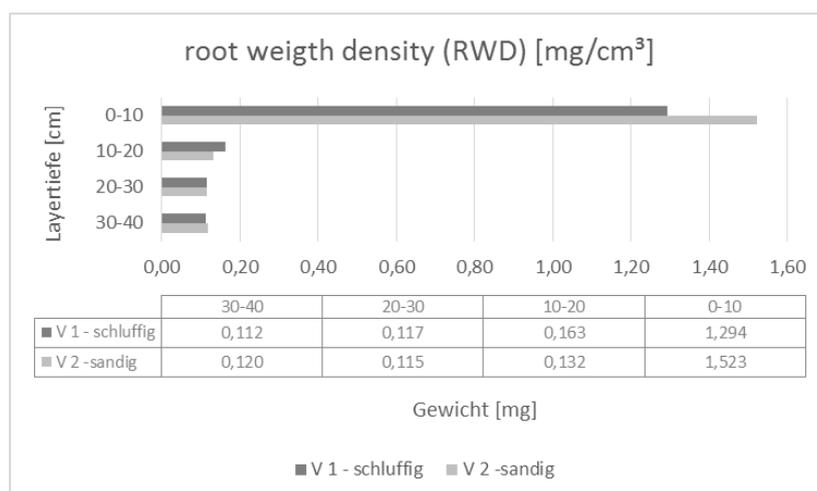
Tiefen von 20-30 cm macht die Wurzelmasse 23 mg aus und in der am tiefsten gemessenen Schichtung zwischen 30-40 cm beläuft sich die unterirdische Biomasse auf 22 mg. Der Zentralwert der unterirdischen Biomasse im obersten Layer bis 10 cm Tiefe beträgt 299 mg. In die weiteren Layertiefen nimmt diese ab. Im Bereich zwischen 10-20 cm weist die Wurzelmasse ein Gewicht von 26 mg auf. In den Tiefen zwischen 20 und 30 cm wird ein Wert von 22,5 mg gemessen und in der Schicht zwischen 30 und 40 cm beträgt Wurzelrockenmasse 23,5 mg.

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse zeigt, dass in der ersten Bodenschicht die Wurzelrockenmasse bei beiden Varianten am höchsten ist und in die Tiefe hin abnimmt. Die Trockenmasse der unterirdischen Biomasse ist bei Variante 2 - sandig im Bereich von 0-10 cm größer als bei Variante 1 - schluffig - die Differenz beträgt 45 mg. Der Unterschied der Versuchsvarianten zwischen 10 und 20 cm beträgt 6 mg, wobei Variante 1 ein höheres Trockengewicht aufweist. In der Tiefe von 20-30 cm weist Variante 2 um 0,5 mg eine höhere Wurzelrockenmasse als Variante 1 auf. In der Schichtung von 30-40 cm hat Variante 1 um 1,5 mg mehr Wurzelrockenmasse aufzuweisen. Daraus ist erkennbar, dass Variante 1 - schluffig in den Tiefen 10-20 cm und 30-40 cm ein höheres Wurzelrockengewicht aufweist, als Variante 2 - sandig. In den Schichtungen zwischen 0-10 und 20-30 cm zeigt Variante 2 - sandig ein höheres Trockengewicht auf, als Variante 1 - schluffig. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass kein konkreter Unterschied der Substratvarianten in Bezug auf das Wurzelrockengewicht erkennbar ist.

#### 5.2.4 Root weight density RWD

Zur weiteren Prüfung des Wurzelrockengewichtes je  $\text{cm}^3$  wurde das Gewicht der getrockneten Wurzelmasse vom Probenkörper auf ein  $\text{cm}^3$  heruntergerechnet. Das folgende Diagramm veranschaulicht die root weight density (RWD) in  $\text{mg}/\text{cm}^3$  und in vier Bodentiefen (0-10, 10-20, 20-30 und 30-40 cm).

Diagramm 8: root weight density (RWD) der Versuchsaufbauten (V 1 - schluffig und V 2 - sandig)

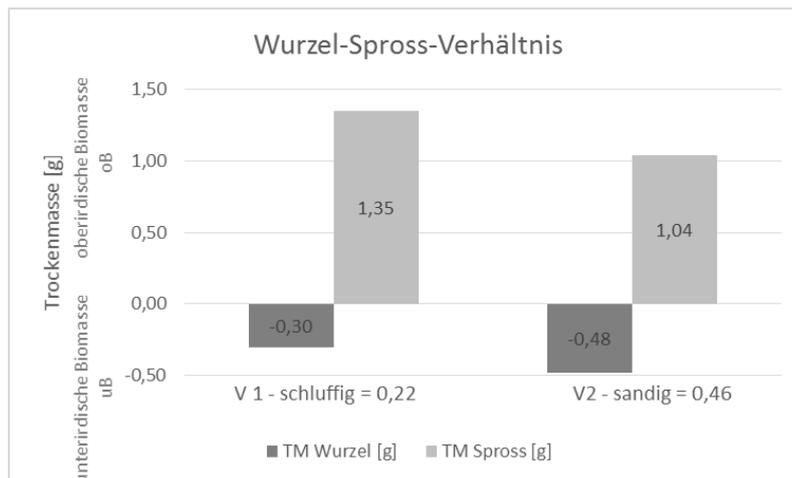


Das Wurzelrockengewicht bei Versuchsvariante 1 - schluffig liegt im ersten Layer bei 1,294 mg bei einem Bodenvolumen von einem  $\text{cm}^3$ . In die unteren Layer nimmt dieses stark ab und im Layer von 30-40 cm beträgt das Gewicht nur mehr  $0,112 \text{ mg/cm}^3$ . Im Gegensatz zu Versuchsvariante 2 - sandig weist dabei das Trockenmassegewicht in der Tiefe bis 10 cm einen Wert von  $1,523 \text{ mg pro cm}^3$  auf. Das Trockengewicht nimmt wie beim Substratkörper mit höheren Schluff-Fractionen stark ab. In der am tiefsten gemessenen Schichtung (30-40 cm) beträgt das Gewicht  $0,120 \text{ mg}$ .

Die Analyse lässt erkennen, dass bei beiden Bodenkörpern ein Trend in der Gewichtsabnahme in die Tiefe zu beobachten ist. Wie die Ergebnisse des Trockengewichtes der unterirdischen Biomasse bereits gezeigt haben, beziffert der Substratkörper 1 - schluffig in den Tiefen 10-20 cm und 30-40 cm ein höheres Wurzelrockengewicht pro einem  $\text{cm}^3$  als Variante 2 - sandig. In den Schichtungen zwischen 0-10 und 20-30 cm weist Variante 2 - sandig ein höheres Trockengewicht auf als Variante 1 - schluffig. Den Werten gegenüber steht das Trockengewicht der Substratkörper je  $\text{cm}^3$ . Bei der Substratvariante 1 - schluffig beträgt das Gewicht  $1600 \text{ g/cm}^3$  und bei der Vergleichsvariante 2 - sandig liegt der Wert der Trockenbodenmasse bei  $1810 \text{ mg/cm}^3$ . Daraus lässt sich deuten, dass die Wurzeln der Gräser-Kräuter-Mischung aufgrund ihres Gewichtes ein sehr feines Wurzelgeflecht hatten, was sich bereits bei den Ergebnissen des Wurzelvolumens und der Wurzellänge bestätigt hat.

### 5.2.5 Wurzel-Spross-Verhältnis

Zur Analyse des Wurzel-Spross-Verhältnisses wurden je Versuchsvariante acht Zufallsstichproben je Systemvariante mittels Bodenbohrer gezogen. Das Untersuchungsvolumen einer Stickprobe beträgt  $196,35 \text{ cm}^3$  und die Untersuchungsfläche liegt bei  $19,63 \text{ cm}^2$ . Die oberirdische Biomasse wurde seit dem Zeitpunkt der Ansaat nicht zurückgeschnitten. Die folgende Grafik zeigt die gemittelten Wurzel-Spross-Verhältnisse der acht Bodenproben je Variante. Die hellgraue Box gibt die oberirdische Biomasse und die dunkelgraue Box die Werte der unterirdischen Biomasse an. Bei V 1 - schluffig und V 2 - sandig sind die Ergebnisse des Wurzel-Spross-Verhältnisses der Versuchsvarianten angegeben.

**Diagramm 9: Biomasse und Wurzel-Spross-Verhältnis der Versuchsvarianten V 1 - schluffig und V 2 - sandig**

Bei der Bestimmung des Wurzel-Spross-Verhältnisses zeigt die Variante 1 - schluffig einen Durchschnittswert von 1,35 g an oberirdischer Biomasse an. Der Biomassewert der anderen Variante beträgt 1,04 g und ist somit geringer. Im Gegensatz zur unterirdischen Biomasse, konnte bei der Versuchsvariante 2 - sandig der höchste Durchschnittswert von 0,48 g an unterirdischer Biomasse ermittelt werden. Das Ergebnis der Biomasse zur Bodenoberfläche bei der Vergleichsvariante beträgt 0,30 g an unterirdischer Biomasse.

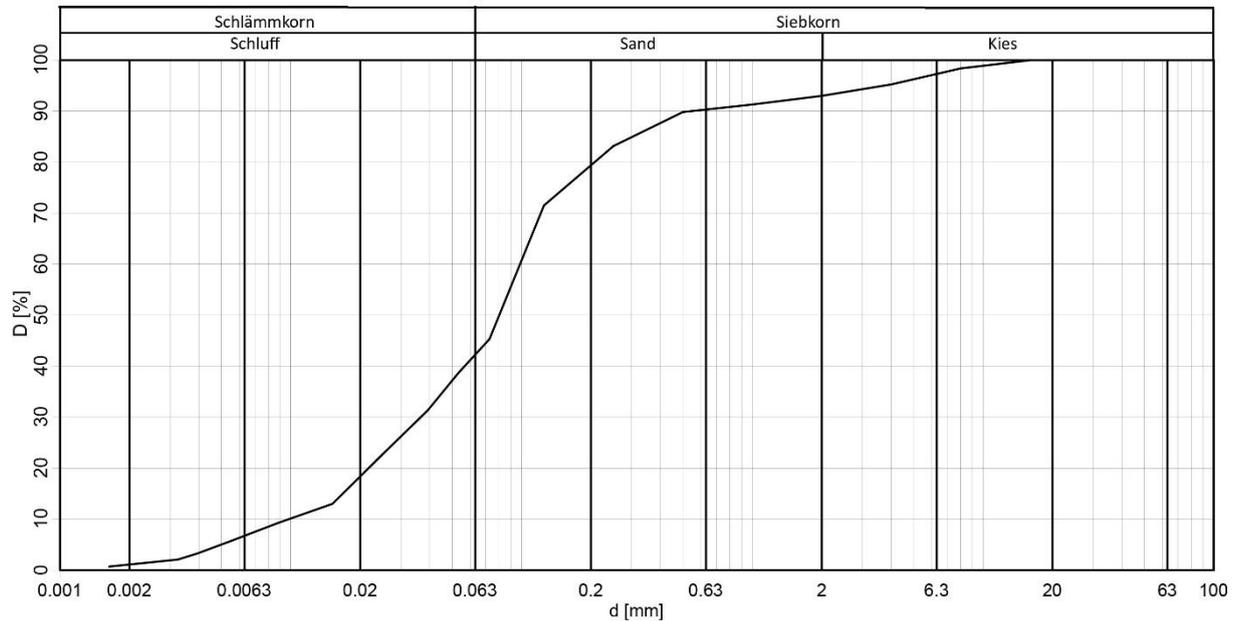
Bei der Analyse des Wurzel-Spross-Verhältnisses weist die Variante 2 - sandig den höchsten Wert auf – dieser beträgt 0,46. Im Vergleich zu Variante 1 - schluffig beträgt das Wurzel-Spross-Verhältnis 0,22. Insbesondere bei der schluffigen Bodenart ist ein Trend hinsichtlich einer verstärkten Ausprägung der oberirdischen Biomasse zu erkennen. Im Gegensatz zur unterirdischen Biomasse ist beim sandigen Substratkörper ein höheres Trockenmassegewicht zu identifizieren. Werden nun die Werte der ober- und unterirdischen Biomasse in Verhältnis gesetzt, zeigt die Variante 2 ein deutlich kleineres Verhältnis im Gegensatz zur Vergleichsvariante.

## 5.3 Bodenparameter

### 5.3.1 Korngrößenverteilung und Bodenart

Die Kornfraktionen der Substratvarianten wurden mittels Siebanalyse im Labor anhand der Rückstellproben ermittelt. Die folgenden Grafiken geben die Kornverteilungskurven, die Bodenbestandteile, die Bodenbezeichnungen und die Ungleichförmigkeitszahl der Sieblinien wieder:

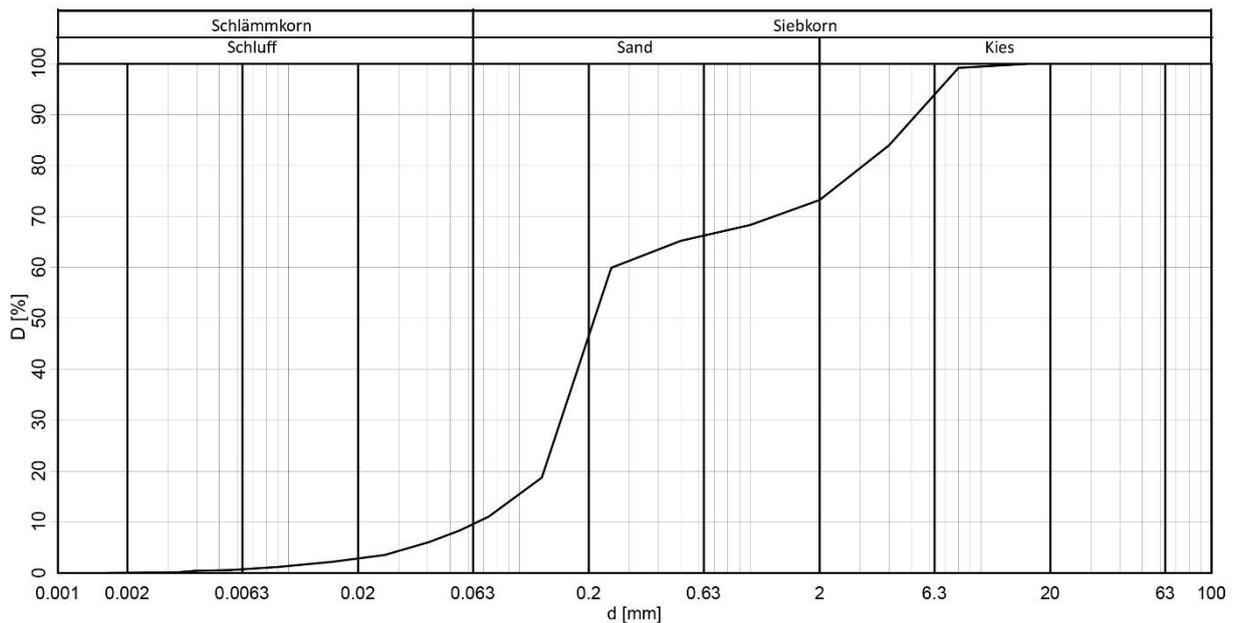
**Diagramm 10: Kornverteilungskurve der Versuchsvariante 1 – schluffig**



Die Sieblinie von Versuchsvariante 1 - schluffig veranschaulicht eine mittel gestufte Korngrößenverteilung, das heißt dass die Körnungslinie kontinuierlich verläuft und mehrere Bereiche der Bodenfraktion passiert und somit viele unterschiedliche Kornfraktionen vorhanden sind. Sand und Schluff Fraktionen sind prozentuell am meisten vertreten und liegen bei Sand bei 50,7 % und Schluff bei 41,2 %. Kiese und Tonfraktionen hingegen weisen einen geringeren Anteil mit 7,7 % und mit 1,1 % auf.

Der Bodenvariante 1 - schluffig wird der Bodenart sU = schluffiger Sand zugeteilt.

Diagramm 11: Kornverteilungskurve der Versuchsvariante 2 - sandig



Die Versuchsvariante 2 - sandig stellt eine eng eingestufte Korngrößenverteilung dar. Die steilverlaufende Körnungslinie zeigt im kiesigen und sandigen Bereich die Hauptkorngrößen. Kies hat einen Anteil von 26,8 % und Sand 63,6 %. Schluff-Fractionen sind mit 9,6 % vertreten. Die Bodenvariante 2 - sandig wird der Bodenart S = Sand zugeschrieben.

Tabelle 16: Bodenbestandteile und Bodenbezeichnungen der Versuchsvariante 1 - schluffig und 2 - sandig

Bodenbestandteile	Versuchsvariante 1 - schluffig	Versuchsvariante 2 - sandig
Steine	0 %	0 %
Kies	7 %	26,8 %
Sand	50,7 %	63,6 %
Schluff-Fractionen	41,2 %	9,6 %
Tonfraktionen	1,1 %	0 %
Bodenart	uS = schluffiger Sand	S = Sand

Substratvariante 1 und 2 weisen unterschiedliche Sieblinien auf. Die vorstehende Grafik stellt die Anteile der Korn-Fractionen beider Substratmischungen in Prozent gegenüber. Steine sind in keiner Variante vertreten und somit mit 0 % beziffert. Variante 1 - schluffig hat einen geringen Kiesanteil mit 7 %, im Gegensatz zu Variante 2 - sandig welche 26,8 % Kiesanteile im Bodenkörper enthält. Die Anteile der Sand-Fractionen beider Varianten sind bei allen Korn-Fractionen am ähnlichsten - Variante 1: 50,75 und Variante 2: 63,6 %, dennoch besitzt der Bodenkörper 2 einen höheren prozentuellen Anteil.

Fraktionen an Schluff hat Variante mit 41,2 % 1 ersichtlich mehr als Variante 2, die 9,6 % beinhalten. Tonanteile sind nur bei Variante 1 festzustellen. Aufgrund der Zuordnung der Bodenbezeichnung und der Anteile an Korn-Fraktionen bekamen die Versuchsvarianten bei der Darstellung und Beschreibung in der Arbeit die zusätzliche Bezeichnung „schluffig“ und „sandig“.

Durch die Analyse der Einteilung der Bodenbezeichnung und der Anteile der Bodenfraktionen lassen sich die untersuchten Bodenkörper gemäß RVS 08.03.04 (2008) in bindige und nicht bindige Böden einteilen. Daher ist die Substratvariante 1 - schluffig als bindiger Boden und Substratvariante 2 - sandig als nicht bindiger Boden anzusehen.

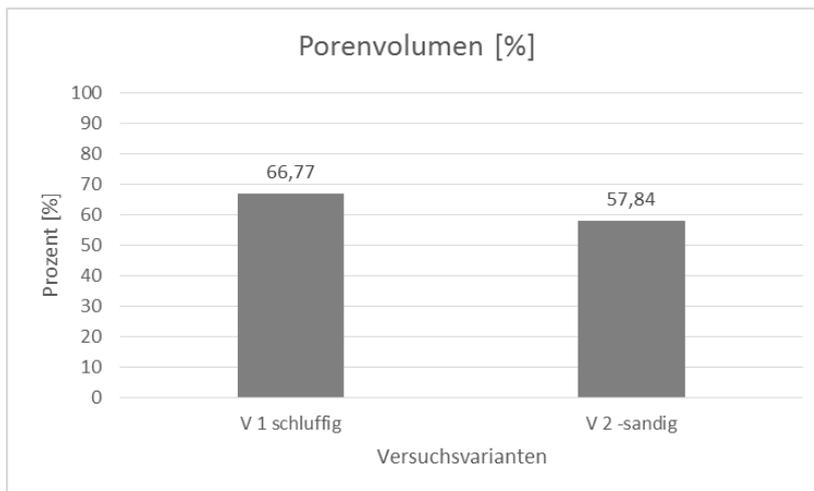
Die folgende Tabelle stellt die Ungleichförmigkeitszahl der Sieblinien beider Varianten dar. Die Zahlen  $d_{60}$  und  $d_{10}$  geben die Korngrößen in mm, bei denen die Summenkurve die 60 % bzw. 10 % Linie schneidet wieder. Daraus ist abzulesen, dass Substratvariante 1 - schluffig eine mittel gestufte Körnungslinie und Substratvariante 2 - sandig eine eng eingestufte Körnungslinie aufweist.

**Tabelle 17: Ungleichförmigkeitszahl der Sieblinien (Versuchsvariante 1 - schluffig und 2 - sandig)**

Ungleichförmigkeitszahl für die Sieblinie				
Variante	$d_{10}$	$d_{60}$	$C_u$	
V 1 - schluffig	0,01	0,09	9	mittel gestuft = $C_u > 6$
V 2 - sandig	0,066	0,25	4	eng eingestuft = $C_u < 6$

### 5.3.2 Porenvolumen

Der Teil des Bodenvolumens, welcher mit Wasser und Luft gefüllt ist, spielt für die Wasserbewegungs- und Belüftungsvorgänge eine zentrale Rolle. Aus diesem Grund wurde das Maß des Porenvolumens gemessen und analysiert. Für die Bestimmung des Porenvolumens wurden je Substratvariante (V 1 - schluffig und V 2 - sandig) drei Zylinderproben im Labor durchgeführt. Das nachfolgende Diagramm zeigt den Durchschnittswert des Porenvolumens der Zylinderproben. Das Porenvolumen wird dabei in Prozent [%] angegeben.

**Diagramm 12: Porenvolumen der Versuchsvarianten V 1 - schluffig und V 2 - sandig**

Aus den Daten geht hervor, dass die Versuchsvariante 1 - schluffig ein größeres Porenvolumen aufweist als Versuchsvariante 2 - sandig. Das Ergebnis von Versuchsvariante 1 - schluffig zeigt einen Mittelwert des Porenvolumens von 66,77 %. Dem gegenüber steht das Porenvolumen des Bodenkörpers mit hohen Sand-Fraktionen mit einem mittleren Wert von 57,84%.

Die Werte der beiden Bodenkörper sind laut SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (2010) in die Bodenhauptgruppe „Ton“ einzustufen. Die Ergebnisse der Kornfraktionsuntersuchungen (siehe Kapitel 5.3.1) verwerfen jedoch dieses Ergebnis. Da das Porenvolumen im Labor gemessen und nicht unter natürlichen Bedingungen gelagert wurde, ist zu vermuten, dass der Bodenkörper in den Zylinderuntersuchungen zu wenig verdichtet wurde und somit ein höheres Porenvolumen gemessen wurde, als dies am Feld der Fall gewesen wäre. Diese Werte sind daher nicht mit reellen Werten sondern nur gegeneinander in Bezug zu setzen.

### 5.3.3 Wasserspeicherkapazität

Die Wasserspeicherkapazität eines Bodens stellt für die Pflanzen eine zentrale Rolle dar. Infolgedessen wurde im Labor die Feldkapazität der beiden Bodenkörper gravimetrisch als auch rechnerisch bestimmt. Die Durchführung von zwei unterschiedlichen Methoden zur Errechnung der Wasserspeicherkapazität eines Bodens fand statt, um mögliche Fehlerquellen zu erkennen und eine Vergleichbarkeit möglich zu machen. Die Analysen der Wasserspeicherkapazität werden in den folgenden Grafiken je Versuchsvariante dargestellt und sind in Prozent [%] angegeben.

**Tabelle 18: gravimetrische Wasserspeicherkapazität der Versuchsvariante 1 - schluffig**

Wasserspeicherkapazität gravimetrisch [%]		
Versuchsvarianten	Zylinderprobe	[%]
V 1 schluffig	1	39,94
V 1 schluffig	2	39,82
V 1 schluffig	3	40,58
<b>Mittelwert</b>		<b>40,11</b>

**Tabelle 19: gravimetrische Wasserspeicherkapazität der Versuchsvariante 2 - sandig**

Wasserspeicherkapazität gravimetrisch [%]		
Versuchsvarianten	Zylinderprobe	[%]
V 2 -sandig	1	29,62
V 2 -sandig	2	29,36
V 2 -sandig	3	30,35
<b>Mittelwert</b>		<b>29,78</b>

Bei den Untersuchungen der gravimetrischen Wasserspeicherkapazität weist Versuchsvariante 1 - schluffig eine deutlich höhere Wasserspeicherfähigkeit auf als die Werte von Versuchsvariante 2 - sandig. Dabei beträgt die Differenz 10,33 %. Der Wert der Variante 1 zeigt im Mittel eine gravimetrische Wasserspeicherkapazität von 40,11 %. Bei der Versuchsvariante 2 - sandig ergeben die Analysen eine gravimetrische Wasserspeicherkapazität im Mittelwert von 29,78 %.

**Tabelle 20: Wasserspeicherkapazität der Versuchsvariante V 1 - schluffig**

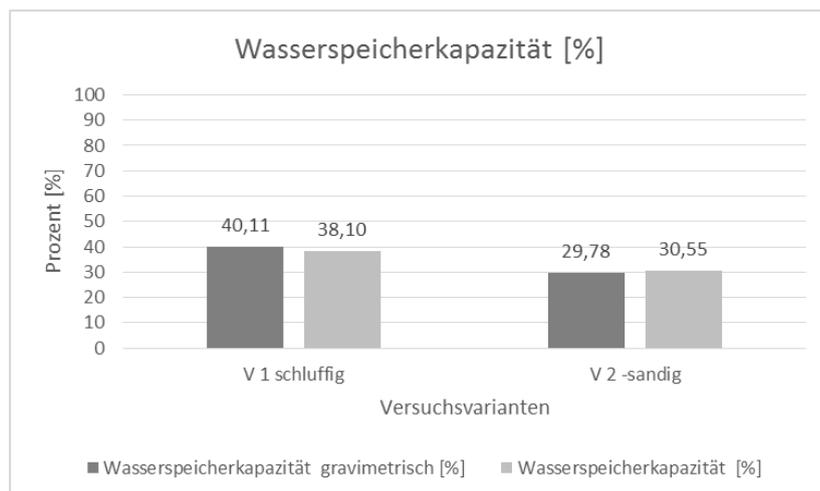
Wasserspeicherkapazität [%]		
Versuchsvarianten	Zylinderprobe	[%]
V 1 schluffig	1	41,09
V 1 schluffig	2	35,51
V 1 schluffig	3	37,68
<b>Mittelwert</b>		<b>38,10</b>

**Tabelle 21: Wasserspeicherkapazität der Versuchsvariante V 2 - sandig**

Wasserspeicherkapazität [%]		
Versuchsvarianten	Zylinderprobe	[%]
V 2 -sandig	1	30,91
V 2 -sandig	2	29,14
V 2 -sandig	3	31,60
<b>Mittelwert</b>		<b>30,55</b>

Die Analysen der Wasserspeicherkapazität zeigen bei Substratvariante 1 - schluffig einen Durchschnittswert 38,10 % auf. Dem gegenüber steht der Mittelwert der Wasserspeicherfähigkeit von Versuchsvariante 2 - sandig und dieser weist einen Wert von 30,55 % auf. Dabei ist zu erkennen, dass die Versuchsvariante 1 - schluffig eine höhere Wasserspeicherkapazität aufweist als Versuchsvariante 2 - sandig, der Unterschied ergibt eine Differenz von 7,55 %.

Diagramm 13: Gegenüberstellung der Wasserspeicherkapazitätsmessungen



Die vorstehende Grafik stellt die Ergebnisse der zwei Methoden der Wasserspeicherkapazitätsmessungen der Versuchsvarianten gegenüber. Dabei ist zu erkennen, dass die Versuchsvariante 1 - schluffig bei beiden Methoden eine höhere Wasserspeicherkapazität aufweist, als Versuchsvariante 2 - schluffig. Die Werte der Wasserspeicherkapazität der Substratmischung 2 sind auf das geringere Porenvolumen, den geringeren Anteil der Fraktionsgrößen < 0,5 mm und den geringen Anteil an organischer Substanz zurückzuführen.

#### 5.3.4 Organische Bestandteile

Für die Analyse der organischen Bestandteile wurden aus den Rückstellproben jeder Variante Untersuchungen mittels Muffelofen durchgeführt. Dabei fanden je Bodenprobe drei Wiederholungen statt und der durchschnittliche Anteil an organischem Kohlenstoff in Masse-% wurde ermittelt. In den folgenden Tabellen wird der Gehalt an organischer Substanz im Boden in Masse-% angegeben.

Tabelle 22: Organische Bestandteile der Versuchsvariante 1 - schluffig

Organische Bestandteile [%]					
V 1 - schluffig		Massen [g]		Differenz	
Probennr.	Trockengewicht 105°C [g]	Glühgewicht 550°C [g]	absolut [g]	mineralische Substanz [%]	organische Substanz[%]
1	30	28,82	1,18	96,07	3,93
2	30	28,9	1,1	96,33	3,67
3	30	28,88	1,12	96,27	3,73
durchschnittlicher Masserverlust in g			1,13		
durchschnittlicher Anteil organischem Kohlenstoffs in Masse-%					<b>3,78</b>

Tabelle 23: Organische Bestandteile der Versuchsvariante 2 - sandig

Organische Bestandteile [%]					
V 2 - sandig		Massen [g]		Differenz	
Probennr.	Trockengewicht 105°C [g]	Glühgewicht 550°C [g]	absolut [g]	mineralische Substanz [%]	organische Substanz[%]
1	130	129,02	0,98	99,25	0,75
2	30	29,78	0,22	99,27	0,73
3	30	29,72	0,28	99,07	0,93
durchschnittlicher Masserverlust in g			0,49		
durchschnittlicher Anteil organischem Kohlenstoffs in Masse-%					<b>0,81</b>

Die Untersuchungen bei der Versuchsvariante 1 - schluffig haben ergeben, dass sich das Ergebnis des durchschnittlichen Anteils an organischem Kohlenstoff in Masse-% auf 3,78 % beläuft. Die Analysen des Laborversuches von Variante 2 - sandig weisen einen Durchschnittswert von 0,81 % an organischem Kohlenstoff in Masse-% auf. Bei den Bodenanalysen auf durchschnittliche Anteile an organischen Bodenbestandteilen weist die Versuchsvariante 1 - schluffig einen höheren organischen Anteil auf als die Untersuchungen von der Vergleichsvariante 2 - sandig. Trotzdem bewegen sich beide Durchschnittswerte in einem Bereich, die gemäß EN ISO 14 688 -2 (2004) als schwach organisch anzusehen sind.

### 5.3.5 Scherfestigkeit

Für die Analyse der Scherfestigkeit wurden je Versuchsvariante fünf Zufalls-Stichproben je Layertiefe mit einer Flügelsonde gemessen. Die Scherfestigkeit der Substratvarianten wurde am Feld, mit Vegetation (Gräser-Kräuter), ermittelt. In den nachstehenden Tabellen ist die Oberflächenscherfestigkeit anhand des arithmetischen Mittels der fünf durchgeführten Messungen je Layer angegeben. Die Scherfestigkeit wird in  $\text{kN/m}^2$  angegeben.

**Tabelle 24: Oberflächenscherfestigkeit der Versuchsvariante 1 - schluffig**

Oberflächenscherfestigkeit [ $\text{kN/m}^2$ ]		
Variante	Layertiefe [cm]	[ $\text{kN/m}^2$ ]
V 1 - schluffig	0 - 4	65,6
V 1 - schluffig	10-14	20,2
V 1 - schluffig	20-24	24,6
V 1 - schluffig	30-34	17

**Tabelle 25: Oberflächenscherfestigkeit der Versuchsvariante 2 - sandig**

Oberflächenscherfestigkeit [ $\text{kN/m}^2$ ]		
Variante	Layertiefe [cm]	[ $\text{kN/m}^2$ ]
V 2 - sandig	0 - 4	99,4
V 2 - sandig	10-14	13,4
V 2 - sandig	20-24	15
V 2 - sandig	30-34	11,8

Variante 1 - schluffig zeigt in den oberen 0-4 cm eine hohe Scherfestigkeit mit einem Wert von  $65,6 \text{ kN/m}^2$ . In den Layern 10-14, 20-24 und 30-34 cm nehmen die Werte kontinuierlich ab. Der geringste Wert wurde im untersten Layer gemessen und beträgt  $17 \text{ kN/m}^2$ . Die höchste Oberflächenscherfestigkeit mit  $99,4 \text{ kN/m}^2$  konnte im obersten Layer der Variante 2 - sandig ermittelt werden. Auch bei der Variante 2 - sandig nimmt die Scherfestigkeit mit zunehmender Tiefe stark ab. Im dritten Layer (30-34 cm) ist diese mit  $15 \text{ kN/m}^2$  leicht höher als im zweiten Layer, die bei  $13,4 \text{ kN/m}^2$  liegt. Die Scherfestigkeit ist bei der Variante 2 - sandig im Bereich 0-4 cm um  $22,9 \text{ kN/m}^2$  höher als bei Variante 1 – schluffig. In den unteren Tiefen (10-14, 20-24 und 30-34) weist die Variante 1 - schluffig eine höhere Scherfestigkeit auf.

Die Ergebnisse zeigen, dass Gräser-Kräuter Bestände einen sehr dichten Wurzelfilz in den obersten Bodenschichten ausbilden, der sich auf die Schereigenschaften des Bodens auswirkt. Die Ergebnisse leisten einen Beitrag zur Bewertung der bodenstabilitätsfördernden Eigenschaften der beiden

Vegetationstypen. Aufgrund des zunehmenden Bodendruckes nimmt die Scherfestigkeit in die Tiefe ab.

## 6 Zusammenfassende Analyse und Diskussion

Durch die Anlage einer Versuchsfläche am Feld konnten die Unterschiede zweier Substratmischungen auf die ober- und unterirdische Biomasseproduktion festgestellt werden und ein relativer Zusammenhang zueinander und den Bodenparametern hergestellt werden. Zum einen konnten Erhebungen der ober- und unterirdischen Vegetation aufgenommen werden und andererseits wurden Analysen über die Bodenparameter durchgeführt. Anhand dieser Erkenntnisse lassen sich Bewertungen der getesteten Varianten zueinander feststellen und mit Angaben von Literaturquellen vergleichsweise beurteilen.

Da insgesamt eine große Zahl an Untersuchungen durchgeführt wurde, um die Fragestellungen beantworten zu können, wurde eine Grafik angefertigt um einen Überblick über die gesamten analysierten Daten der Untersuchungsparameter und der Versuchsvarianten zu geben. Diese werden im Anschluss zusammenfassend beschrieben.

**Tabelle 26: Zusammenfassende Ergebnisdarstellung**

Untersuchungsebene	Untersuchungsparameter	Einheit	V 1 - schluffig				V 2 - sandig			
Oberirdische Biomasse	Deckungsgrad (21.09.2016)	[%]	91				69			
	maximale Sprosslänge (30.11.2016)	[mm]	250				73			
	Trockengewicht	[g]	1,38				1,04			
Unterirdische Biomasse	Wurzelvolumen	Tiefe [cm]	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	30-40 cm	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	30-40 cm
		[cm <sup>3</sup> ]	1,837	0,259	0,139	0,266	1,257	0,194	0,155	0,165
	RLD (root length density)	Tiefe [cm]	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	30-40 cm	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	30-40 cm
		[cm/cm <sup>3</sup> ]	26,08	10,88	4,68	7,46	32,07	6,61	4,99	5,23
	Trockengewicht	Tiefe [cm]	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	30-40 cm	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	30-40 cm
		[mg]	0,22	0,03	0,03	0,03	0,32	0,09	0,05	0,03
	RWD (root weight density)	Tiefe [cm]	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	30-40 cm	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	30-40 cm
[mg/cm <sup>3</sup> ]		1,29	0,16	0,12	0,11	1,52	0,13	0,11	0,12	
Wurzel-Spross-Verhältnis	bsp.: 10:1		0,22				0,46			
Bodenparameter	Anteil in % an Bodenfraktionen	[%]	G = 7%, S = 50,7%, U = 41,2 T = 1,1%				G = 26,8%, S = 63,6%, U = 9,6%, T = 0%			
	Sieblinie		mittel gestuft				eng eingestuft			
	Bodenart		uS				S			
	Bodenmechanische Eigenschaft		bindig				nicht bindig			
	Porenvolumen	[%]	66,77				57,84			
	Wasserspeicherkapazität gravimetrisch	[%]	40,11				29,78			
	Wasserspeicherkapazität	[%]	38,1				30,55			
	organischer Anteil im Boden	[%]	3,78				0,81			
	Scherfestigkeit	Tiefe [cm]	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	30-40 cm	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	30-40 cm
		[k <sub>N</sub> /m <sup>2</sup> ]	65,6	20,2	24,6	17	99,4	13,4	15	11,8

### **Oberirdische Biomasse**

Die ersten Unterschiede der Vegetationsentwicklung waren durch Beobachtungen bereits während der Anwuchsphase anhand der Deckungsgraddaten zu erkennen.

Bei der Entnahme der Zufalls-Stichproben konnten weitere Unterschiede der Versuchsvarianten hinsichtlich der Wüchsigkeit bzw. der maximalen Sprosslänge festgestellt werden. Das Trockengewicht der oberirdischen Biomasse gab ebenfalls Aufschluss auf die Wuchsentensität der Vegetation und die Ungleichheit zwischen den beiden Versuchsfeldern. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Analysen bei allen Untersuchungsparametern der oberirdischen Biomasse, die Versuchsvariante 1 - schluffig höhere Werte aufzeigt als die Vergleichsvariante. Bei Betrachtung der Deckungsgraddaten

gilt eine höhere Bodenbedeckung der Variante 1 - schluffig für die Reduktion von Erosionsprozessen als effektiver im Vergleich zur Variante 2 - sandig. Bei Überprüfung der maximalen Sprosslänge bezieht sich diese auf eine rasche Wüchsigkeit der Vegetation, was die Kostenintensität durch erhöhten Pflegeaufwand im Vergleich zu Vegetationssystemen mit geringem jährlichem Biomassezuwachs steigert.

#### Bewertung der Qualität der erhobenen Daten

Der Deckungsgrad wurde an sechs Zeitpunkten ermittelt. Die Aufnahme nach der ersten Ansaat (15.07.2016) erwies sich aufgrund der fehlenden regelmäßigen Bewässerung als schwierig. Ebenfalls ist die Ansaatmethode an diesem Standort zu überdenken, da der Wind hohe Geschwindigkeiten erzielen und somit das Saatgut erodieren kann. Erst nach der zweiten Ansaat fand die Datenerhebung statt, wobei in Teilbereichen der Felder bereits Vegetation der ersten Saat vorhanden war. Dadurch ist der Deckungsgrad zu Beginn der Datenangabe bereits sehr hoch. Die Deckungsgradwerte am Ende der Vegetationsperiode nehmen ab, da manche Pflanzen bereits einziehen und eine andere Farbe aufweisen und somit nicht mehr dem Farbspektrum der Bildanalysesoftware entsprechen. Darum ist diese Methode nur zur Vegetationsperiode anzuwenden. Am Ende der Vegetationsperiode bieten andere Methoden, wie beispielsweise die visuelle Deckungsschätzung verwertbare Analysedaten. Trotzdem gilt das Softwaremodul als angemessen, da die Bilder zügig und objektiv ohne Schätzfehler ausgewertet werden konnten.

Die maximale Sprosslänge wurde vor Ende der Vegetationsruhe und zum Zeitpunkt der Boden-Bohrkern-Entnahme gemessen und gilt als reliabel. Ebenfalls anzumerken ist, dass die oberirdische Biomasse seit der Ansaat nie geschnitten wurde und daher erst bei Entnahme der Bohrkern die maximale Sprosslänge der Stichproben ermittelt wurde.

#### **Unterirdische Biomasse**

Die Auswertungen der Wurzeldata der Versuchsanlage zeigen, dass Versuchsvariante 1 - schluffig in den Bodenschichtungen 0-10 cm, 10-20 cm und 30-40 cm ein deutlich höheres Wurzelvolumen aufweist als Variante 2 - sandig. Im Gegensatz dazu weist die Versuchsvariante 2 - sandig in der Tiefe zwischen 20 und 30 cm einen größeren Anteil an Wurzeln auf. Im speziellen ist ersichtlich, dass bei beiden Substratkörpern im Bereich zwischen 0-10 cm der Wurzelanteil 6-7-mal höher ist, als in den darunter liegenden Messschichten. Ebenfalls ist anzumerken, dass im Vergleich zum Gesamtvolumen der Beprobung die Durchwurzelungsintensität betreffend des Volumenanteils relativ gering ist und knapp unter 1 % liegt.

Bei der root length density (RLD) ist ein deutlicher Trend zu erkennen: Die Gesamtwurzellänge beider Varianten nimmt in die Tiefe ab. Die Versuchsvariante mit höherem Anteil an Schluff-Fractionen zeigt

in den Layertiefen zwischen 0-10 cm und 20-30 cm eine höhere Wurzellänge als die Vergleichsvariante. Im Gegensatz dazu weist die Vergleichsvariante mit höheren Sand-Fraktionen in den Schichtungen 10-20 cm und 30-40 cm einen höheren Durchschnittswert der Wurzellänge auf. Zwischen dem Wurzelvolumen und der RLD ist daher kein Zusammenhang feststellbar.

Die Analysen lassen erkennen, dass bei beiden Bodenkörpern ein Trend in Richtung Gewichtsabnahme in die Tiefe zu beobachten ist. Wie die Ergebnisse des Trockengewichtes der unterirdischen Biomasse bereits veranschaulichen, hat der Substratkörper 1 - schluffig in den Tiefen 10-20 cm und 30-40 cm ein höheres Wurzeltrockengewicht als Variante 2 - sandig. In den Schichtungen zwischen 0-10 und 20-30 cm weist Variante 2 - sandig ein höheres Trockengewicht auf als die Variante 1 - schluffig.

Das Wurzel-Spross-Verhältnis, das Variante 2 - sandig aufweist, ist geringer als das von Variante 1 - schluffig. Dies ließ sich bereits aus den Ergebnissen der ober- und unterirdischen Trockenbiomasse vermuten.

#### *Bewertung der Qualität der erhobenen Daten*

Diese Wurzelparameter wurden mithilfe eines Wurzelscanners und eines Analyseprogrammes (WinRHIZO) durchgeführt. Beim Auswaschen der Bohrkerns ist anzumerken, dass dabei sehr präzise gearbeitet werden muss, damit bei diesem Arbeitsvorgang möglichst wenig Wurzeln verloren gehen. Wenn die Wurzeln von jeglichen Bodenaggregaten, Sand und abgestorbenem organischem Material getrennt sind, stellen sich das Analyseprogramm und der Wurzelscanner als große Hilfe für die Erhebung der Rohdaten heraus. Diese Hilfsmittel liefern genau Daten und ein rationelles Arbeiten ist ebenfalls möglich

Das Trockengewicht der Sprosse wurde durch die Trocknung im Trockenschrank auf eine Massenkonzentration ermittelt werden, was die Daten als reliabel geltend macht.

#### ***Bodenparameter***

Die Analyse der Körnung beider Substratmischungen wies unterschiedliche Körnungslinien und Anteile an Bodenfraktionen auf. Nach Berechnung der Ungleichförmigkeitszahl weist die Variante 1 eine mittel gestufte Körnungslinie auf, wohingegen Variante 2 eine eng eingestufte Körnungslinie aufzeigt. Laut RVS 08.03.04 (2008) ist Substratvariante 1 - schluffig als bindiger Boden und Substratvariante 2 - sandig als nicht bindiger Boden anzusehen.

Die Auswertungen der Zylinderversuche im Labor auf Porenvolumen und Wasserspeicherkapazität zeigen beim Substratkörper mit höherem Anteil an Schluff-Fraktionen einen höheren Wert als bei der Variante mit höheren Anteilen an Sand-Fraktionen.

Bei Analysen der Bodenkörper auf durchschnittliche Anteile an organischen Bodenbestandteilen weisen die Durchschnittswerte gemäß EN ISO 14 688 -2 (2004) schwach organische Ergebnisse auf. Trotzdem ist der organische Anteil der Versuchsvariante 1 - schluffig im Gegensatz zur Vergleichsvariante V 2 - sandig höher.

Die Untersuchungen der Scherfestigkeit ist bei der Variante 2 - sandig im Bereich 0-4 cm höher als bei Variante 1 - schluffig. In den unteren Tiefen (10-14, 20-24 und 30-34 cm) weist die Variante 1 - schluffig eine höhere Scherfestigkeit auf. Die Ergebnisse zeigen, dass Gräser-Kräuter Bestände einen sehr dichten Wurzelfilz in den obersten Bodenschichten ausbilden, der sich auf die Schereigenschaften des Bodens auswirkt. Die Ergebnisse leisten einen Beitrag zur Bewertung der bodenstabilitätsfördernden Eigenschaften der beiden Vegetationstypen. Aufgrund des zunehmenden Bodendruckes nimmt die Scherfestigkeit in die Tiefe ab.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die beiden Substratkörper deutlich unterschiedliche Eigenschaften und Zusammensetzungen aufweisen. Was sich bei den Ergebnissen der ober- und unterirdischen Biomasse bemerkbar macht.

#### Bewertung der Qualität der erhobenen Daten

Die Kornfraktionen wurden im Labor unter den Vorgaben der ÖNORM L 1061-1 (2002) und der ÖNORM L 1061-2 (2002) durchgeführt und mithilfe eines geotechnischen Eingabeprogrammes in Sieblinien und Bodenbezeichnungen ausgewertet.

Die Untersuchungen des Porenvolumens und der Wasserspeicherkapazität wurden gemäß ÖNORM B 2506-3 (2016) im Labor mithilfe von Zylinderversuchen durchgeführt. Nachdem überdurchschnittlich hohe Werte festgestellt wurden, ist fraglich, ob bei Substraten mit hohem Anteil an schluffigen- und sandigen Fraktionen eine andere Methode für diese Ermittlung des Porenvolumens und der Wasserspeicherkapazität angewendet werden soll. Die Substrate müssen lageweise eingebaut und verdichtet werden, damit eine ähnliche Situation wie am Feld entsteht. Ist jedoch das feine Material im Zylinder zu dicht eingebaut, kommt es zu Verwirbelungen und zum Heben des Probematerials, was das Ergebnis verfälschen kann. Bei zu geringer Fließgeschwindigkeit des von unten eingeleiteten Wassers, kommt es zu einer ungenauen Anzeige des Wasserzählers, was ebenfalls verfälschte Werte der Untersuchungen zur Folge hat. Trotzdem liefen die Messungen brauchbare Ergebnisse, die in Relation zueinander verwendet werden können und zeigen, dass das Porenvolumen und die Wasserspeicherkapazität bei Variante 1 größer sind als bei Variante 2.

Die Messungen der organischen Bestandteile im Labor mithilfe des Muffelofens wurden unter Vorgaben der DIN 18 128 (2002) vorgenommen und gelten als reliabel.

Die Scherfestigkeit wurde mit einer Flügelsonde direkt am Feld untersucht. Der Vorteil besteht darin, dass Felduntersuchungen möglich sind und dabei in mehreren Tiefen gemessen werden kann. Exakte Ergebnisse würde in diesem Fall eine Untersuchung mit Hilfe eines Rahmenschergerätes liefern. Diese Methode würde jedoch nur vom ganzen Bodenkörper und nicht von den einzelnen Schichten Ergebnisse liefern. Aus diesem Grund wurde die Flügelsonde zur Ermittlung der Scherfestigkeit verwendet. Damit der Einfluss der Vegetation durch die Pflanzenwurzeln ermittelt werden kann, sollte vor der Ansaat nach Setzung des Bodenkörpers eine Referenzmessung stattfinden. Diese Unterschiede der Messergebnisse können bei Erhebung der Daten mit Vegetation miteinander Vergleichen werden.

### ***Beantwortung der Forschungsfragen***

Aufgrund der erhobenen und analysierten Ergebnisse werden wie folgt die zwei Forschungsfrage zusammengefasst und beantwortet. Dadurch wird ein kompakter Überblick über die Resultate und Erkenntnisse aus den Untersuchungen, die für diese Masterarbeit durchgeführt wurden gegeben.

- Welchen Einfluss haben Substratmischungen auf die ober- und unterirdische Vegetationsentwicklung?

Die Ergebnisse zeigen, dass die für den Versuch verwendete Gräser-Kräuter-Saatgutmischung in der Versuchsvariante 2 - sandig eine geringere oberirdische Biomasseproduktion bildet als Versuchsvariante 1 - schluffig. Diese Daten lassen sich auf die untersuchten Bodenparameter in Zusammenhang setzen. Denn Variante 1 - schluffig weist eine mittel gestufte Körnungslinie, ein höheres Porenvolumen, eine höhere Wasserspeicherkapazität und einen höheren durchschnittlichen Anteil an organischem Kohlenstoff auf als Variante 2 - sandig (siehe Kapitel 5.3 „Bodenparameter“). Umgekehrt bilden die Pflanzen in der Versuchsvariante 2 - sandig eine höhere unterirdische Biomasseproduktion als die Pflanzen in der Substratvariante 1 - schluffig. Bei der unterirdischen Biomasseproduktion wird ersichtlich, dass Pflanzen in den Prüfkernen der Variante 2 - sandig zwar eine geringe oberirdische Biomasseproduktion aufweisen, jedoch ein größeres Wurzelsystem ausbilden.

Diese Analysen liefern eine Erkenntnis zur Anfangs erwähnten „Problemstellung“ in der beschrieben wird, dass die Erhaltung von Grünflächen durch hohen Pflegeaufwand sehr kostenintensiv sein kann. Die Versuchsvariante 2 - sandig liefert Werte, in der die oberirdische Biomasseproduktion geringer ist als bei Variante 1 - schluffig und ein größeres Wurzelsystem bildet.

- Welche Unterschiede hinsichtlich der geologischen Bodenparameter lassen sich zwischen den Substratkörpern feststellen?

Aufgrund der geotechnischen Analysen der Bodenparameter lassen sich Unterschiede zwischen den zwei Bodenkörpern feststellen. Durch den höheren Schluffanteil in Variante 1 ergaben die Untersuchungen eine höhere Wasserspeicherkapazität, ein höheres Porenvolumen und einen höheren

organischen Anteil, im Gegensatz zu Variante 2, die einen höheren Sandanteil beinhaltet. Durch die Analyse der Einteilung der Bodenbezeichnung und der Anteile der Bodenfraktionen lassen sich die untersuchten Bodenkörper gemäß RVS 08.03.04 (2008) in bindige und nicht bindige Böden einteilen. Substratvariante 1 - schluffig ist als bindiger Boden und Substratvariante 2 - sandig als nicht bindiger Boden anzusehen.

- Wie wirken sich das Wurzelvolumen und die Körnung der Substrate auf die Scherfestigkeit des Bodens aus?

Die Analysen der Wurzeluntersuchungen haben gezeigt, dass bei beiden Substratkörpern das Wurzelvolumen und die Wurzellänge in die Tiefe hin abnehmen. Im Bereich unmittelbar unter der Bodenoberfläche sind die Werte bei beiden Substratmischungen noch hoch, was in der darunterliegend gemessenen Layerschichtung (10-20 cm) um das 6-7 fache abnimmt und bis zur tiefst gemessenen Schichtung ähnlich bleibt. Im Zusammenhang mit der Scherfestigkeit betrachtet verhält sich diese ähnlich und nimmt mit zunehmender Tiefe ab. Jedoch lassen sich keine Unterschiede der zwei untersuchten Versuchsvarianten mit differenten Bodenbestandteilen deuten und ein Zusammenhang mit der Scherfestigkeit beurteilen.

## 7 Praxisempfehlungen und Ausblick

Quantitative Daten zu Wurzeln sind bis vor wenigen Jahrzehnten aufgrund von methodischen Schwierigkeiten oder sehr hohen Kosten in geringer Anzahl erforscht worden. Die meisten der bestehenden Untersuchungsmethoden sind sehr teuer und es fehlt grundsätzlich eine einfache Technik, um Aufschlüsse über den Zusammenhang vom Pflanzenwachstum ober- als auch unterirdisch und dem Bodenkörper, zu finden.

In dieser Arbeit wurde das Wurzelvolumen einer Gräser-Kräuter-Leguminosen Saatgutmischung an zwei unterschiedlichen Substratvarianten (Variante 1 - schluffig und Variante 2 - sandig), das Verhältnis von oberirdischer und unterirdischer Biomasse und der Zusammenhang unterschiedlicher Bodenparameter getestet. Der erste Teil, der Deckungsgrad, wurde in der ersten Vegetationsperiode ermittelt. Ober- und unterirdische Biomasse wurde am Ende der ersten Vegetationsperiode festgestellt. Wurzelscans brachten Erkenntnisse über die Wurzelmorphologie. Parallel dazu fanden im Labor geotechnische Untersuchungen der zwei Substratvarianten durch Rückstellproben statt. Dadurch konnten mögliche Unterschiede und Zusammenhänge der Wurzelbildung der zwei Substratvarianten gewonnen werden.

Der Versuchsaufbau und die angewendeten Methoden, sowie die Untersuchung unterschiedlicher Zusammenhänge der Parameter war prinzipiell eine günstige Möglichkeit die Wurzelentwicklung zu erforschen. Bei Anwendung von diversen Saatgutmischungen sollte für die Keimphase eine adäquate Bewässerung vorhanden sein. Unter Berücksichtigung aller klimatischen Bedingungen kann man dadurch den Ausfall, welcher z.B. durch Hitze zustande kommen kann, minimieren.

Viele Faktoren (Wasser, Nährstoffe, Licht, Temperatur, Bodengefüge) beeinflussen das Wurzelwachstum (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2013). Die Untersuchungen in dieser Arbeit zeigen, dass die Bodenparameter Einfluss auf die Wurzelentwicklung und das -wachstum nehmen. Die Korngröße ist das bekannteste und meist verwendete Charakteristikum des Bodens, jedoch stehen eine Reihe von Bodeneigenschaften und -merkmalen in engem Zusammenhang mit der Korngröße. So auch zwischen der Korngrößenverteilung, dem Wasserhaushalt, dem Porenvolumen und dem organischen Anteil des Bodens.

Inwiefern die Entwicklung und das Wachstum der Wurzeln von organischem Anteil im Bodenkörper, höherer Wasserverfügbarkeit und Porenvolumen, von unterschiedlicher Verdichtung der Böden, unterschiedlichem Nährstoffangebot, von Temperatur und Licht oder von Stresssituationen (Trockenheit, Hitze) abhängig ist, sind wichtige Grundlagen, welche es noch genauer zu erforschen gilt, um ihre Zusammenhänge noch besser verstehen zu können.

Untersuchungen über die Wurzel- und Bodenparameter, sowie deren Zusammenhang, sind für die Ingenieurbiologie essentiell um damit Rückschlüsse auf den geeigneten Pflanzenstandort bzw. auf das zu verwendende Pflanzenmaterial ziehen zu können. Für die Standortbeurteilung müssen naturgemäß mehrere Aspekte wie z.B. Naturraum, Lage, Höhe, Exposition, Klima, Boden, Wasserhaushalt, natürliche Flora und Fauna, chemische und physikalische Bodeneigenschaften sowie die Nutzung und deren Ansprüche berücksichtigt werden, um beurteilen zu können, ob eine ingenieurbiologischen Maßnahme erfolgreich sein kann und welche Pflanzen geeignet sind (E.F.I.B., 2015). So ist es möglich, die in dieser Arbeit durchgeführten Methoden zur Untersuchung der Wurzelparameter auch für andere Saatgutmischungen anzuwenden.

Es gilt zu berücksichtigen, dass standortadäquate Pflanzen, gemessen am Klima, den Bodeneigenschaften und der Wasserverfügbarkeit, für eine erfolgreiche Bepflanzung empfohlen werden um das Anwuchsverhalten und die Pflanzenentwicklung besser steuern zu können.

In Zukunft bedarf es daher an weiterführenden Untersuchungen unter Berücksichtigung pflanzenrelevanter Bodenparameter wie z.B. die Korngrößenverteilung, die Wasserspeicherkapazität oder die Verfügbarkeit von Nährstoffen und deren Auswirkung auf das Wurzelwachstum.

## 8 Quellenverzeichnis

### 8.1 Literaturverzeichnis

AD-HOC-AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung – 5. Aufl., Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandl., Stuttgart.

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

BEGEMANN W. & SCHIECHTL H. M. (1994): Ingenieurbiologie. Wiesbaden und Berlin. Bauverlag GmbH.

BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe) (2005): Ad-hoc Boden. [https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/boden\\_node.html](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/boden_node.html). Aufgerufen am: 28.04.2017.

BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe) (2005): Ad-hoc Boden. [https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/boden\\_node.html](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/boden_node.html). Aufgerufen am: 28.04.2017.

BIBLIOGRAPHISCHES INSTITUT GMBH (2017): Bau und Funktion der Wurzel. Berlin. <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/biologie-abitur/artikel/bau-und-funktion-der-wurzel>. Abgerufen am: 04.04.2017

BLUM W. E. H. (2007). Bodenkunde in Stichworten, 6. Auflage, Gebr. Borntraeger Verlag, Stuttgart.

BLUME, H.-P.; STAHR, K.; LEINWEBER, P. (2011): Bodenkundliches Praktikum. Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte, und für Geowissenschaftler. 3. überarb. Aufl., Spektrum, Akad. Verl., Heidelberg.

BONHAM, 1989, FERRIS-KAAN & PATTERSON, 1992) IN: HANDBUCH DES VEGETATIONSÖKOLOGISCHEN MONITORINGS (1997): Methoden, Praxis, angewandte Projekte Teil A: Methoden. Wien.

BRECHNER E. et. al. (2001): Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg. <http://www.spektrum.de/lexikon/biologie/sekundaeres-dickenwachstum/60832>. Abgerufen am: 02.04.2017.

BURCH A. (2016): Handsonde. <http://www.humax.ch/produkte/handsondesh/index.php>, Abgerufen am: 05.05.2017

COMBE (1910): In: KUTSCHERA L. & LICHTENEGGER E. (1960): Wurzelatlas mitteleuropäischer Ackerunkräuter und Kulturpflanzen. DLG-Verlags-GmbH. Frankfurt am Main.

DEPARTMENT FÜR NUTZPFLANZENWISSENSCHAFTEN (DNW) (Hrsg.), (2016a): Versuchswirtschaft Großenzersdorf. Online im Internet: <http://www.dnw.boku.ac.at/vwg/organisation/die-versuchswirtschaft/>. Aufgerufen am: 17.01.2017.

DEPARTMENT FÜR NUTZPFLANZENWISSENSCHAFTEN (DNW) (Hrsg.), (2016b): Wetterdaten Standort Raasdorf. Online im Internet: [https://dnw-web.boku.ac.at/dnw/wetter\\_form\\_pys.php](https://dnw-web.boku.ac.at/dnw/wetter_form_pys.php), Abgerufen am: 17.01.2017.

DÖRKEN V. M. (2010): Morphologie und Anatomie von Wurzeln. Universität Konstanz. Konstanz.

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

E.F.I.B. (Europäische Föderation für Ingenieurbiologie) (2015): Europäische Richtlinie für Ingenieurbiologie.

EHA S. DELUCA A. (2017) Ungräser im Garten. <http://www.liebedeinergarten.at/garten/rasen/ungraeser-im-rasen-0>. Abgerufen am: 10.03.2017.

FLORINETH F. (2012): Pflanzen statt Beton. Handbuch zur Ingenieurbiologie und Vegetationstechnik. Platzer-Verlag. Berlin-Hannover.

GARTNER K. (2017) Wieviel Wasser speichert mein Wald? <https://bfw.ac.at/rz/bfwcms.web?dok=10129>. Abgerufen am: 10.05.2017

GIGON et al. (2004) Kurzpraktikum terrestrische Ökologie. 2. Auflage. Geobotanisches Institut ETH. Zürich.

HARTGE K. H. & HORN R. (2014) Einführung in die Bodenphysik. 4. Aufl., Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandl., Stuttgart.

HESS, D. (2004): Allgemeine Botanik. Eugen Ulmer GmbH & Co, Stuttgart.

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

IBF (Institut für Bodenforschung) (2016): Beschreibung und Untersuchung landwirtschaftlicher Böden – Böden der Donauterrasse Versuchsstation Groß-Enzersdorf.

IGT (Institut für Geotechnik) (2010): Geotechnische Analyse – Korngröße, Kornverteilung. Wien.

KÄRNTNER SAATBAU (2014): Aktuelle Begrünung. Trojacher. Klagenfurt.

KLETT (2017): Einteilung der Bodenarten. <http://ne.lo-net2.de/bodenkunde/Bodenart.htm>, Abgerufen am: 04.05.2017.

KOHL B. (2017): Zusammenspiel von Vegetation & Abfluss. In: Bundesforschungszentrum für Wald. Institut für Naturgefahren. Wildbachprozesse & Hydrologie. [https://bfw.ac.at/db/bfwcms\\_mobil.web?dok=5753](https://bfw.ac.at/db/bfwcms_mobil.web?dok=5753). Abgerufen am: 05.05.2017.

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

KRÄTTLI, W.; SCHWARZ, M. (2015): Stabilisierung rutschender Hänge. Maienfeld: Fachstelle für forstliche Bautechnik (Hg.).

KUTSCHERA L. & LICHTENEGGER E. (1960): Wurzelatlas mitteleuropäischer Ackerunkräuter und Kulturpflanzen. DLG-Verlags-GmbH. Frankfurt am Main.

KUTSCHERA L. et al. (1997). Bewurzelung von Pflanzen in den Verschiedenen Lebensräumen, Botanische Arbeitsgemeinschaft am O.Ö. Landesmuseum, Linz.

KUTSCHERA L.& LICHTENEGGER E. (2013): Wurzelatlas mitteleuropäischer Waldbäume und Stäucher. 2. Auflage. Leopold Stocker Verlag. Graz-Stuttgart.

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

LETTNER H. (2001): Bodenphysik. Universität Salzburg.  
<http://biophysics.sbg.ac.at/transcript/soilphys.pdf>. Abgerufen am: 09.05.2017.

LOBET G. (2013-2017): WinRhizo. <http://www.plant-image-analysis.org/software/winrhizo>. Abgerufen am: 11.03.2017.

LÜTTGE, U. & KLUGE, M. (2012): Botanik: Die einführende Biologie der Pflanzen. 6. Auflage, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.

MERBACH, W., WITTENMAYER, L., AUGUSTIN, J. (2001): Physiologie und Funktion der Pflanzenwurzeln. Wiesbaden.

MUELLER-DOMBOIS & ELLENBERG, (1974) IN: HANDBUCH DES VEGETATIONSÖKOLOGISCHEN MONITORINGS (1997): Methoden, Praxis, angewandte Projekte Teil A: Methoden. W

MURACH (1984): IN: POLOMSKI J., KUHN N. (1998): Wurzelsysteme. (Hrsg.: Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. Paul Haupt Berne. Bern, Stuttgart, Wien.

NULTSCH Wilhelm (2001): Allgemeine Botanik. 11. Auflage. Thieme Verlag. Stuttgart.

POLOMSKI J., KUHN N. (1998): Wurzelsysteme. (Hrsg.: Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. Paul Haupt Berne. Bern, Stuttgart, Wien.

PÖSCHL S (2017): Korngröße-Glossar, <http://www.gartenteich-ratgeber.com/glossar/korngroesse.html>. Abgerufen am: 04.05.2017.

PREGL O. (1999): Handbuch der Geotechnik. Band 8, Verformbarkeit und Scherfestigkeit von Gesteinen. Wien: Eigenverlag des Institutes für Geotechnik.

PRINZ H. & STRAUSS R. (2011): Ingenieurgeologie. 5. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg.

QIN et al. (2004): Morphology and distribution of fully developed root systems of wheat and maize as affected by tillage systems. Zürich, Eidgenössische Techn. Hochsch., Diss.. Zürich.

RAMANN E. (1898): Der Einfluß verschiedener Bodendecken auf die physikalischen Eigenschaften der Böden. Springer Verlag. Berlin.

REWELL D. L. (1997): Bodenkunde – Untersuchungsmethoden und ihre Anwendungen. Springer Verlag. Berlin-Heidelberg.

Root length Determination (2017):  
<http://www.plantstress.com/methods/Root%20Methods%20PORTAL/Root%20length%20method%20OPSU.htm>. Abgerufen am: 15.05.2017.

SCHEFFER F. & SCHACHTSCHABEL P. (2010): Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg.

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

SCHROEDER, D. (1992): Bodenkunde in Stichworten. 5. Rev. U. erw. Aufl. von W.E.H. Blum, Hirt in der Gebr.-Borntraeger-Verl.-Buchhandl., Berlin, Stuttgart.

SCHROETTER S. (2015). Durchwurzelbarkeit – ein Indikator für die Bodenfruchtbarkeit, [https://www.bmel.de/DE/Landwirtschaft/Pflanzenbau/Boden/\\_Texte/Boden.html?docId=6819388](https://www.bmel.de/DE/Landwirtschaft/Pflanzenbau/Boden/_Texte/Boden.html?docId=6819388) (letzter Zugriff am 06.04.17)

SCHÜTZ Daniel (2013): Leibündeltypen. <http://biostudies.de/Leitb%C3%BCndeltypen> Abgerufen am: 24.03.2017.

SCHWARZ (1961) In: KUTSCHERA L. et al. (1997). Bewurzelung von Pflanzen in den Verschiedenen Lebensräumen, Botanische Arbeitsgemeinschaft am O.Ö. Landesmuseum, Linz.

SEIFERT, J. (2012): Die Gefahr kommt mit dem Wasser: Einfluss von Oberflächenabfluss und Infiltration auf die Böschungstabilität ungesättigter Hänge. Tec21 (138): 59-63.

SELBY M. J. (1993): Hillslope materials and processes. 2nd Edition., Oxford University Press Inc. Oxford.

SMITH A. L. et al. (2000): Root Methods. Springer Verlag. Berlin.

STADTGEMEINDE GROSS ENZERSDORF (2017) <http://www.gross-enzersdorf.gv.at/>. Abgerufen am: 07.03.2017.

STAHR K. et al. (2008): Bodenkunde und Standortlehre. Eugen Ulmer GmbH & Co, Stuttgart.

- STAHR K. et al. (2012): Bodenkunde und Standortlehre. 2. Auflage. Eugen Ulmer GmbH & Co, Stuttgart.
- STEINACHER, R.; MEDICUS, G.; FELLIN, W.; ZANGERL, C. (2009): The Influence of Deforestation on Slope (In-) Stability. Austrian Journal of Earth Sciences (102/2): 90-99.
- STIMM B., Blaschke H., Rothkegel W., Ruppert O. (2013): Stabilität hat tiefe Wurzeln. LWF aktuell 93, S. 9 – 14.  
[http://www.waldwissen.net/waldwirtschaft/waldbau/verjuengung/lwf\\_stabilitaet\\_wurzel/index\\_DE](http://www.waldwissen.net/waldwirtschaft/waldbau/verjuengung/lwf_stabilitaet_wurzel/index_DE).  
 Abgerufen am: 08.05.2017.
- TREMP H. (2005): Aufnahme und Analyse vegetationsökologischer Daten. Eugen Ulmer KG. Stuttgart.
- TURNER H., STREULE A. (1983): Wurzelwachstum und Sproßentwicklung junger Koniferen um Klimastress der alpinen Waldgrenze mit Berücksichtigung von Mikroklima, Photosynthese und Stoffproduktion. In: BÖHM W., KUTSCHERA L. LICHTENEGGER E. Wurzelökologie und ihre Nutzenanwendung. BVA Gumpenstein, Irding.
- VELTY S. (2017): Geologie. [https://www.bodenkunde-projekte.hu-berlin.de/boku\\_online](https://www.bodenkunde-projekte.hu-berlin.de/boku_online). Abgerufen am: 02.05.2017
- VIENNA GIS (2017): Wiener Bezirke mit Verortung der Versuchswirtschaft in Groß Enzersdorf, <https://www.wien.gv.at/stadtplan/>. Abgerufen am: 07.03.2017.
- WEAVER (1926): In: KUTSCHERA L. et al. (1997). Bewurzelung von Pflanzen in den Verschiedenen Lebensräumen, Botanische Arbeitsgemeinschaft am O.Ö. Landesmuseum, Linz.
- WILLE GEOTECHNIK (2014): Bedienungsanleitung APS Antriebs-, Prüf- und Steuertechnik GmbH Bedienungsanleitung - Leichter Scherfestigkeitsmesser FL 1407. Deutschland
- WinRHIZO (2009): Bedienungsanleitung. Regent Instruments Canada Inc. Canada.
- WinRHIZO (2011): Bedienungsanleitung. Regent Instruments Canada Inc. Canada.

## **NORMEN**

- DIN NORM 18 917 (1990): Vegetationstechnik im Landschaftsbau - Rasen und Saatarbeiten. Hrsg.: Normenausschuss Bauwesen im DIN Deutsches Institut für Normen e.V.
- DIN NORM 18 918 (1990): Vegetationstechnik im Landschaftsbau - Rasen und Saatarbeiten. Hrsg.: Normenausschuss Bauwesen im DIN Deutsches Institut für Normen e.V.
- DIN NORM 18035:2002-4: Sportplätze - Teil 4: Rasenflächen. Hrsg.: Normenausschuss Bauwesen im DIN Deutsches Institut für Normen e.V.

DIN NORM 18128:2002-12: Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung des Glühverlustes. Hrsg.: Normenausschuss Bauwesen im DIN Deutsches Institut für Normen e.V.

DIN NORM EN ISO 14 688:2004-2: Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden - Grundlagen für Bodenklassifizierungen. Hrsg.: Normenausschuss Bauwesen im DIN Deutsches Institut für Normen e.V.

DIN NORM ISO 18935:2016-10: Bild-Aufzeichnungsmaterialien - Farbbilder auf Papier - Verfahren zur Bestimmung der Wasserfestigkeit von Papierbildern in Innenräumen. . Hrsg.: Normenausschuss Bauwesen im DIN Deutsches Institut für Normen e.V.

DIN NORM ISO EN ISO 3310-1: 2001-09: Analysesiebe – Technische Anforderungen und Prüfung – Teil 1: Analysesiebe mit Metalldrahtgewebe (ISO 3310-1:2000). Hrsg.: Normenausschuss Bauwesen im DIN Deutsches Institut für Normen e.V.

FSV (Österreichische Forschungsgesellschaft Straße, Schiene und Verkehr (2008): RVS 08.03.04. Verdichtungsnachweis mittels dynamischen Lastplattenversuchs.

ÖNORM B 2506-3: 2016 01 01: Regenwasser-Sickeranlagen für Abläufe von Dachflächen und befestigten Flächen - Teil 3: Filtermaterialien - Anforderungen und Prüfmethode. Hrsg.: Österreichisches Normungsinstitut. Wien.

ÖNORM B 2606-1 (2009): Sportplatzbeläge; Teil 1: Naturrasen. Hrsg.: Österreichisches Normungsinstitut. Wien.

ÖNORM B 4412 (1974): Erd- und Grundbau; Untersuchung von Bodenproben; Korngrößenverteilung. Hrsg.: Österreichisches Normungsinstitut. Wien.

ÖNORM EN 12231: 2003 07 01: Sportböden - Prüfverfahren - Bestimmung der Bodendeckung bei Naturrasen. Hrsg.: Österreichisches Normungsinstitut. Wien.

ÖNORM L 1050 (2004): Boden als Pflanzenstandort – Begriffe und Untersuchungsverfahren. Hrsg.: Österreichisches Normungsinstitut. Wien.

ÖNORM L 1061-1 (2002): Physikalische Bodenuntersuchungen – Bestimmung der Korngrößenverteilung des Mineralbodens, Teil 1: Grobboden, Hrsg.: Österreichisches Normungsinstitut. Wien.

ÖNORM L 1061-2 (2002): Physikalische Bodenuntersuchungen – Bestimmung der Korngrößenverteilung des Mineralbodens, Teil 2: Feinboden, Hrsg.: Österreichisches Normungsinstitut. Wien.

RSM (Regel-Saatgut-Mischungen Rasen) (2016): mit Anhang : Pflanzen für Voranbau und Zwischenbegrünung. Regelwerksausschuss (RWA). Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. (FLL). Bonn.

## 8.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Ausschnitt der Pflanzentaxonomie.....	9
Abbildung 2:	Organisation des Kormus bei einer monokotylen und dikotylen Pflanze (verändert nach EHA & DELUCA, 2017) .....	9
Abbildung 3:	Anordnung der Leitbündel im Querschnitt (links) kollateral geschlossenes, (rechts) kollateral offenes Leitbündel (verändert nach SCHÜTZ, 2013) .....	11
Abbildung 4:	Anordnung der Leitbündel im Querschnitt durch den Stängel (verändert nach NULTSCH, 2001).....	11
Abbildung 5:	Entwicklung der Wurzel (verändert nach HIETZ et al., 2009).....	13
Abbildung 6:	Bau der Wurzel schematisch dargestellt (MERBACH et al., 2001) .....	14
Abbildung 7:	Querschnitt der Wurzel (verändert nach Bibliographisches Institut GmbH, 2017) ..	15
Abbildung 8:	Leitbündeltypen in Wurzeln: (A) diarch; (B) triarch; (C) tetrarch; (D) polyarch (verändert nach DÖRKEN, 2010) .....	15
Abbildung 9:	Seitenwurzelbildung ((MERBACH et al., 2001).....	16
Abbildung 10:	Sekundäres Dickenwachstum einer Wurzel mit tetrarch angeordneten Leitbündel (BRECHNER et al., 2001) .....	16
Abbildung 11:	Schema einer Wurzelzelreaktion der Statocyten durch Gravitropismus (SCHOPFER & BRENNICKE, 2010) .....	19
Abbildung 12:	Wurzelbild von (1) dikotylen und (2) monokotylen Pflanzen (BRECHNER et al., 2001) 20	
Abbildung 13:	Wurzeltypen nach KUTSCHERA & LICHTENEGGER (1997) .....	21
Abbildung 14:	Schematische Darstellung der Wasserspeicherung (hellgrau schraffiert) von unterschiedlichen Böden nach einem Regenfall von 50 mm in ariden Gebieten (verändert nach KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2002) .....	24
Abbildung 15:	Einteilung der Bodenarten (verändert nach AD-HOC-AG BODEN, 2005).....	29
Abbildung 16:	Sicherheit gegen Abrutschen durch Änderung der Bodeneigenschaften und Verankerung durch Wurzeln (SELBY, 1993).....	38
Abbildung 17:	Wiener Bezirke mit Verortung der Versuchswirtschaft in Groß Enzersdorf (VIENNA GIS, 2017) 40	
Abbildung 18:	Niederschlag der Wetterstation Raasdorf von Anfang Juli bis Ende November 2016 (verändert nach DNW BOKU, 2016b) .....	41

Abbildung 19: Temperatur der Wetterstation Raasdorf von Anfang Juli bis Ende November 2016 (verändert nach DNW BOKU, 2016b) .....	42
Abbildung 20: Grundriss des Versuchsaufbaus in Meter dargestellt .....	43
Abbildung 21: Schematischer Schnitt durch den Versuchsaufbau .....	44
Abbildung 22: Abschälen der oberen Vegetationsschicht (12.07.2016) .....	44
Abbildung 23: Herstellung der Dainageschicht (12.07.2016) .....	44
Abbildung 24: Bau der Rahmenkonstruktion (12.07.2016) .....	45
Abbildung 25: Verstärkte Rahmenkonstruktion(12.07.2016) .....	45
Abbildung 26: Ansaat der Gräser-Kräuter-Leguminosen-Saatgutmischung (15.07.2016) .....	46
Abbildung 27: Anwalzen des ausgebrachten Saatguts (15.07.2016).....	46
Abbildung 28: Bewässern der fertigen Versuchsanlage (15.07.2016).....	46
Abbildung 29: Fertiggestellte Versuchsanlage mit (li) V 1 - schluffig und (re) V 2 - sandig (15.07.2016).....	46
Abbildung 30: Arbeitsschritte bei der Entnahme und der Untersuchung der unterirdischen Biomasse mittels Bohrkern-Methode (verändert nach MURACH 1984, in POLOMSKI & KUHN 1998) .....	50
Abbildung 31: Handsonde (Skizze) (verändert nach BURCH, 2016) .....	51
Abbildung 32: Bodenbohrer bei der Entnahme des Bohrkerns (30.11.2016) .....	51
Abbildung 33: Frischer Bohrkern mit oberirdischer Biomasse (30.11.2016).....	51
Abbildung 34: Versuchsfläche zum Zeitpunkt der Entnahme der Bohrkerns (30.11.2016).....	51
Abbildung 35: Senkrechte Projektion der Versuchsvariante 2 -sandig (13.09.2016).....	53
Abbildung 36: Analysiertes Bild (Versuchsfläche 2 - sandig) (13.09.2016).....	53
Abbildung 37: Oberirdische Biomasse zum Trocknen im Trockenschrank.....	53
Abbildung 38: Bohrkernabschnitt.....	54
Abbildung 39: Grobe Auswaschung des Bohrkerns.....	54
Abbildung 40: Feinere Auswaschung des Bohrkerns.....	55
Abbildung 41: Ausgewaschene Wurzeln und die verwendeten Materialien .....	55
Abbildung 42: Darstellung der Bearbeitungsfläche von WinRHIZO (WinRHIZO™, 2009) .....	56
Abbildung 43: Wurzelscan mithilfe eines Flachbrettscanners.....	57
Abbildung 44: Wurzelscan mit WinRHIZO 2009 .....	57
Abbildung 45: Wurzelscan und Analyse mit WinRHIZO 2009.....	57

Abbildung 46:	Nasssiebung (14.03.2017) .....	60
Abbildung 47:	Siebturm mit Trockenschrank (15.03.2017) .....	60
Abbildung 48:	Siebturm auf Rüttelplatte (15.03.2017) .....	60
Abbildung 49:	Aräometersuch (25.03.2017) .....	61
Abbildung 50:	Messzylinder für Sedimentationsanalyse (PRINZ & STRAUSS, 2011).....	61
Abbildung 51:	Beispiele von Körnungslinien typischer Bodenarten (PÖSCHL, 2017) .....	62
Abbildung 52:	Säulen zur Messung der Wasserspeicherkapazität und des Porenvolumens .....	64
Abbildung 53:	Schichtweiser Einbau des Substrates und Drainschicht (KOS, 2017) .....	64
Abbildung 54:	Säulenversuch mit Wasser aufgefüllt (KOS, 2016) .....	64
Abbildung 55:	Muffelofen.....	66
Abbildung 56:	Exsikkator .....	66
Abbildung 57:	Bodenproben (li) nach dem Verglühen (re) vorm Verglühen.....	66
Abbildung 58:	Flügelsonde zur Bestimmung der Scherfestigkeit .....	67
Abbildung 59:	Versuchsfläche nach der ersten Aussaat und ohne regelmäßiger Bewässerung (25.08.2016).....	70
Abbildung 60:	Erste Aufnahme zur Deckungsgradermittlung mit Rechtecksregner im vorderen Bereich des Bildes (13.09.2016) .....	70

### 8.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einteilung der Wurzeln nach ihrem Durchmesser (KÖSTLER et al., 1968) .....	12
Tabelle 2: Einteilung der Wurzeln nach ihrem Durchmesser laut POLOMSKI & KUHN (1998).....	12
Tabelle 3: Pflanzenansprüche und Standorteigenschaften (STAHR et al., 2008).....	22
Tabelle 4: Einteilung der Kornfraktion in Anlehnung auf ihren Äquivalentdurchmesser (VELTY, 2017) .....	30
Tabelle 5: Durchwurzelbarkeit der Böden (BLUM, 2012) .....	35
Tabelle 6: Unterschiedliche Wurzelparameter (SMITH et. al., 2000) .....	36
Tabelle 7: Mischverhältnis und Komponenten der Substratvarianten .....	45
Tabelle 8: ReNatura <sup>®</sup> S8 Gumpensteiner Schotter- und Parkplatzrasenmischung für mittlere und höhere gelegene Standorte – Gräseranteil (KÄRNTNER SAATBAU, 2014).....	47
Tabelle 9: ReNatura <sup>®</sup> S8 Gumpensteiner Schotter- und Parkplatzrasenmischung für mittlere und höhere gelegene Standorte – Kräuteranteil (KÄRNTNER SAATBAU, 2014).....	47
Tabelle 10: Zeitlicher Ablauf der Arbeitsschritte.....	48
Tabelle 11: Übersicht von Untersuchungsparametern und Methoden .....	49
Tabelle 12: Ungleichförmigkeitszahl nach PRINZ & STRAUSS (2011).....	62
Tabelle 13: Bodengruppen mit Porenvolumen (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2010) .....	63
Tabelle 14: Mindest-Probenmenge bei Glühverlustbestimmung (nach DIN 18128, 2002) .....	65
Tabelle 15: Bodeneinteilung nach % Anteil an organischer Substanz (EN ISO 14 688 -2:2004) .....	66
Tabelle 16: Bodenbestandteile und Bodenbezeichnungen der Versuchsvariante 1 - schluffig und 2 - sandig.....	80
Tabelle 17: Ungleichförmigkeitszahl der Sieblinien (Versuchsvariante 1 - schluffig und 2 - sandig)....	81
Tabelle 18: gravimetrische Wasserspeicherkapazität der Versuchsvariante 1 - schluffig .....	83
Tabelle 19: gravimetrische Wasserspeicherkapazität der Versuchsvariante 2 - sandig .....	83
Tabelle 20: Wasserspeicherkapazität der Versuchsvariante V 1 - schluffig.....	83
Tabelle 21: Wasserspeicherkapazität der Versuchsvariante V 2 - sandig .....	83
Tabelle 22: Organische Bestandteile der Versuchsvariante 1 - schluffig .....	84
Tabelle 23: Organische Bestandteile der Versuchsvariante 2 - sandig .....	84
Tabelle 24: Oberflächenscherfestigkeit der Versuchsvariante 1 - schluffig.....	85
Tabelle 25: Oberflächenscherfestigkeit der Versuchsvariante 2 - sandig .....	85
Tabelle 26: Zusammenfassende Ergebnisdarstellung .....	87

## 8.4 Diagrammverzeichnis

Diagramm 1: Deckungsgradanalyse der Versuchsvarianten (V 1 - schluffig und V 2 - sandig) .....	68
Diagramm 2: Maximale Sprosslänge der Versuchsaufbauten (V 1 - schluffig und V 2 - sandig).....	70
Diagramm 3: Trockengewicht – oberirdische Biomasse der Versuchsaufbauten (V 1 - schluffig und V 2 - sandig) .....	71
Diagramm 4: Wurzelvolumen der Versuchsvarianten (V 1 - schluffig und V 2 - sandig) .....	73
Diagramm 5: Root length densitiy (RLD) der Versuchsaufbauten (V 1 - schluffig und V 2 - sandig).....	74
Diagramm 6: Trockengewicht – unterirdische Biomasse des Versuchsaufbaues V 1 - schluffig .....	75
Diagramm 7: Trockengewicht – unterirdische Biomasse des Versuchsaufbaues V 2 - sandig .....	75
Diagramm 8: root weight densitiy (RWD) der Versuchsaufbauten (V 1 - schluffig und V 2 - sandig)...	76
Diagramm 9: Biomasse und Wurzel-Spross-Verhältnis der Versuchsvarianten V 1 - schluffig und V 2 - sandig.....	78
Diagramm 10: Kornverteilungskurve der Versuchsvariante 1 – schluffig .....	79
Diagramm 11: Kornverteilungskurve der Versuchsvariante 2 - sandig.....	80
Diagramm 12: Porenvolumen der Versuchsvarianten V 1 - schluffig und V 2 - sandig.....	82
Diagramm 13: Gegenüberstellung der Wasserspeicherkapazitätsmessungen.....	84



## Lebenslauf

**LISA FICHTENBAUER, BSC**

Geboren am 21.07.1991



## Studienverlauf

2014 - heute

**Universität für Bodenkultur; 1180 Wien**

Masterstudium: Landschaftsarchitektur und Landschaftsplanung

2013 - 06/2017

**Hochschule für Agrar- und Umweltpädagogik; 1130 Wien**

Bachelorstudium: Agrarpädagogik

Abschluss: Bachelor of Education

2010 - 2013

**Universität für Bodenkultur; 1180 Wien**

Bachelorstudium: Landschaftsarchitektur und Landschaftsplanung

Abschluss: Bachelor of Science: „ausgezeichneter Erfolg“

## Schul- und Berufsbildung

2009 - 2010

**Berufsreifeprüfungs- und Studienvorbereitungslehrgang;**

2020 Hollabrunn

Abschluss: Berufsreifeprüfung: „ausgezeichneter Erfolg“

2005 - 2009

**Gartenbaufachschule Langenlois; 3550 Langenlois**

Abschluss: GärtnerIn FacharbeiterIn: : „ausgezeichneter Erfolg“

## Praktika und Arbeitstätigkeiten

2016 - heute

**Universität für Bodenkultur; Studentische MitarbeiterIn**

2013 - heute

**Universität für Bodenkultur; Tutorin der LV Baumschulwesen**

05/2014 - 09/2014

**Universität für Bodenkultur; GärtnerIn**

11/2015

**GFBS Ehrental; vierwöchiges Praktikum als PädagogIn**

04/2015

**BBK Waidhofen/Thaya; vierwöchiges Praktikum als BeraterIn**

Sommer 2015/2016

**KinderUni Tulln und Wien**

Sommer 2012/2013

**Gärtnerei Schwaighofer; Garten- und LandschaftsgestalterIn  
Baumschule Verkauf**