

# HANDBUCH WURZELANALYSE



**Universität für  
Bodenkultur**

Department für  
Bautechnik und  
Naturgefahren

Institut für  
Ingenieurbiologie und  
Landschaftsbau



2017/2018

Unterrichtsbehelf zum Projekt PFLANZEN.BAU.WERKE

Das vorliegende Unterrichtsmaterial wurde im Rahmen des Projekts „PFLANZEN.BAU.WERKE. Pflanzen, deren bautechnologischen Fähigkeiten und Einsatz in der ingenieurbiologischen Forschung & Praxis“, gefördert durch die FFG Netzwerk-Forschung-Schule 5. Ausschreibung Talente regional im Rahmen des Förderschwerpunkts Talente, erstellt und soll Lehrenden und SchülerInnen als Nachschlagewerk zu Pflegemaßnahmen von dienen.

*Erstellt von: DI Alexandra Medl*

# Inhalt

<b>EINLEITUNG</b> .....	<b>2</b>
<b>1. GRUNDLAGEN</b> .....	<b>3</b>
1.1 Die Wurzel .....	3
1.1.1 Funktion der Wurzel .....	4
1.1.2 Wurzelanatomie.....	4
1.1.3 Wurzelmorphologie .....	5
1.1.4 Wurzelarchitektur.....	6
1.1.5 Umwelteinflüsse auf die Wurzelentwicklung.....	7
1.1.6 Exkurs: Wurzeln als Schadensverursacher in Stadtgebieten .....	9
1.2 Der Boden.....	10
1.2.1 Der Boden als Pflanzenstandort.....	10
1.2.2 Bodenverdichtung.....	11
1.2.3 Wasser und Boden.....	11
1.2.4 Wurzel und Boden .....	11
<b>2. WURZELFORSCHUNG</b> .....	<b>12</b>
1.3 Rhizobox zur Untersuchung der Wurzelarchitektur .....	12
1.3.1 Vor- und Nachteile.....	14
1.3.2 Material und Bauweise.....	14
1.4 Aufnahmemethoden.....	15
1.4.1 Abzeichnen.....	15
1.4.2 Fotografieren.....	15
1.4.3 Scannen .....	15
1.5 Auswertungsmethoden (Software) .....	16
1.5.1 ImageJ (Open-Access).....	17
1.5.2 SmartRoot (Open-Access).....	18
1.5.3 GiA Roots (Open Access).....	19
1.5.4 WinRHIZO (Régent Instrument Inc., Quebec, Canada).....	20
<b>3. GIA ROOTS: SCHRITT FÜR SCHRITT</b> .....	<b>22</b>
<b>4. LITERATURVERZEICHNIS</b> .....	<b>32</b>

# Handbuch Wurzelanalyse

## UNTERRICHTSBEHELF ZUM PROJEKT PFLANZEN.BAU.WERKE

### EINLEITUNG

Ziel des Talente regional Projekts PFLANZEN.BAU.WERKE ist das Veranschaulichen und Sichtbarmachen der physiologischen Eigenschaften von Pflanzen und deren positive Effekte auf den Lebenszyklus ingenieurbioologischer Baumaßnahmen im naturräumlichen Kontext. Um diesem Ziel gerecht zu werden, werden im Zuge von an den Schulen durchgeführten Forschungsworkshops zum Thema ‚Wurzel‘ gemeinsam mit den teilnehmenden SchülerInnen so genannte Rhizoboxen mit Substrat befüllt und mit Weidensteckhölzern bepflanzt. Erklärtes Ziel ist es, das Wurzelwachstum der Pflanzen über einen Zeitraum von mehreren Monaten beobachten und analysieren zu können.

Der vorliegende Unterrichtsbehelf enthält grundlegende Informationen zum Thema ‚Wurzel‘ und detaillierte Beschreibungen verschiedenster Software-Programme zur Auswertung der im Zuge der durchgeführten Versuche erhaltenen Ergebnisse. Um Lehrenden und SchülerInnen eine Analyse der Wurzelentwicklung auch ohne Unterstützung zu ermöglichen, befindet sich im ‚Handbuch Wurzelanalyse‘ auch eine detaillierte Schritt-für-Schritt Anleitung des kostenfrei zum Download zur Verfügung stehenden Auswertungsprogramms GiA Roots (<http://giaroots.biology.gatech.edu/>).

Die ausgearbeiteten Texte wurden den folgenden, am Institut für Ingenieurbioogie und Landschaftsbau erstellten, wissenschaftlichen Arbeiten entnommen:

**DORRIGHI, P.** (2016): Die Bewurzelung von Steckhölzern der Purpur-Weide (*Salix purpurea*) in Abhängigkeit unterschiedlicher Bodenkorngrößen. Masterarbeit. Institut für Ingenieurbioogie und Landschaftsbau, Universität für Bodenkultur, Wien.

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

**PFLERGER, J.** (2014): Verwendung von Rhizotronen zur Beobachtung der Wurzelarchitektur von Weidensteckhölzern. Aufnahme- und Auswertungsmethoden von Rhizotronbildern. Masterarbeit. Institut für Ingenieurbioogie und Landschaftsbau, Universität für Bodenkultur, Wien.

# 1. GRUNDLAGEN

Bei der Ingenieurbiologie handelt es sich um eine technisch-biologische Fachdisziplin, welche die Eigenschaften von Pflanzen zur Sicherung von Bauwerken und Nutzungen verwendet und dabei gleichzeitig eine ästhetische Aufwertung des Landschaftsbildes darstellt. Pflanzen und Pflanzenteile werden in der Ingenieurbiologie als lebende Baustoffe so eingesetzt, dass ihre Entwicklung in engem Zusammenhang mit Boden und Gestein eine dauerhafte Sicherung gegen Erosion bietet (E.F.I.B, 2015).

Bereits die alten Römer wussten die Vorzüge der Ingenieurbiologie zu schätzen und reparierten Uferabbrüche mit Raubäumen. Auch Leonardo da Vinci hat die wesentliche Rolle der Pflanzenwurzeln im Zuge von Uferstabilisierungsmaßnahmen bereits richtig erkannt:

*„Die Wurzeln der Weiden lassen die Böschungen der Kanäle nicht zerfallen und die Zweige der Weiden, die in der Querrichtung, also auf die Breite der Böschungen gesetzt und später unten beschnitten werden, werden jedes Jahr dicker und so bekommst Du ein lebendiges Ufer aus einem Stück“ (SCHLÜTER, 1984).*

Ingenieurbiologische Baumaßnahmen entfalten ihre Wirkung – im Gegensatz zu konventionellen Bauwerken aus Stahl, Beton o.ä. – erst im Laufe der Zeit mit fortschreitendem Wachstum und voranschreitender Entwicklung. Aus diesem Grund ist es wichtig sich bewusst zu machen, dass die Fertigstellung der Bauarbeiten an einer ingenieurbiologischen Baumaßnahme keineswegs mit der Fertigstellung des Bauwerks gleichzusetzen ist. In der Lebensphase unmittelbar nach Fertigstellung eines ingenieurbiologischen Bauwerks werden stabilisierende Wirkungen primär durch den Einsatz von Hilfsstoffen (Holzpiloten, Stahlnägel, Geotextilien, etc.) erreicht und allmählich von der Vegetation übernommen. Es ist daher von außerordentlicher Wichtigkeit bereits von Anfang an die Pflanzenentwicklung beeinflussende Faktoren (Umgebungstemperatur, Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit, Strahlungseinflüsse, Bodensubstrat, etc.) zu berücksichtigen um bestmögliche Wachstumsbedingungen für die Pflanzen zu schaffen.

**In der Ingenieurbiologie finden insbesondere Pflanzen Verwendung, die mit ihrem Wurzelwerk den Boden festigen und stabilisieren sowie mit ihren Trieben und Blättern eine schützende Vegetationsdecke bilden. Dadurch bilden sie einen wirkungsvollen Schutz vor Oberflächenerosion.**

## 1.1 Die Wurzel

Wurzeln sind in der Regel unterirdische Organe der Pflanzen und dienen der Aufnahme von Wasser und Nährsalzen, der Verankerung des Pflanzenkörpers im Boden, zur Speicherung von Reservestoffen und als Ort für Synthesen (LÜTTGE & KLUGE, 2012). Die Versorgung von Wasser und Nährstoffen wird durch eine Vergrößerung der wasseraufnehmenden Oberfläche – durch Bildung von Wurzelhaaren – erleichtert. Um eine unerwünschte Wasserabgabe zu vermeiden ist die Wurzel vom äußeren Abschlussgewebe (Hypodermis, Exodermis) geschützt KÜCK & WOLFF 2009. Wurzeln weisen unterschiedliche Funktionen für Vitalität, Wachstum und Standsicherheit der Pflanze auf und sind mit besonderen anatomischen, morphologischen und physiologischen Eigenschaften versehen. Damit diese Funktionen erfolgreich erfüllt werden können, müssen Wurzeln in der Lage sein, den anstehenden Boden bzw. das umgebende Substrat zu erkunden. Außerdem haben sie die Fähigkeit, sich die jeweiligen Standortbedingungen unterzuordnen und sich an Veränderungen anzupassen. (BALDER, 1998)

Die Standortbedingungen können das Erscheinungsbild der Wurzeln stark charakterisieren (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2002). Die wichtigsten Faktoren sind dabei Bodentemperatur, Bodenfeuchte, Bodenluft,

Nährstoffverhältnisse, Schadstoffeinträge sowie Poren- und Skelettanteile. Durch endogene und exogene Faktoren (Wind, Schnee, Erosion) wird das Wurzelwachstum beeinflusst, so dass sich unterschiedliche Wurzelsysteme bilden. (BALDER, 1998).

**Wurzel, Sprossachse und Blatt bilden die drei Grundorgane von Pflanzen.**

### 1.1.1 Funktion der Wurzel

Die primäre Funktion der Wurzel ist die Speicherung der zeitweise im Überschuss gebildeten Assimilate vom Spross. Alle weiteren Aufgaben sind aufgrund der Bedeutung der primären Funktion deren Folgeerscheinung. (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2002). Dabei handelt es sich um:

- 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 dem 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).

**Die wichtigsten Aufgaben der Wurzel sind die Verankerung der Pflanze im Boden sowie die Aufnahme und Weiterleitung von Wasser und Nährstoffen aus dem Boden.**

### 1.1.2 Wurzelanatomie

Die äußerste Wurzelschicht bildet die Rhizodermis, die keine Abschlussfunktion übernimmt, sondern die Aufnahme von Substanzen aus dem Boden ermöglicht. Sie ist ein schleimiges Gewebe, das die Durchdringung des Bodens beim Wachstum der Wurzel erleichtert. Aus ihr gehen die Wurzelhaare hervor. (BALDER, 1998) Diese dienen zur Oberflächenvergrößerung und somit zur besseren Aufnahme von Wasser und Nährstoffen. Die Lebensdauer der Wurzelhaare beträgt nur wenige Tage. Unter der Rhizodermis liegt die primäre Rinde (Rindenparenchym). Sie wird von außen hin von der Exodermis und nach innen von der Endodermis umgeben. Wasser und gelöste Stoffe können bis zur Endodermis eindringen, die ab dort eine Sperre für den Stofftransport belastenden Substanzen darstellt. (HIETZ et al., 2009).

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

Das Rindenparenchym im Inneren der Wurzel wird äußerlich durch Exodermis und Rhizodermis begrenzt. Es erstreckt sich bis zum Zentralzylinder von welchem es durch die Endodermis abgetrennt wird.

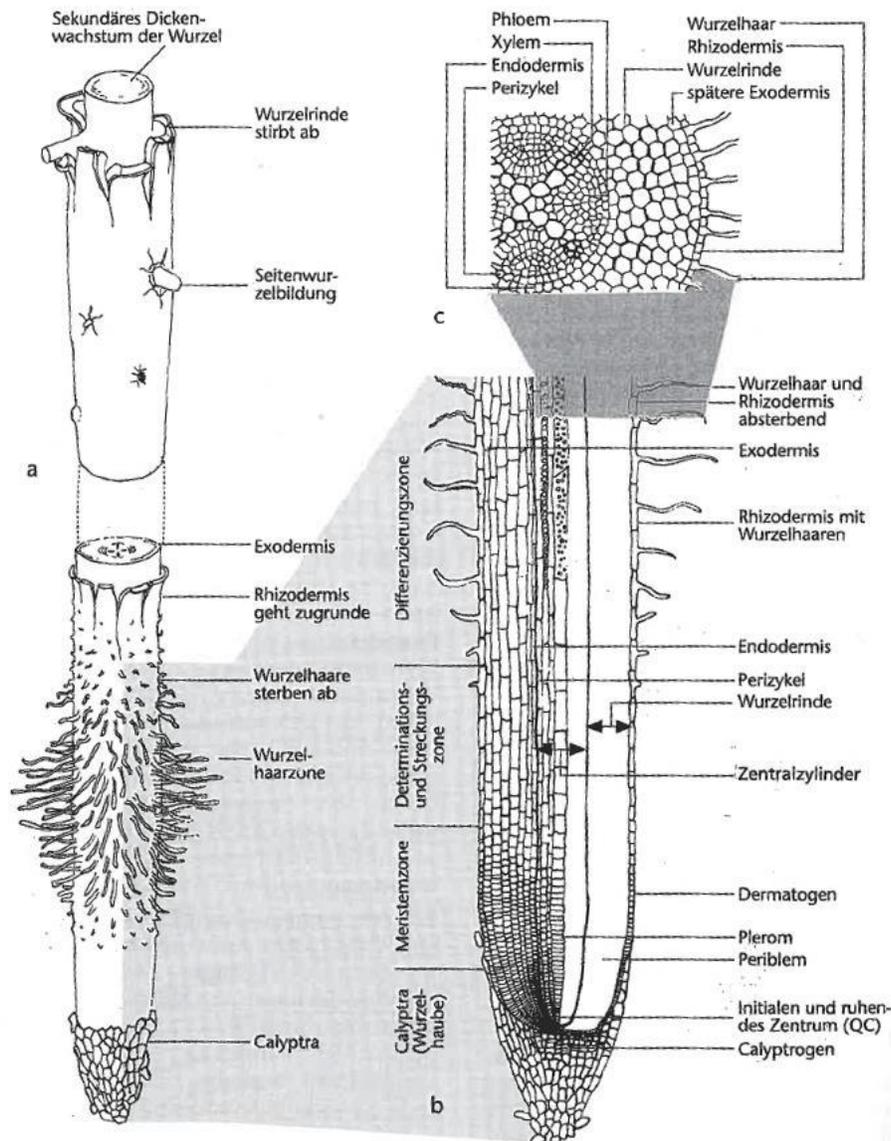


ABBILDUNG 1: ÜBERSICHT DES ANATOMISCHEN AUFBAUS DER WURZEL IM LÄNGS- UND QUERSCHNITT (KULL 2000)

### 1.1.3 Wurzelmorphologie

BALDER (1998) unterscheidet die Wurzeln nach ihrer Funktion in Skelett- oder Strukturwurzeln, Faserwurzeln und Wurzelhaare. Zu den Skelettwurzeln zählen alle sekundär verdickten, meist langlebigen Wurzeln ohne Sorptionsfähigkeit (Wasseraufnahmefähigkeit). Faserwurzeln sind junge Wurzeln die zur Aufnahme von Wasser, Nährstoffen und Sauerstoff dienen, sie werden dabei von kurzlebigen Wurzelhaaren unterstützt. Im

späteren Verlauf entwickeln sich Faserwurzeln zu Strukturwurzeln. Des Weiteren ist eine Einteilung nach ihrem Durchmesser möglich. (BALDER, 1998).

TAB. 1: EINTEILUNG DER WURZELN NACH IHREM DURCHMESSER (KÖSTLER ET AL., 1968)

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

### 1.1.4 Wurzelarchitektur

Wie effizient die einzelnen Wurzelfunktionen sind, hängt von den Anforderungen der oberirdischen Pflanze, dem Wurzelsystem und unter anderem der Gestalt der Wurzeln ab. Unter Wurzelarchitektur werden die räumliche Verteilung und die Verzweigungsdichte der Wurzeln bezeichnet. Sie beschreibt die Struktur des Wurzelsystems und der Entwicklung der Achsen. Die Flexibilität der unterirdischen Organe ermöglicht es ihnen, sich an die Heterogenität des Bodens anzupassen und unterschiedlichste Bereiche des Erdreiches zu erschließen.

Ein wesentlicher Faktor, welcher die Verteilung der Wurzeln im Boden beeinflusst, sind die Bodenporen. Je größer die Poren, desto geringer ist der Eindringwiderstand und desto leichter ist die Fortbewegung für die Wurzel (POLOMSKI & KUHN, 1998).

Welche Auswirkungen eine Verdichtung des Bodens auf Wurzelwachstum und Wurzelarchitektur haben kann, wird durch die nachfolgenden Abbildung 2 veranschaulicht.

Abbildung 2 (links) zeigt die Wurzelarchitektur einer auf Lockersediment-Braunerde gewachsenen *Salix purpurea* (Purpur Weide) sehen. Die senkrecht nach unten wachsende Polwurzel verjüngt sich rasch und bildet Seitenwurzeln aus. Die kräftig ausgebildeten Seitenwurzeln streben bogenförmig nach unten. Diese Pflanze besitzt einen hohen Anteil an Feinwurzeln von oben bis in die Tiefe.

Rechts ist ebenfalls die Wurzelarchitektur einer *Salix purpurea* zu erkennen, jedoch ist diese Pflanze auf von schweren Fahrzeugen verdichtetem Boden gewachsen. Die Verdichtung verursacht ein flurnahes Wachstum der Polwurzel und eine eher schwache Ausbildung von Wurzeln in der Tiefe (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2002).

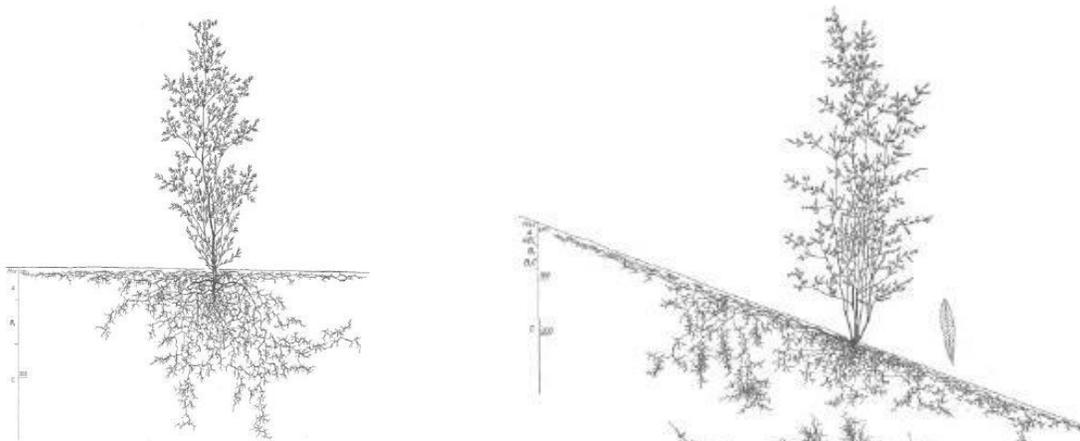


ABBILDUNG 2: WURZELARCHITEKTUR DER PURPUR-WEIDE AUF LOCKERSEDIMENT-BRAUNERDE (LINKS) UND VERDICHTETEM BODEN (RECHTS) (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2002)

### 1.1.5 Umwelteinflüsse auf die Wurzelentwicklung

Jede Pflanze versucht zunächst ihre Wurzeln in ihrer arteigenen Weise zu entwickeln (vgl. KRAUS 1914 zitiert in KUTSCHERA, 1960). Die erblichen Merkmale können sich an optimalen Standorten unter naturnahen Konkurrenzbedingungen am besten ausbilden. Durch unterschiedliche Umwelteinflüsse oder nicht optimale Standortfaktoren können sich größere Abwandlungen der arteigenen Wurzelform ergeben. Die folgenden Erläuterungen der verschiedenen Umwelteinflüsse stehen sehr eng in Zusammenhang und können unterschiedliche Auswirkungen auf die Wurzelbildung haben (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2013).

#### 1.1.5.1 LICHT

Bisher konnte der direkte Einfluss des Lichtes auf das Wurzelwachstum nicht eindeutig belegt werden. Indirekt wird das Wurzelwachstum jedoch durch Photosynthese beeinflusst. Pflanzen bilden nach Untersuchungen von COMBES (1946), JOHANSSON (1927) und RÖHRIG (1966) bei einer erhöhten Lichtzufuhr im Vergleich zur Sprossachse eine erhöhte Wurzelmasse und bei geringerer Lichtzufuhr weniger Wurzelmasse. Durch den erhöhten Lichteinfluss kommt es zu einem Assimilateüberschuss, welcher das Wurzelwachstum fördert. 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 (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2013).

#### 1.1.5.2 WÄRME

Für die Tiefgründigkeit der Wurzel ist die Eindringtiefe der Temperatur in den Boden ein wesentliches Maß. Die größten Wurzeltiefen werden nach KUTSCHERA & LICHTENEGGER (2002) erreicht, „wenn Licht und Wärme nach Ausmaß und Dauer der Entwicklung sowie stärkere Schwankungen von Temperatur und relativer Feuchte das Wachstum und den positiv geotropen Verlauf der Wurzeln fördern“. Demzufolge ist der Wurzeltiefgang wesentlich größer bei tiefreichender Bodenerwärmung und bei weniger tiefreichender Bodenerwärmung niedriger (Abb. 3). Ein schnellerer Ausgleich der Wärmeschwankung kann auch durch eine höhere Bodenfeuchte bewirkt werden. Die Wurzeln reichen daher bei zunehmender Feuchtigkeit weniger tief in den Boden (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2002). Die für das Wurzelwachstum untere Temperaturgrenze liegt bei 2 - 5 °C (TURNER & STREULE, 1983).

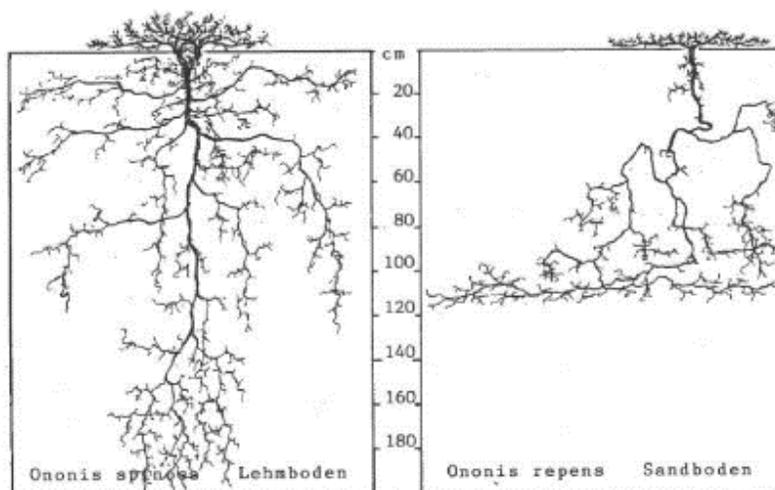


ABBILDUNG 3: UNTERSCHIED IN DER BEWURZELUNGSTIEFE BEI EINEM TIEFGRÜNDIG ERWÄRMTEM LEHMBODEN (LINKS) UND EINEM WENIGER TIEFGRÜNDIG ERWÄRMTEM SANDBODEN (RECHTS) (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2002)

### 1.1.5.3 WASSER

Die Verfügbarkeit von Wasser ist stark abhängig vom Standort, der Exposition der Art und Textur des Bodens und dem Einfluss von Temperatur. Allgemein bekannt ist eine unterschiedliche Vegetationsbildung bei annähernd gleichen Jahresniederschlägen und unterschiedlicher mittlerer Jahrestemperatur. Die Wasseraufnahme der Wurzeln erfolgt nur, solange die Saugkräfte der Wurzel größer sind als die des Bodens. Ist dies nicht mehr der Fall, so schützt sich die Wurzel, indem sie die nicht aktiv Wasser aufnehmenden Wurzelabschnitte verkorken lässt. Die wasseraufnehmenden Abschnitte werden abgestoßen und können bei frischem Wasserangebot schnell neu gebildet werden. Die wechselnde Wasserverfügbarkeit hat somit einen großen Einfluss auf Anzahl an Feinwurzeln. Die Anpassung von Pflanzen an trockene Standorte kann sich in unterschiedliche Strategien zeigen. Eine ökologisch bedeutsame Anpassung ist neben der stärkeren Verzweigung, der Tiefenstrebung oder der Steigerung der Saugkräfte von Wurzeln die relative Vergrößerung der Wurzelmasse. Das heißt, dass sich das Spross-Wurzelverhältnis zugunsten des Wurzelanteils ändern (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2013).

Die Verteilung der Wurzelmasse übt eine stark regulierende Wirkung auf den Wasserhaushalt aus. Die Wurzelmasse breitet sich bei reichlicher Oberbodenfeuchte, geringer Verdunstung oder bei hoch anstehendem Grundwasser fast nur in den am stärksten erwärmten oberen Bodenschichten aus. Bei abnehmender Bodenfeuchte und tieferreichender Erwärmung reicht die Bewurzelung weiter in die Tiefe, allerdings bleibt die Hauptwurzelmasse in den oberen Bodenschichten. An halbtrockenen bzw. wechsellackenen Standorten mit kontinentaler Prägung ergibt sich vornehmlich bei Polwurzelpflanzen eine Dreiteilung des Wurzelkörpers, ähnlich einer Hantel. Das Verhältnis zwischen diesen drei Wurzelgruppen ist bei den einzelnen Arten unterschiedlich und deren Ausdehnung wird hauptsächlich vom Klima geprägt, in der Regel von der Tiefe der Bodenerwärmung. So wird bei höherer Trockenheit das Wasser den tieferen Schichten entnommen und den oberen zugeführt (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2013).

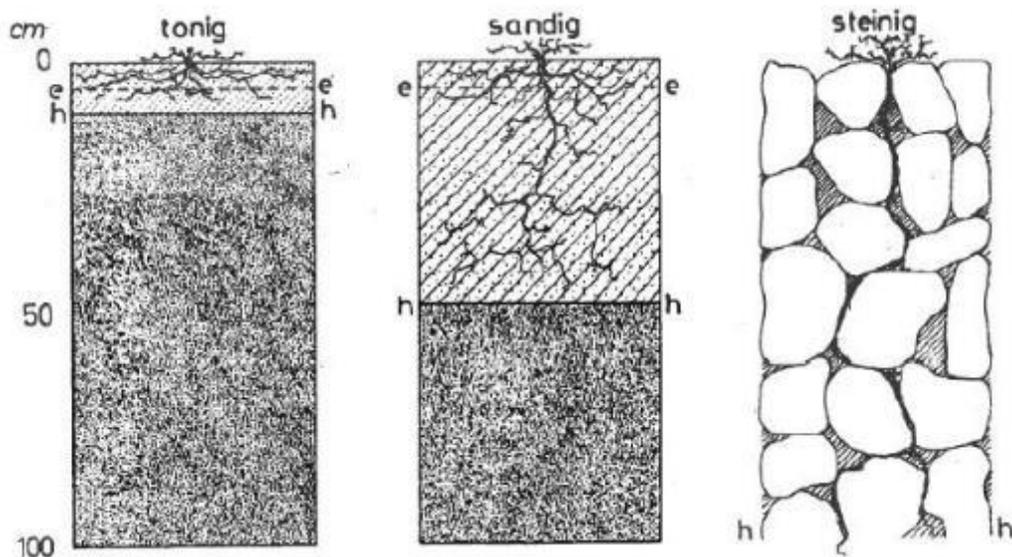


ABBILDUNG 4: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER WASSERSPEICHERUNG VON UNTERSCHIEDLICHEN BÖDEN NACH EINEM REGENFALL VON 50 MM IN ARIDEN GEBIETEN (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2002)

### 1.1.5.4 LUFT

Für das Wachstum der Wurzel ist eine ausreichende Versorgung mit Luft von großer Bedeutung. Vor allem für die gegenüber Sauerstoffmangel sehr empfindlichen Wurzelspitzen und die anschließenden aktiv

wasseraufnehmenden Wurzelabschnitte. Eine unzureichende Luftversorgung kann schnell zum Faulen der Wurzel führen, aber auch zu einer hohen Anreicherung von CO<sub>2</sub> und anderen, für das Wurzelwachstum schädlichen Stoffe. Auch hier gibt es unterschiedliche Anpassungsstrategien der Pflanzenwurzeln um eine ausreichende Versorgung an Sauerstoff zu gewährleisten. Empfindliche Arten versuchen das Vordringen in sauerstoffarme Bodenschichten zu vermeiden oder sie weichen zunächst seitlich aus und wachsen wieder in Richtung der Bodenoberfläche. Eine typische Tellerwurzelbildung ist die Folge. Andere wirken durch stärkere Verzweigung der Wurzeln in sauerstoffreichere Bodenschichten entgegen oder bilden vermehrt sprossbürtige Wurzeln. Die anatomische Anpassung an O<sub>2</sub>-Mangel im Boden kann durch die Bildung von lebendem Durchlüftungsgewebe (Aerenchyme) erfolgen. Kollabierende Zellen erzeugen zusätzlich mit Luft erfüllte Räume, welche Lakunen genannt werden (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2013).

### 1.1.6 Exkurs: Wurzeln als Schadensverursacher in Stadtgebieten

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

Auf Grund der Tatsache, dass viele Wegebauabschichten trotz Verdichtung Grobporen aufweisen, entstehen ideale Bedingungen für ein verstärktes Wurzelwachstum, was konkret bedeutet, dass für das Gehölz eine zusätzliche Möglichkeit zur Durchwurzelung neben dem bereits vorhandenen Raum möglich ist. Idealtypische Orte dafür sind u.a. Pflasterbettungen, hohlraumreiche Tragschichten, Fugen in Baukörpern, sowie Grenzonen mit geringem Eindringwiderstand (REICHWEIN, 2002).

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

Asphaltschäden in ihrer herkömmlichsten Art beschreibt KOPINGA (1994) als eine aufgewölbte bzw. aufgebrochene Schadenstruktur, die in den meisten Fällen entweder vom Stamm ausgehend konzentrisch oder senkrecht zum Straßenverlauf verläuft. Sobald der Schaden in diesem sichtbaren Stadium ist, ist davon auszugehen, dass die auslösenden Wurzeln bereits eine gewisse Länge und einen Minimaldurchmesser von 2,5 cm erreicht haben. Direkt unter der Asphaltdecke bilden sich aus den Wurzeln nur sehr wenige Seitenwurzeln heraus, wenn sie jedoch die andere Seite des Wegebelauges erreichen, fächert sich die Wurzelstruktur wieder auf (KOPINGA, 1994). Von außen lässt sich das Wachstum der Wurzeln unterhalb des Wegebelauges erst nach dem Einsetzen des sekundären Dickenwachstums und einer damit verbundenen Zunahme des Wurzeldurchmessers erkennen. In diesem Fall wird die Asphaltdeckschicht nach oben geschoben, aufgewölbt oder auch aufgebrochen. Gerade Erhaltungsstraßen und die bereits genannten Geh- und Radwegen sind besonders anfällig für durch Gehölzwurzeln verursachte Asphaltschäden, da sie eine sehr dünne Asphaltdecke aufweisen (KOPINGA, 1994).

Ein weiteres häufig vorkommendes Schadensbild sind punktuelle Anhebungen des Straßenbelages, was entweder auf Verletzungen bzw. externen Druck auf die Wurzel zurückzuführen ist oder auf Wurzelbrut bei frisch geschnittenen wurzelsprossausstriebsfähigen Gehölzen. Besonders häufig treten solch beschriebenen Schäden bei Pappeln und anderen Pioniergehölzen auf (KOPINGA, 1994). Bituminöse Decken sind relativ elastisch und daher im Hinblick auf Schadbilder bei Anhebungen durch Baumwurzeln anders zu bewerten als zum Beispiel Pflasterdecken. Eine Durchwurzelung der hohlraumarmen Deckschicht selber ist unwahrscheinlich (REICHWEIN, 2002).

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

**Wurzeln wachsen in der Regel bevorzugt in Bereiche ein, die leicht durchwurzelbar sind. Durch gezielten Einbau porenarmer Verfüllmaterialien lassen sich Wurzelschäden an Infrastruktureinrichtungen verringern.**



ABBILDUNG 5: ANGEHOBENE ODER VERSCHOBENE PFLASTERSTEINE SOWIE RISSBILDUNGEN IN ASPHALTBÖDEN DURCH BAUMWURZELN (MEIN-SCHÖNER-GARTEN.DE; DRAHTESEL.OR.AT)

## 1.2 Der Boden

Böden bestehen aus organischen Substanzen und Mineralien unterschiedlichster Art und sind durch physikalische Eigenschaften gekennzeichnete Naturkörper. Wichtige Merkmale zur Beschreibung des Bodens sind Körnung, Farbe und Steingehalt sowie die Art und Weise der räumlichen Anordnung (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2010).

Die Anordnung und Verteilung der Bodenpartikel beschreiben das Bodengefüge oder die Bodenstruktur. Daraus lässt sich die Menge und Form der Hohlräume für Bodenluft, Bodenwasser und Bodenleben ableiten. Das Bodengefüge unterscheidet man in Makro- (im Gelände erkennbar) und Mikrogefüge (nur unter Mikroskop erkennbar). Eine quantitative Beurteilung der Eignung des Bodens als Pflanzenstandort wird aufgrund dieser Werte möglich. Die Korngrößenverteilung als auch die Größe des Porenvolumens ist ein wichtiger Bestandteil des Bodengefüges (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2010).

### 1.2.1 Der Boden als Pflanzenstandort

Der Boden muss der Pflanze die Voraussetzungen der Wasser- und Sauerstoffverfügbarkeit, als auch die Möglichkeit zur Verankerung im Boden bieten. Er hat die Funktion eines Transportweges für Wasser und Luft als auch die eines Vorratsbehälters für Pflanzennährstoffe. Der Ertrag und das Wachstum der Pflanze sind daher sehr stark von den Bodeneigenschaften abhängig (HARTGE & HORN, 1991).

Je grobporiger der Boden, umso einfacher können Pflanzen Wasser aufnehmen und desto besser ist die Durchlüftung des Bodens. Auf der anderen Seite bedeutet Grobporigkeit auch Heterogenität. Dies kann sich durch negativ auf die Bodenstabilität und auf das pflanzenverfügbare Bodenwasser auswirken.

### 1.2.2 Bodenverdichtung

In Folge einer räumlichen Komprimierung des Bodenvolumens durch eine erhöhte Lagerungsdichte verdichtet sich der Boden. Das relative Volumen der festen Phase nimmt zu, während der Porenanteil sinkt (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2010).

Durch die verdichtungsbedingte Verkleinerung des Porenvolumens kommt es dazu, dass Wasser- und Gasgehalt sich im Boden deutlich vermindern. Weiteres wird der Eindringwiderstand für Wurzeln erhöht und das Wurzelwachstum gehemmt (POLOMSKI & KHUN 1998). Zu verstärktem Bodenabtrag kann es aufgrund von zu hoher Lagerungsdichte im geeigneten Gelände kommen (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2010).

### 1.2.3 Wasser und Boden

Ein Boden, bei dem der gesamte Porenraum mit Wasser gefüllt ist, wird als „wassergesättigt“ bezeichnet. Kommt es durch Niederschläge zu einem Überschuss an Wasser, so fließt es als Oberflächenwasser ab. Das in tiefere Bodenschichten verlagerte Wasser wird Sickerwasser genannt. Wasser, welches gegen die Schwerkraft festgehalten wird und somit im Boden verbleibt, bezeichnet man als Haftwasser oder Bodenfeuchte. Dieses im Boden gebundene Wasser wird je nach Art der wirkenden Kräfte auf die Wassermoleküle in Adsorption- bzw. Kapillarwasser eingeteilt. Wasser, welches nicht an die Bodenmatrix gebunden ist, wird als Grund- und Stauwasser betrachtet. Diese entstehen über dichten Bodenschichten (z.B. über Tonen) mit geringer Wasserleitfähigkeit. Grundwasser ist über das ganze Jahr vorhanden, während Stauwasser nur periodisch vorkommt (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2010).

### 1.2.4 Wurzel und Boden

Die Pflanzendecke und der Boden üben einen untrennbaren Einfluss aufeinander aus. Im Wesentlichen beschränkt sich der spezifische Einfluss des Bodens auf die chemisch-physikalischen Eigenschaften des Ausgangsmaterials der Bodenbildung. Die klimatischen Einflüsse bestimmen die Art und Weise, in welcher diese Eigenschaften wirksam werden. Beide Einflüsse bestimmen die Richtung, in welche sich die Lebensgemeinschaften entwickeln (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2013).

Die Mineralzusammensetzung hat großen Einfluss auf die Textur und Struktur des Bodens. Granite und Gneise bewirken ein grobkörniges Bodengefüge mit hohem Luftgehalt, allerdings mit geringer nährstoff- und wasserspeichernder Kraft, umgekehrte Eigenschaften haben Phyllite und Tonschiefer. In humosen Schichten fördert ausreichend Kalkgehalt die Krümelbildung und somit die Stabilität des Bodengefüges. In Feinsedimentböden verursacht ein hoher Alkaligehalt Verdichtung und Luftarmut. Die klimatischen Eigenschaften 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 als auch eine weitere Vertiefung des durchwurzelteten Bodenraumes (RAMANN 1898, KNAPP 1967). Vor allem können verdichtete Bodenschichten 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 – 1,5 m festigen. Bei Gehölzen reicht die bodenstabilisierende Wirkung je nach Art in bis zu 3 m Tiefe.

Als wesentliche bodenbildende Faktoren schaffen die Lebensgemeinschaften aus Pflanzen und Tieren die Voraussetzungen, welche für die Bewurzelung ausschlaggebend ist. Dabei spielt die Humusanreicherung eine wichtige Rolle und die damit verbundene biologische Tätigkeit des Bodens. Weiteres spielt auch die Symbiose von Wurzeln mit Pilzen eine wichtige ökologische Rolle. Insofern der Abbau des Bestandsabfalls nicht durch das Bodenleben erfolgt, ermöglicht diesen die Symbiose mit Pilzen. Sie fördern die Rohhumusbildung und die Entbasung des Bodens, was zur Folge hat, dass sich der humusreiche Oberboden vom mineralstoffreichen Unterboden absondert (KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2013).

Die Wurzel- und Sprossentwicklung werden unmittelbar von den Bodeneigenschaften beeinflusst (POLOMSKI & KHUN, 1998). Es besteht eine Abhängigkeit zwischen den Bodeneigenschaften und dem Spross- bzw. Wurzelwachstum, welche von CANELL (1985), und KLEPPER (1991) bestätigt wurde.

## 2. WURZELFORSCHUNG

In den letzten Jahren hat sich die Wurzelforschung rasant weiterentwickelt und es sind Spezialisierungen in Teilgebieten entstanden. Am stärksten liegt der Fokus auf die ökophysiologische Bedeutung von Wurzeln (POLOMSKI & KUHN, 1998). In der Ingenieurbiologie sind Pflanzenwurzeln die wichtigsten Instrumente, um Ufer- und Böschungssicherungen durchzuführen. Genau aus diesem Grund ist es wichtig, möglichst viel über das Verhalten der Wurzeln und ihrer Verankerung im Boden zu wissen.

Um herauszufinden, welchen Wechselwirkungen zwischen den Wurzeln und ihre Umgebung bestehen, müssen zuerst Qualität, Quantität, Morphologie und die Ausbreitung der Wurzeln in der Rhizosphäre untersucht werden. Die größte Herausforderung in der Wurzelforschung ist, die Untersuchungen unter natürlichen Bedingungen durchzuführen (NEUMANN *et al.*, 2009).

**Für die Ingenieurbiologie hat die Erforschung der Wurzelsysteme und ihrer Architektur eine große Bedeutung, da sich Zusammenhänge ihrer zeitlichen und räumlichen Entwicklung auf den technischen Wirkungsgrad ingenieurbiologischer Baumaßnahmen ableiten lassen.**

### 1.3 Rhizobox zur Untersuchung der Wurzelarchitektur

Rhizotrone sind Instrumente mit einer transparenten Oberfläche, welche für die nicht zerstörende Beobachtung und Messung von Wurzelsystemen über einen längeren Zeitraum verwendet werden. Sie sind vor allem für makroskopische und mikroskopische Beobachtungen von Wurzelsystemen und der umgebenden Rhizosphäre geeignet (KLEPPER & KASPER, 1994).

Ursprünglich bezeichnete man unterirdische Glaskammern, aus welchen die Untersuchung des Bodens und der Bodenorganismen ermöglicht wurde, als Rhizotron (ATKINSON, 1991). Daraus entwickelte sich später eine kleinere Version, das Minirhizotron, eine zylinderförmige transparente Röhre im Boden, die Kosten und Arbeitsaufwand deutlich reduzierte. Man entwickelte jedoch eine noch günstigere und einfachere Methode zur in situ Beobachtung des Wurzelraumes, das Wurzelfenster. Hierfür wird eine Glas- bzw. Plexiglaswand im Boden installiert, durch welche die Beobachtungen und Messungen erfolgen können (SMIT et al., 2000).

Infolge wurde die Rhizobox entwickelt, eine mobile Abwandlung des Wurzelfensters, um Untersuchungen unter Laborbedingungen durchführen zu können. Sie wird vor allem verwendet, um Wachstumsprozesse der Wurzel besser zu verstehen, um Entwicklung von Wurzelverteilungen unter bestimmten Einflüssen, Wurzelichten und Wurzelarchitektur über einen längeren Zeitraum genauer zu erforschen und zu dokumentieren (DONG et al., 2003). Zahlreiche Untersuchungen können mithilfe der Rhizobox quantifiziert werden, wie zum Beispiel die Dynamik des Wurzelwachstums, die Aufnahme von Wasser und Mineralstoffen, Stressresistenzen und Reaktionen der Wurzel auf unterschiedlichste Einflussfaktoren (KLEPPER & KASPER, 1994).



**ABBILDUNG 6: BEPFLANZTE RHIZOBOXEN IM GEWÄCHSHAUS (LINKS; OMAROVA, 2016) UND IM LABOR (RECHTS; PFLEGER, 2014)**



**ABBILDUNG 7: ZUR BEPFLANZUNG DER RHIZOBOXEN VERWENDETE STECKHÖLZER (RECHTS) UND EINGEPFLANZTE STECKHÖLZER NACH DREI WOCHEN (LINKS) (OMAROVA, 2016)**

### 1.3.1 Vor- und Nachteile

Wie bereits erwähnt ist die Rhizobox für die Untersuchung der Wurzel und ihre Entwicklung über einen bestimmten Zeitraum sehr gut geeignet. Weiteres können Spross und Wurzel während ihres Wachstums ohne Beeinträchtigung beobachtet werden (KLEPPER & KASPER, 1994).

Ein Nachteil ist vor allem die Größe der Rhizobox. Das Wurzelwachstum kann durch die räumliche Begrenzung nur einen bestimmten Zeitraum lang beobachtet werden. Je nach Pflanzenart und Untersuchungsdauer muss die Dimension der Box dementsprechend ausgewählt werden. Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass die natürlichen Bodenbedingungen nicht simuliert werden können, da sich Temperatur und Wasserverfügbarkeit anders verhalten. Aufgrund der zweidimensionalen Abbildung des Wurzelbildes an der Beobachtungsscheibe, kann eine dreidimensionale Bewertung der Wurzelarchitektur nur in Verbindung mit zerstörenden Methoden erhoben werden (NEUMANN *et al.*, 2009).

### 1.3.2 Material und Bauweise

Die Rhizobox ist ein offener Behälter, bestehend aus zwei Seitenwänden, meist Holz, Metall oder Kunststoff, einer Rückwand, einer Plexiglasscheibe und einem Boden. Für einen am Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau durchgeführten Versuch wurden folgende Abmessungen verwendet: Außenmaße 50 x 75 x 5,7 cm, Innenmaße 41 x 70 x 5 cm. Die Seitenwände bestehen aus 5 x 5 cm dicken Kanthölzern, auf welchen die aus Kunststoff bestehende, mit Aluminium beschichtete Rückwand auf der Hinterseite und auf der Vorderseite die 5 mm starke Plexiglasscheibe befestigt wurde. Der Boden besteht aus einem U-förmigen, perforierten Aluminiumprofil, welches in der Mitte mit einem zusätzlichen Kantholz verstärkt wird um einer Verformung der Vorder- und Rückwand entgegenzuwirken. Die Rhizobox hat ein Leergewicht von 6.392 g.

Die Box wird mit einer 10 cm hohen Drainageschicht, bestehend aus Blähton und einem Vlies versehen und anschließend mit dem gewünschten Substrat befüllt.

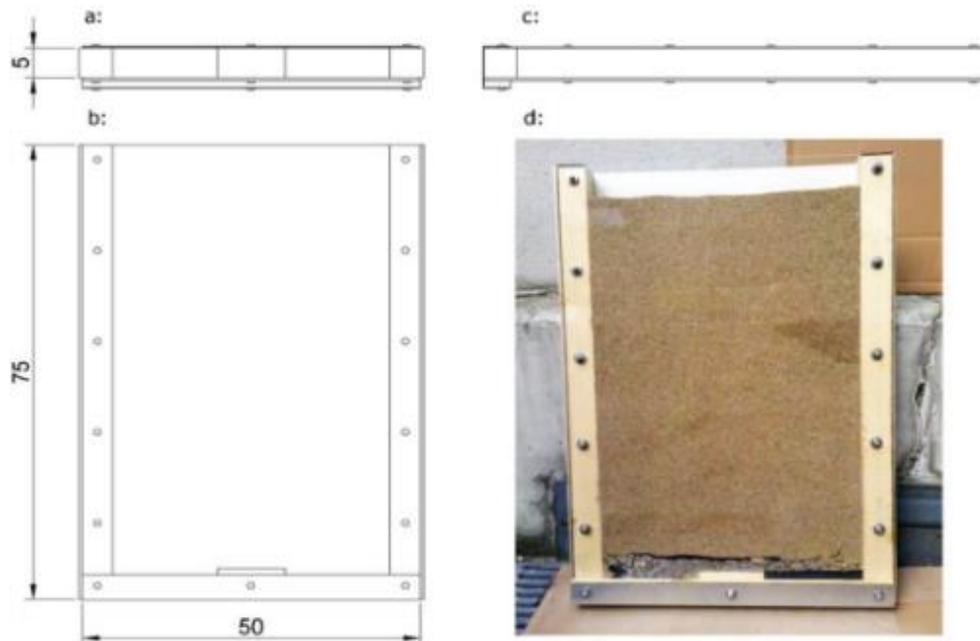


ABBILDUNG 8: A,B,C: ABMESSUNGEN DER RHIZOBOX, D:FERTIG KONSTRUIERTE, MIT DRAINAGESCHICHT, VLIES UND SUBSTRAT BEFÜLLTE RHIZOBOX (OMAROVA, 2016)

## 1.4 Aufnahmemethoden

Nicht für alle Situationen und Forschungsziele passt das gleiche Messverfahren. Das Messverfahren wird von verschiedenen Faktoren, wie dem Forschungsziel, der vorhandenen Ausrüstung, der Pflanze und dem Substrat bestimmt. Je nach Versuchsaufbau, Durchführung und verwendeten Materialien, muss die am besten geeignete Variante ausgewählt werden. Für die Interpretation von Ergebnissen ist es wichtig, nicht nur einen, sondern mehrere Parameter zu messen. Welche Wurzelparameter gemessen werden ist abhängig vom Zweck und dem Ziel der Forschung.

### 1.4.1 Abzeichnen

Um die Wurzellängen der sichtbaren Wurzeln an der Plexiglasscheibe aufzunehmen, gibt es die Möglichkeit die Längen per Hand abzuzeichnen. Dabei werden Acetatfolienblätter auf der Scheibe platziert und fixiert, um das Verrutschen der Folie während der Aufnahme zu verhindern. Mittels farblich differierenden, wasserfesten Filzstiften werden die Wurzeln nachgezeichnet. Es können verschiedene Farben für unterschiedliche Wurzel Durchmesser oder das Wurzelwachstum in unterschiedlichen Zeiträumen verwendet werden. Weiteres besteht auch die Möglichkeit, mit den unterschiedlichen Farben zwischen toten und lebenden Wurzeln oder hellen und dunklen Wurzeln zu unterscheiden. Die Längen der Wurzeln des sichtbaren Wurzelsystems können mit einem Gitter-Verfahren gemessen oder gescannt und mittels Bildanalyse bestimmt werden (SMIT et al., 2000).

### 1.4.2 Fotografieren

Die zweite Aufnahmemethode ist das Fotografieren der Rhizoboxscheibe. In regelmäßigen, festgelegten zeitlichen Abständen werden Fotos erstellt und danach wird das digitale Bild am Computer, mithilfe von Bildbearbeitungsprogrammen, aufbereitet. Der Vorteil beim Fotografieren ist, dass man unterschiedlichste Kameras mit unterschiedlichsten Einstellungen verwenden kann. Werden scharfe Bilder, auf welchen auch feine Wurzeln sichtbar sind benötigt, empfiehlt es sich eine Spiegelreflexkamera mit gutem Objektiv zu verwenden. Neben der Schärfe der Bilder, kommt es auch oft zu Problemen bei der einheitlichen Beleuchtung des aufzunehmenden Objektes. Die Beleuchtung sollte so ausgewählt und installiert werden, dass die Wurzeln keinen Schatten werfen und die Aufnahme so negativ beeinflussen. Um eine weitere Fehlerquelle zu vermeiden, sollten automatische Helligkeit und Kontrasteinstellungen von Kameras deaktiviert werden (SMIT et al., 2000).

### 1.4.3 Scannen

Scanner werden hauptsächlich für ausgewaschene Wurzeln am Ende eines Rhizotron-Versuches verwendet, wo auch ganz spezielle Arten von Scannern für die Aufnahme entwickelt wurden. Dabei werden die Wurzeln vorsichtig in ein für den Flachbettscanner angefertigtes, durchsichtiges, rechteckiges und mit ca. 3 - 5 mm Wasser befülltes Gefäß gelegt und gescannt.



**ABBILDUNG 9: SCAN EINES WURZELSYSTEMS MIT HILFE EINES FLACHBETTSCANNERS (SALIX PURPUREA) (OMAROVA, 2016)**

## 1.5 Auswertungsmethoden (Software)

Aufgrund des stetigen Wandels der Technik ergeben sich immer wieder neue Methoden um an bestimmte Daten zu kommen bzw. diese auszuwerten. Vor allem die bildgebenden Verfahren haben in den letzten Jahren sehr an Bedeutung gewonnen. Eben aufgrund der vielen Eigenschaften, die ein Bild speichern kann (z.B. Form, Farben), der zeitlichen Entkoppelung von Proben und Analysen, der Eignung für standardisierte und vollautomatische Auswertungsmethoden, sowie aufgrund der zunehmenden Verfügbarkeit an einfach bedienbaren Bildanalyseprogrammen, komplexere Technologien und leistungsfähiger Hardware verwendet die Mehrheit von Pflanzenwissenschaftler eine oder mehrere bildgebende Verfahren (LOBET et al., 2013).

Die steigende Anzahl an verfügbarer Software macht es für die Nicht-Spezialisten schwierig, die geeignete Software-Lösung zu finden. Aus diesem Grunde wurde eine frei zugängliche Webseite (**www.plant-image-analysis.org**) erstellt, welche dem Nutzer die richtige Softwarelösung für ihre Forschungen anzeigt. Für jede Software sind wissenschaftliche Artikel über Anwendungsbereiche oder bereits durchgeführte Untersuchungen des Entwicklers vorhanden, eine Anwendungsbeschreibung und einen Überblick über die

- anwendbaren Betriebssysteme (Windows, Mac, ...),
- die Lizenzen (open-source, freeware, ...),
- mögliche Messdaten (Längen, Volumen, ...),
- voll- oder semiautomatisch Auswertungsverfahren
- die zu analysierenden Pflanzenorgane (Blatt, Wurzel, ...),
- anwendbare Bilddateien (jpg, png, tiff,...) und
- exportierende Dateiformate (csv, xmls,...).

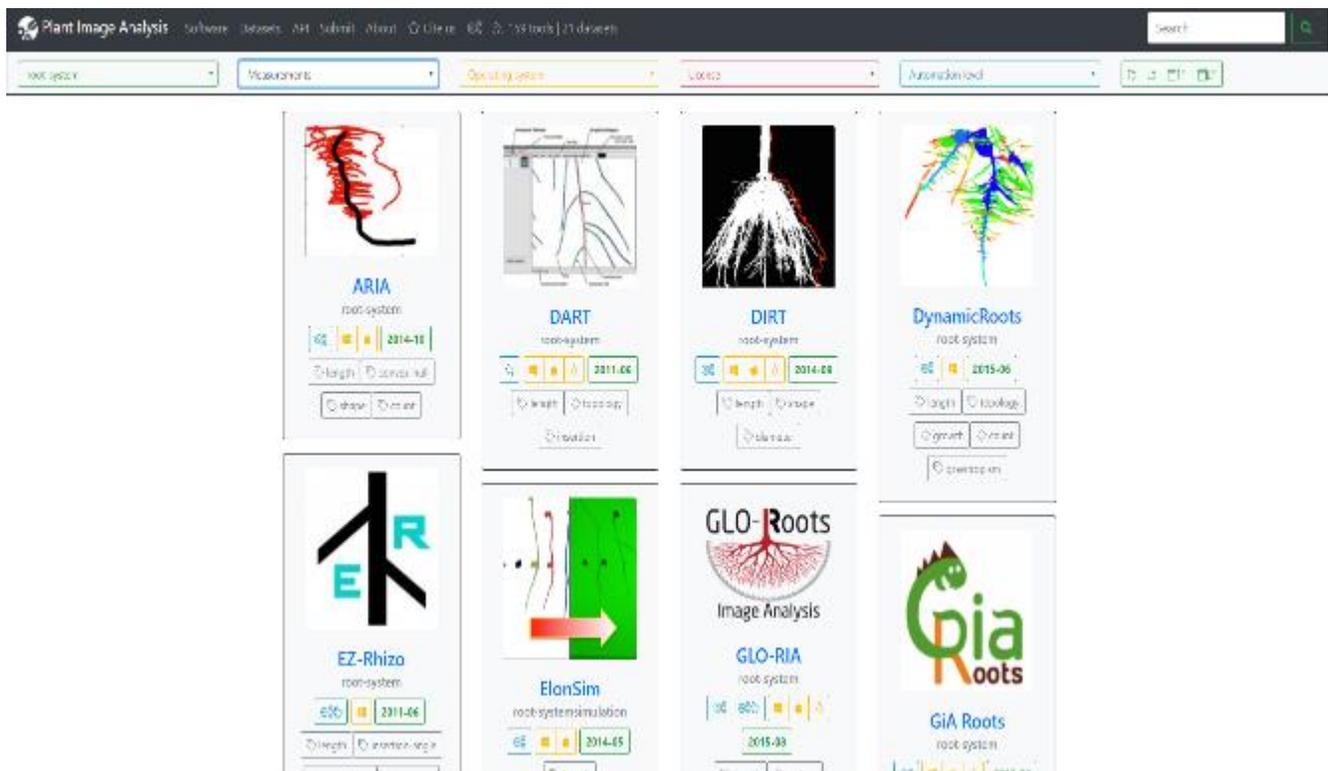


ABBILDUNG 10: OBERFLÄCHE VON PLANT IMAGE ANALYSIS ([WWW.PLANT-IMAGE-ANALYSIS.ORG](http://www.plant-image-analysis.org))

### 1.5.1 ImageJ (Open-Access)

Um Wurzeln messen und analysieren zu können, muss man die Wurzeln mithilfe von Werkzeugen nachzeichnen und dann mit den entsprechenden Funktionen analysieren (vgl. *ImageJ*, 2004). Dafür geeignete Programme sind beispielsweise ImageJ oder SAL.

*ImageJ* ist ein Java Bildbearbeitungs- und Bildanalyseprogramm. Es kann Flächen und Pixelwerte von ausgewählten Bereichen des Nutzers/der Nutzerin berechnen, sowie zum Beispiel Längen und Winkel angeben. Neben diesen Funktionen kann man im *ImageJ* auch Helligkeit- und Kontrasteinstellungen, sowie Schärfung des Bildes etc. vornehmen.

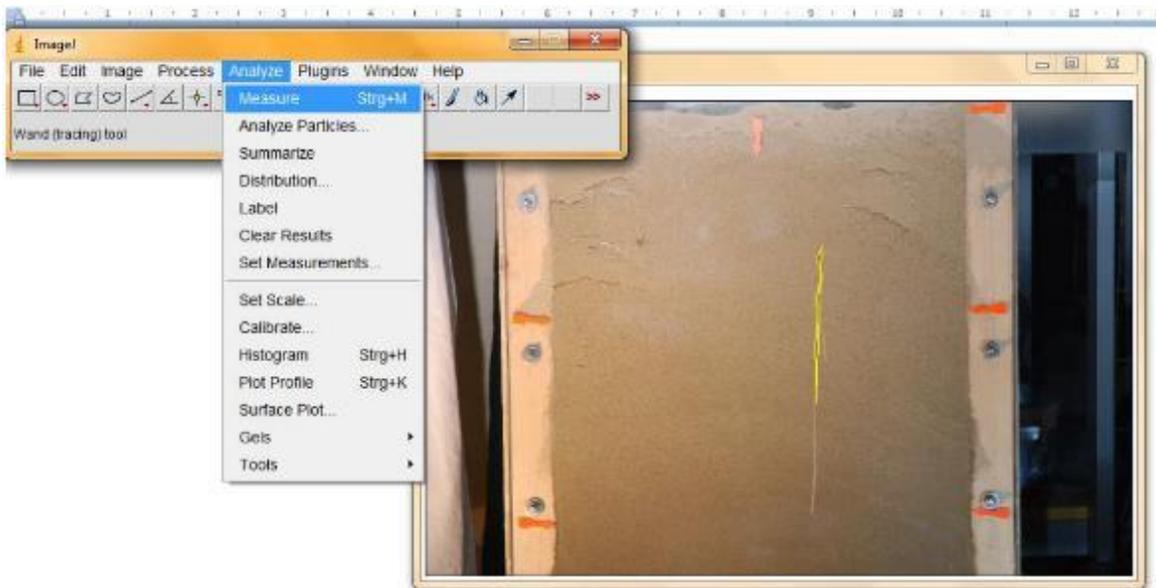


ABBILDUNG 11: BEISPIEL FÜR EINEN BEARBEITUNGSVORGANG MIT IMAGEJ (PFLEGER, 2014)



ABBILDUNG 12: DAS ORIGINAL-BILD (LINKS); WURZELSYSTEM DER LINKEN PFLANZE (MITTE), WURZELSYSTEM DER RECHTEN PFLANZE (RECHTS), JEWEILS BEARBEITET MIT SIA (DORRIGHI, 2016)

### 1.5.2 SmartRoot (Open-Access)

Mit dieser semi-automatisierten Bildanalyse-Software können Wurzelwachstum und Wurzelarchitektur in einem komplexen Wurzelsystem quantifiziert werden. Der Unterschied zu anderen Analyseprogrammen ist, dass *SmartRoot* nicht mit traditionell verwendeten Rastern, sondern mit Vektoren arbeitet. Durch diesen Aspekt ergibt sich auch ein Potential für eine höhere Bildauflösung. Es besteht für den Nutzer/die Nutzerin die Möglichkeit, bestimmte Bereiche von Wurzeln auszuwählen und mithilfe des Programmes genaue Informationen über diesen Wurzelabschnitt zu berechnen. Weiteres ist es möglich Wurzellänge, den Durchmesser, das Wachstum und die Wachstumsrichtung, die Abstände der Verzweigungen und weitere Parameter zu messen.

*SmartRoot* basiert auf *ImageJ* und ist eine kostenlose Software, welche mit plattformübergreifenden Standards wie *Java* arbeitet und ist so mit anderen Datenanalyseprogrammen kompatibel (Universität catholique de Louvain, 2012).

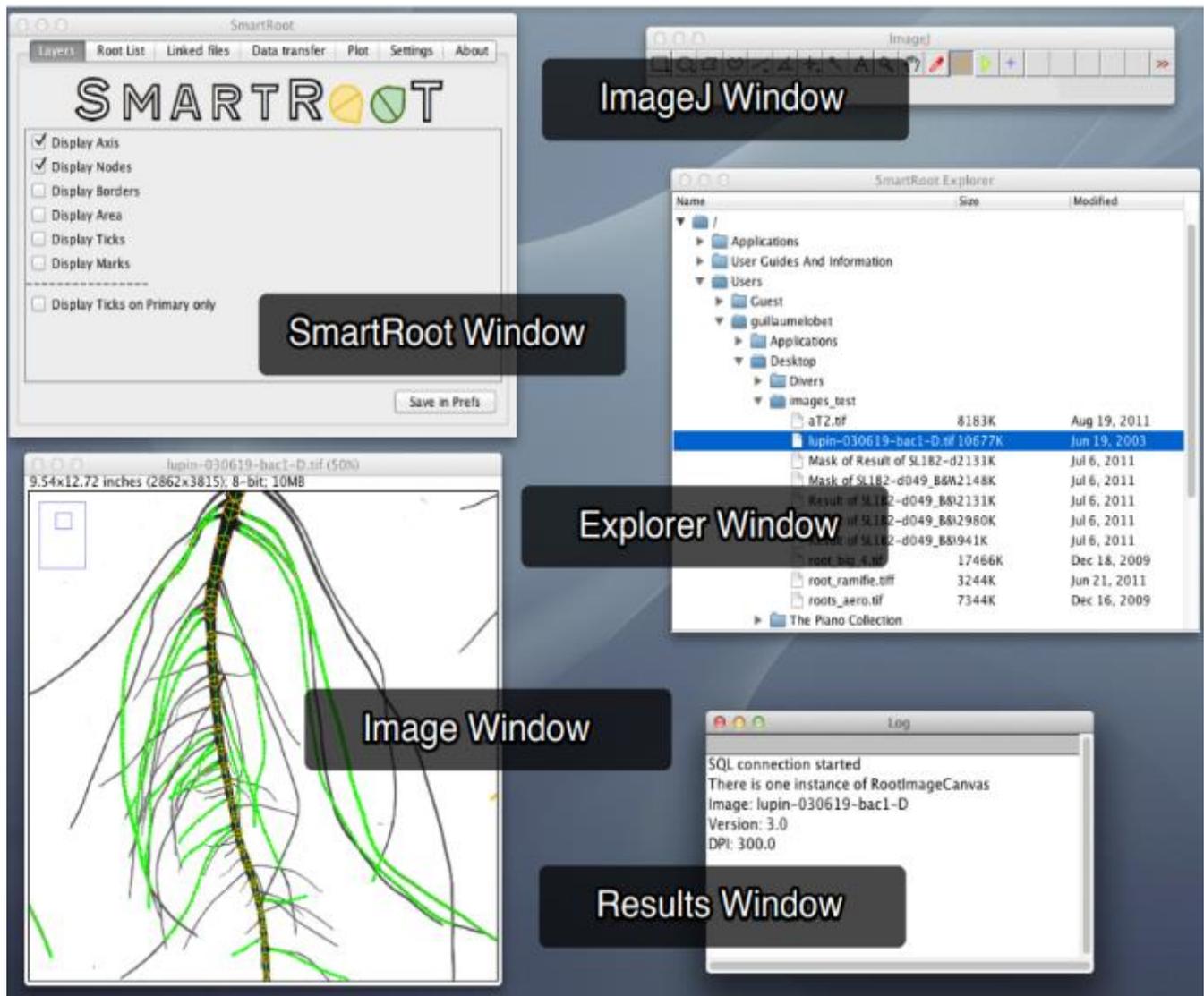


ABBILDUNG 13: WURZELANALYSE IN SMARTROOT (SMARTROOT MANUAL)

### 1.5.3 GiA Roots (Open Access)

Die nachgezeichneten Bilder werden mittels der integrierten „Import Bundles of Images“ Funktion in das Programm geladen. Nach der Auswahl der Ordner, welche die Bilder der zwei Erhebungszeitpunkte beinhalten, werden sie automatisch in zwei gut übersichtliche strukturierte Gruppen geteilt. In den nächsten Schritten werden der Maßstab und die zu messenden Parameter eingestellt. Die Vorgehensweise wird im leicht verständlichen „GiA-Roots Manual“ geschildert und mittels Bildern gut veranschaulicht. Die folgenden Abbildungen 14 und 15 zeigen das Layout des Programms, sowie die Vorgehensweise vom Import der Bilder bis zum Export der Daten und eine bildliche Darstellung der gemessenen Parameter wie sie im GiA Roots Manual veranschaulicht sind.

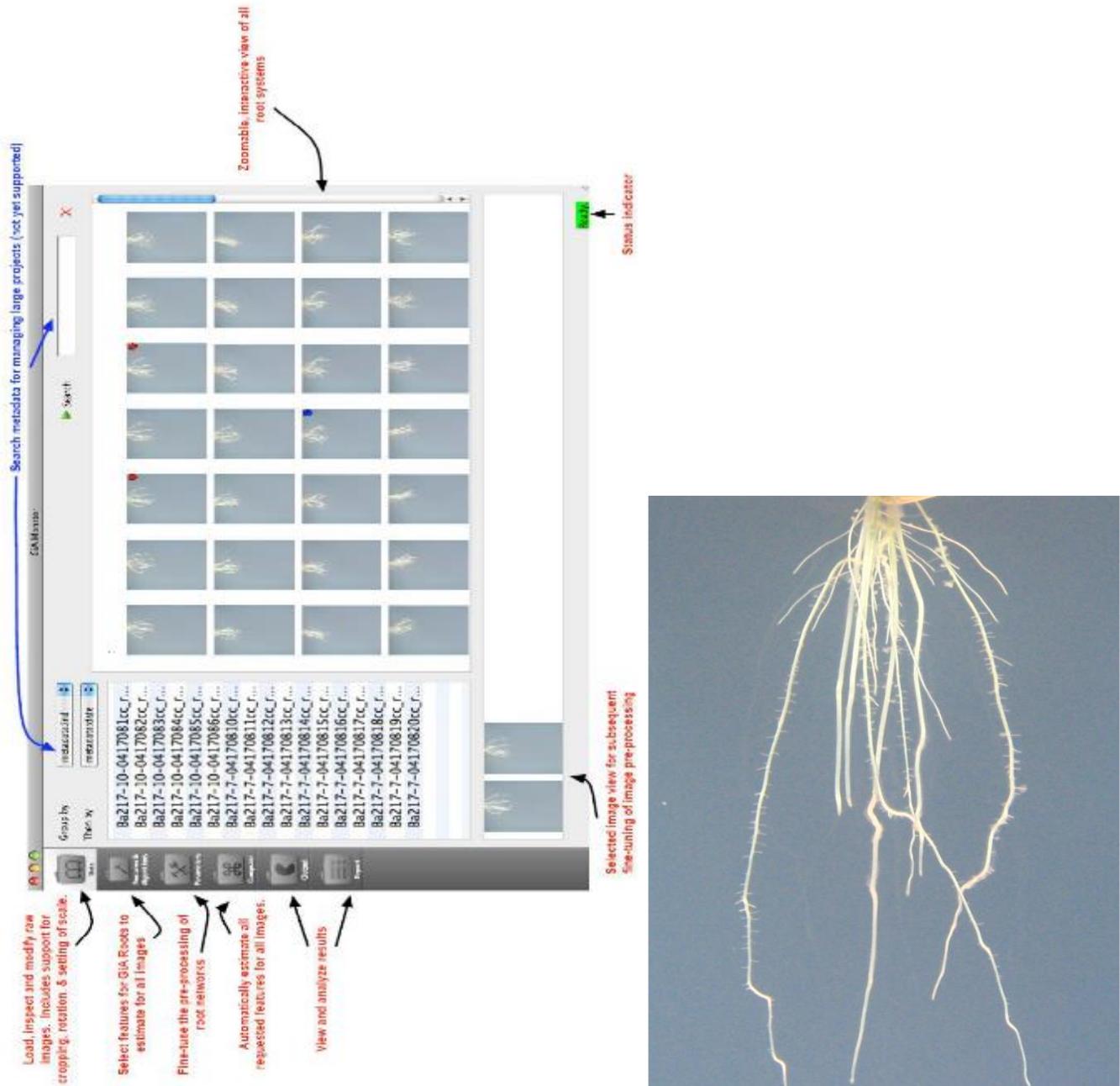


ABBILDUNG 14: ÜBERSICHT DES LAYOUTS UND DIE DURCHFÜHRENDE SCHRITTE (RECHTS) UND WURZELBILD ALS GRUNDLAGE FÜR DIE NUTZUNG ALLER MESSUNGEN (RECHTS) (GI A ROOTS MANUAL, 2011)

Die Software erkennt am Beispiel der Breitenmessung die äußersten zwei Pixelwerte und zählt die Pixel horizontal zwischen ihnen. Mittels der eingestellten Skalierung (65 Pixel = 1 cm) können nun exakte Längen und Flächen gemessen werden. Will man Parameter wie Volumen, maximale Anzahl an Wurzeln oder andere bestimmen, braucht man als Grundlage ein klares, vom Hintergrund abgehobenes Wurzelbild wie in Abbildung 14 (rechts) dargestellt. Nach Abschluss der Bildanalyse mittels GiA Roots können die gemessenen Parameter in eine .csv Datei exportiert werden und im Anschluss mit einem Datenverarbeitungsprogramm wie Excel, SPSS oder ähnliche ausgewertet werden.

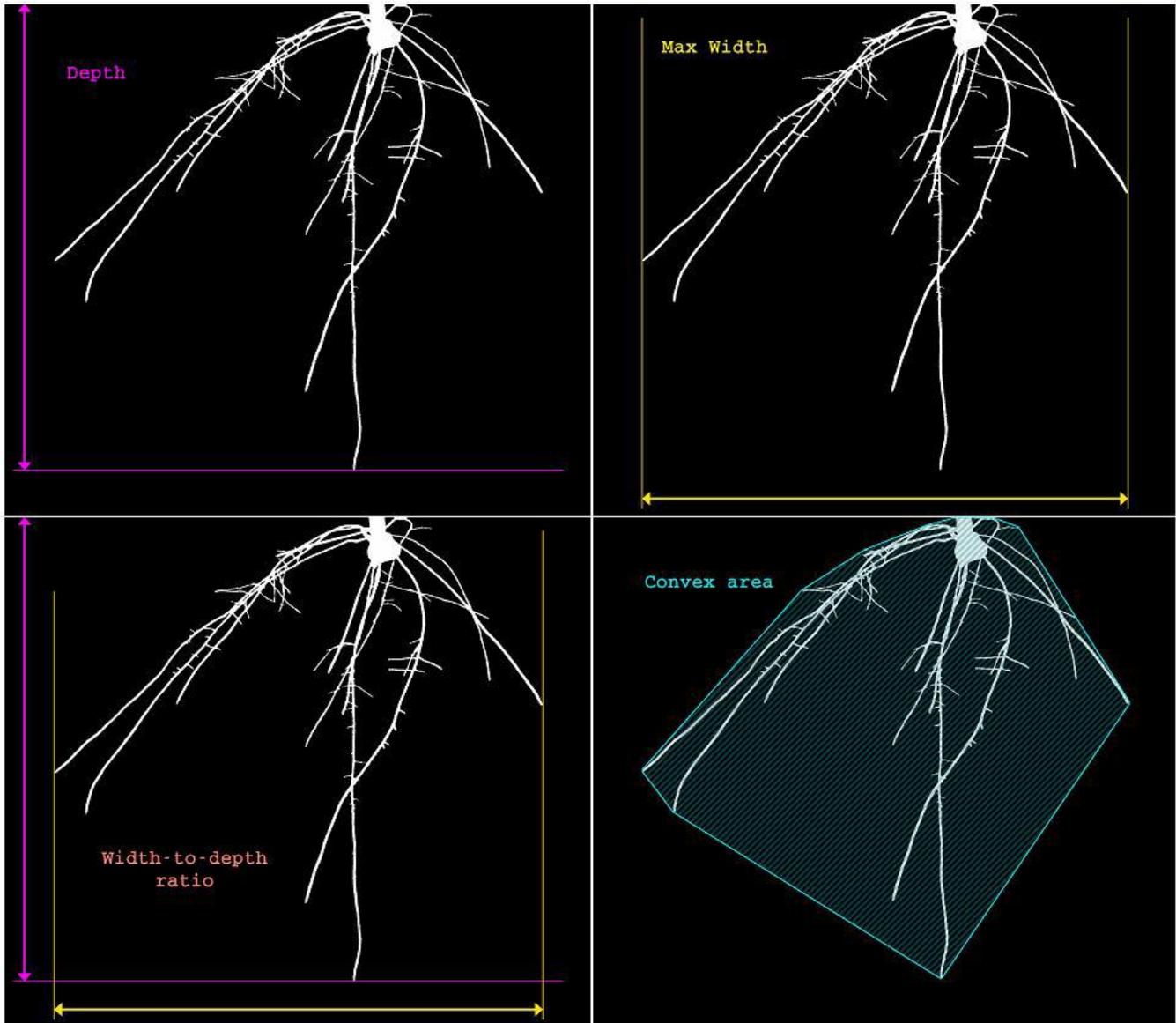


ABBILDUNG 15: BEISPIELBILDER DER ZU MESSENDEN WURZELSYSTEMPARAMETER (GIA ROOTS MANUAL, 2011)

#### 1.5.4 WinRHIZO (Régent Instrument Inc., Quebec, Canada)

Bei WinRhizo handelt es sich, ebenfalls wie bei GiA Roots, um eine Bild-Analyse Software, welche speziell für Messungen von Wurzeln erstellt wurde. Neben der Morphologie (Längen, Flächen, Volumen) kann man auch die

Topologie und Architektur oder Farbanalysen der Wurzeln ermitteln. Es besteht grundlegend aus zwei Komponenten, einem Computerprogramm- und einer Bildaufnahmekomponente, welche dem Nutzer viele Kombinationen der Datenauswertung ermöglichen.

Die Datengrundlage liefern die ausgewaschenen Wurzeln, welche mithilfe eines Flachbettscanners gescannt werden. Nach dem Scannvorgang wird mit dem Analysewerkzeug „Morphology Analysis“ die Auswertung automatisch durchgeführt. Die daraus resultierenden Daten beschreiben Wurzelmerkmale wie z.B. durchschnittlicher Wurzeldurchmesser, Gesamtwurzellänge oder die Wurzellängen bestimmter Wurzeldurchmesserklassen.

**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 8.

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

**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.

**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 Scannercal (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 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 selected object color:** Click it to change the color or shift click in the image the desired color (while in Editor working mode).

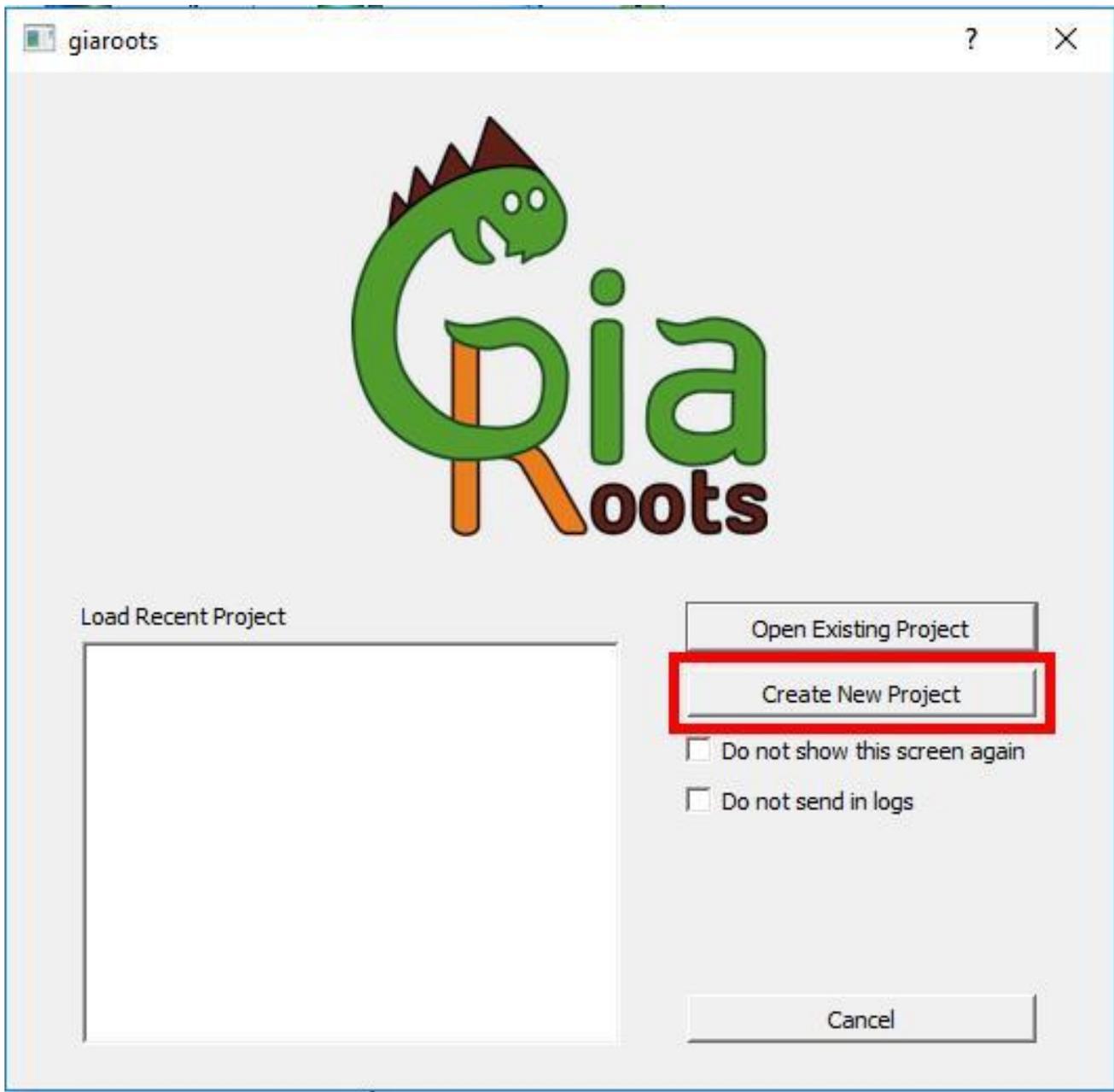
**The menu bar:** Its commands are described in "REFERENCE" on page 85.

ABBILDUNG 16: DARSTELLUNG DER BEARBEITUNGSOBERFLÄCHE VON WINRHIZO (WINRHIZO™, 2009)

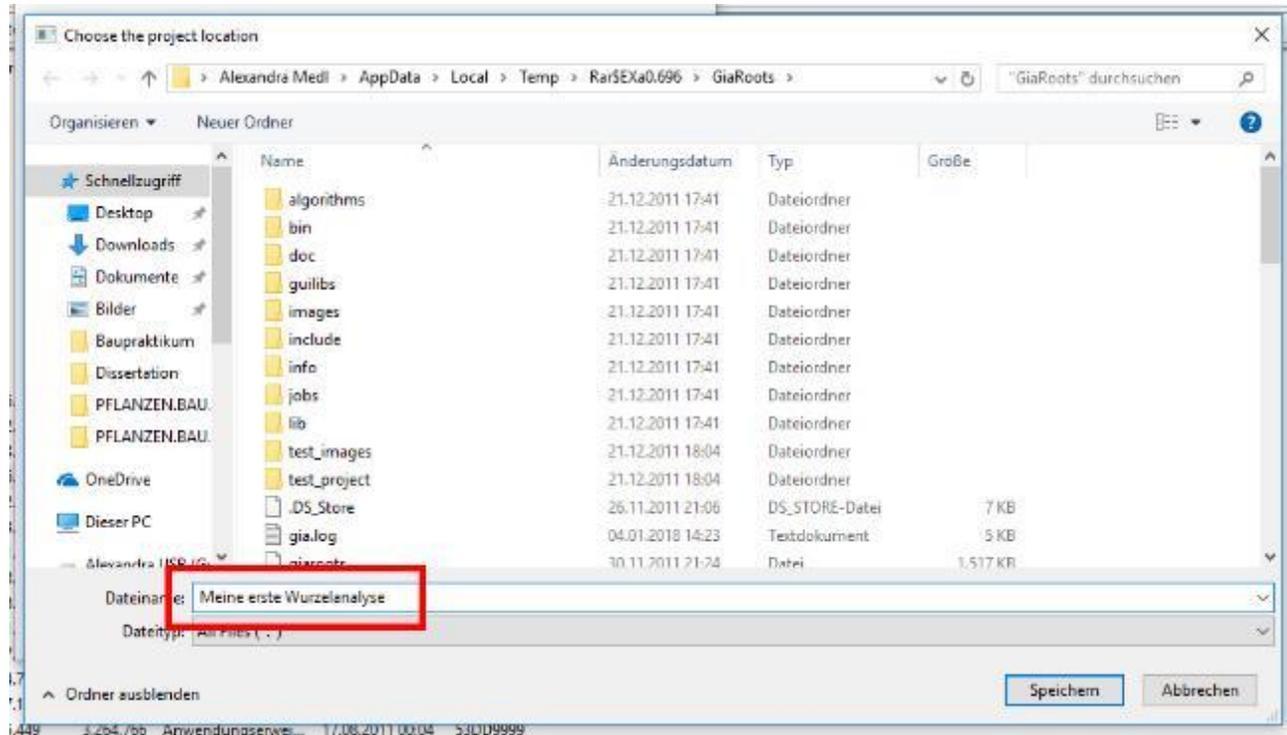
### 3. GIA ROOTS: SCHRITT FÜR SCHRITT

Schritt 1: Download der Software unter: <http://giaroots.biology.gatech.edu/>

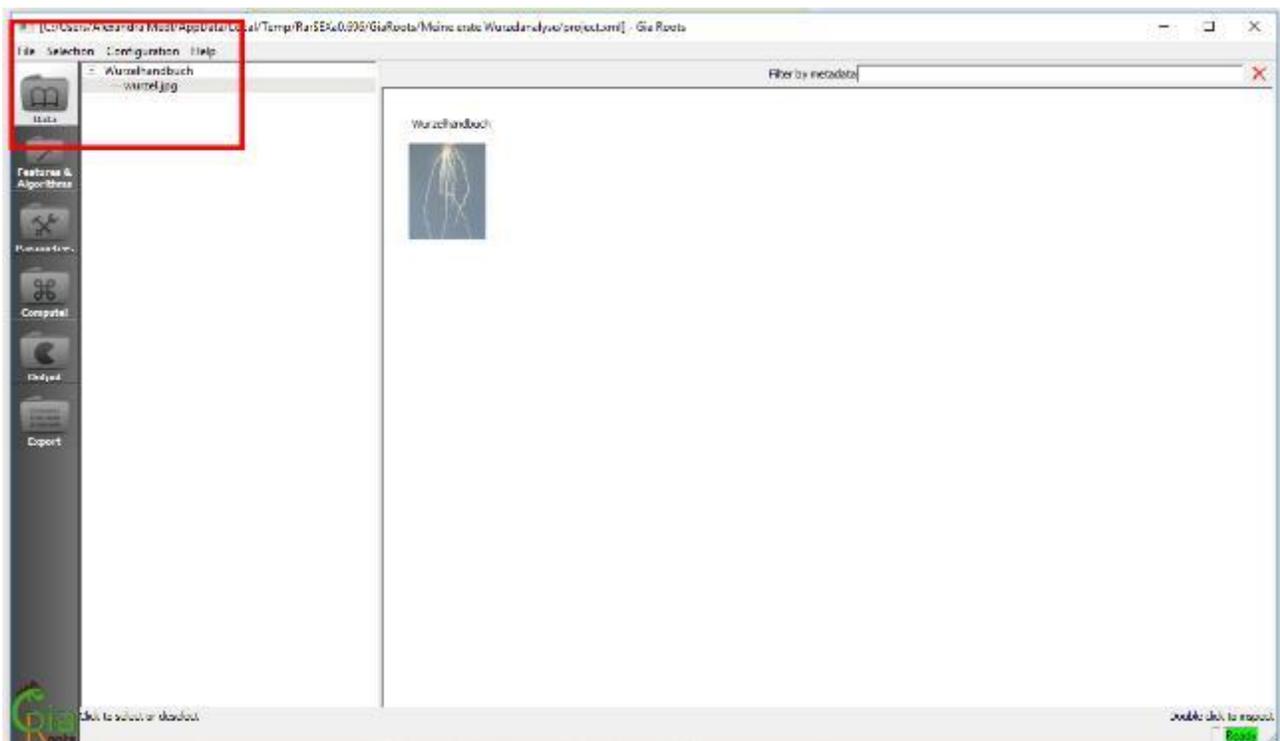
Schritt 2: Eröffnen eines neuen Projekts. Dazu den Button ‚Create New Project‘ anklicken.



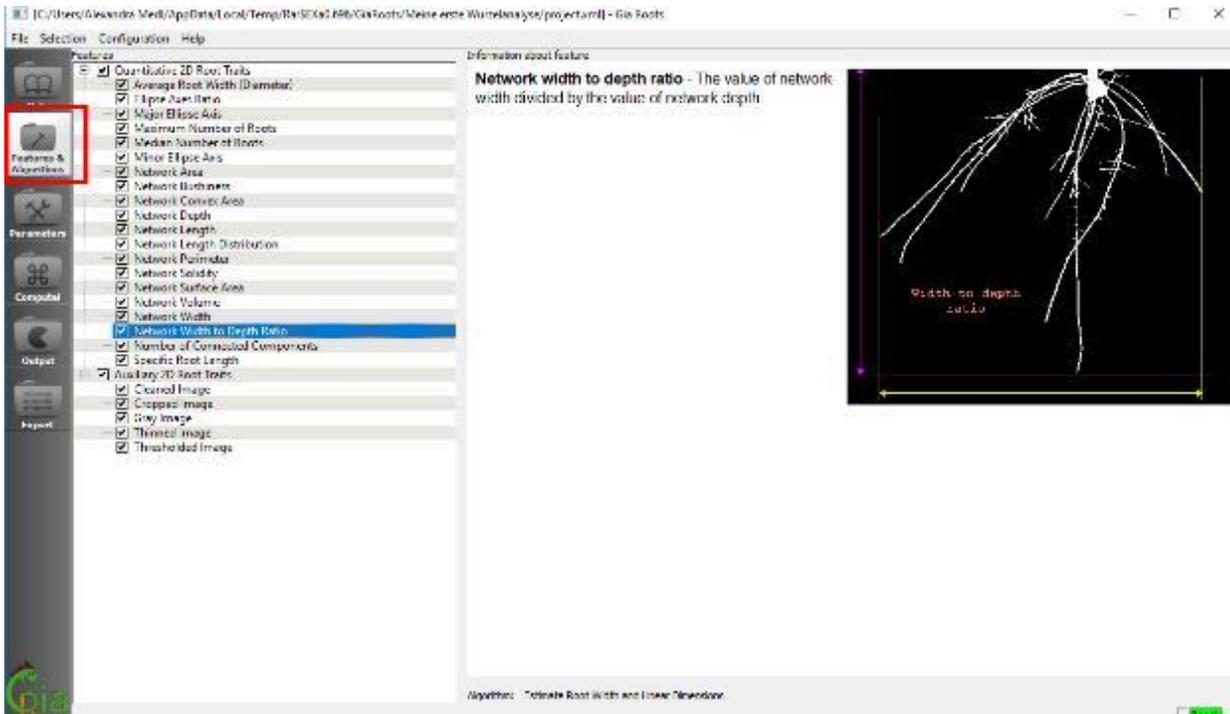
Schritt 3: Dem Projekt einen Namen geben und speichern.



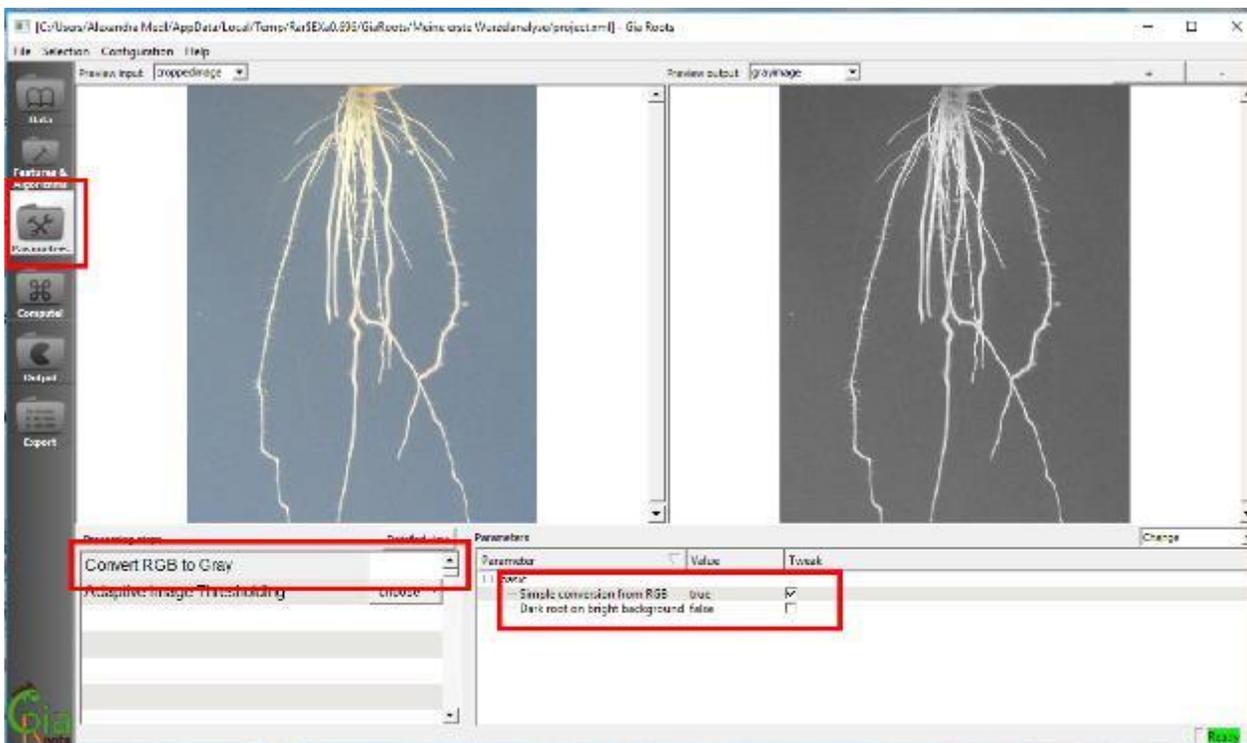
Schritt 4: Ein zuvor gespeichertes Wurzelfoto öffnen. Dazu Data → File → Import Few Images anklicken und Fotos auswählen → Open klicken.



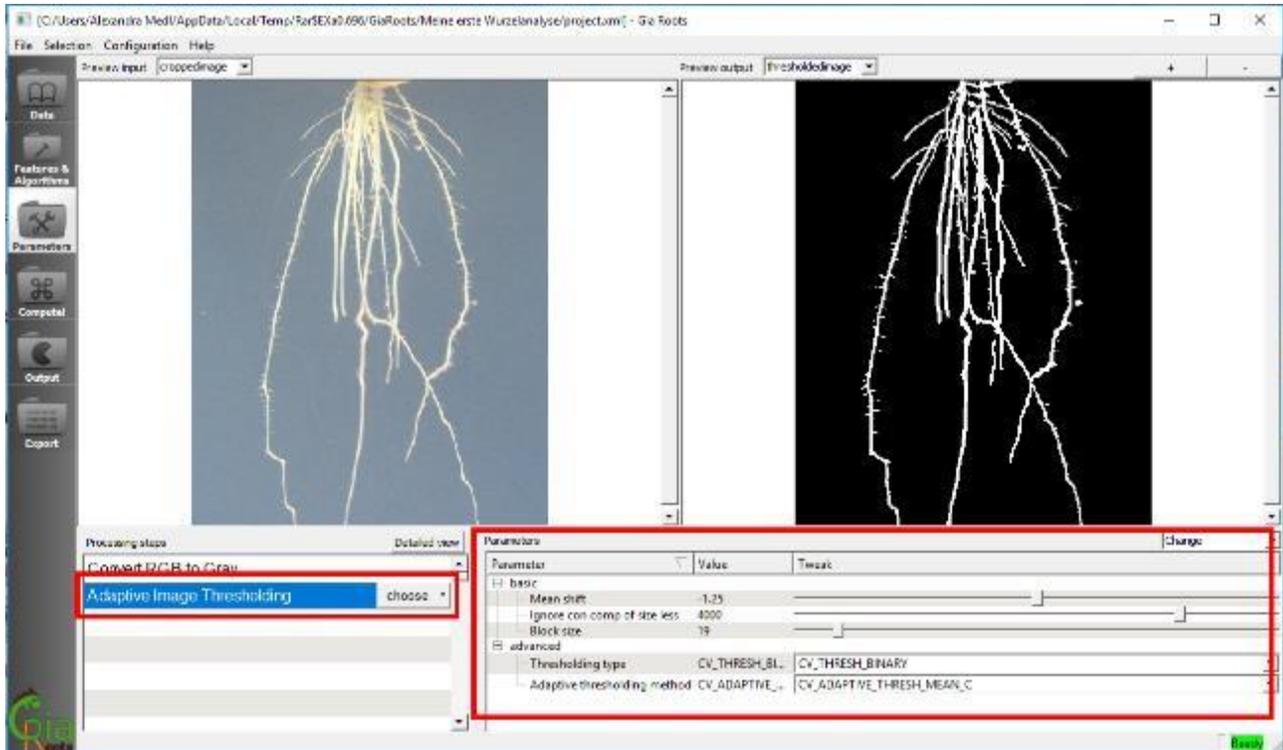
Schritt 5: Unter ‚Features & Algorithms‘ die darzustellenden Parameter anklicken.



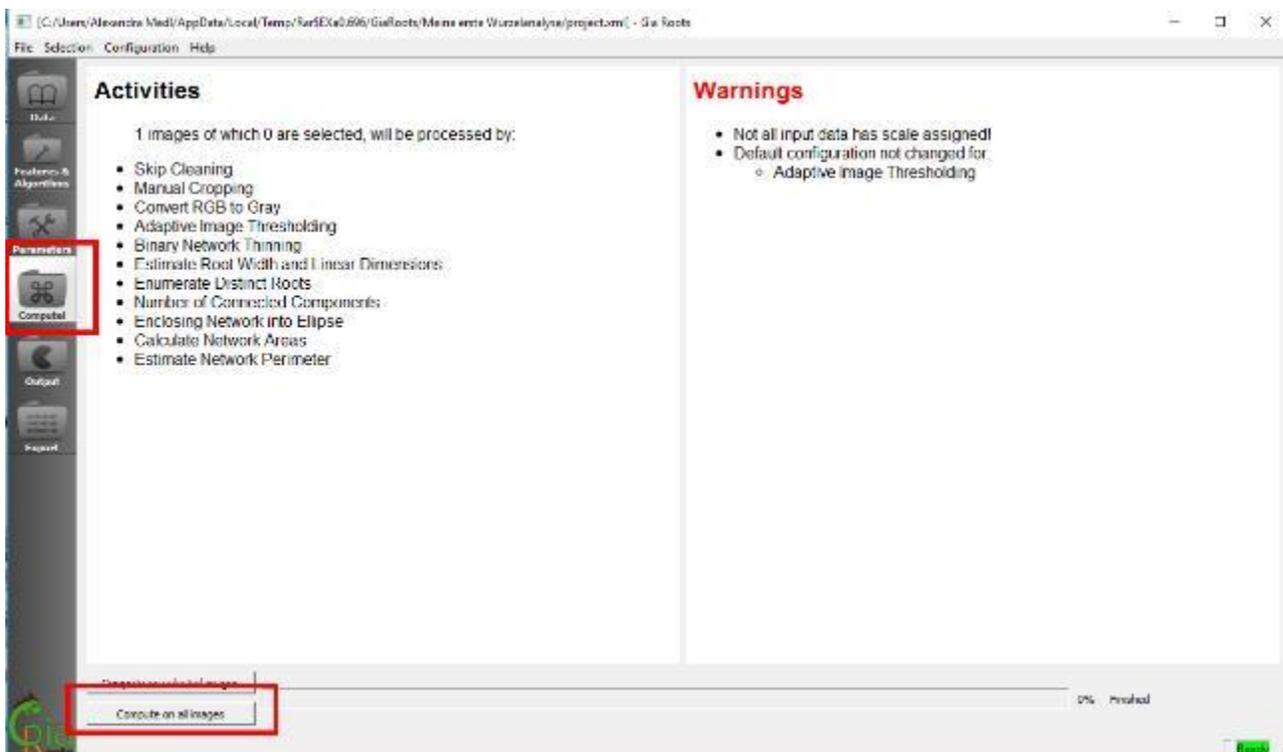
Schritt 6: Unter ‚Parameters‘ die darzustellenden Parameter anklicken. Haken! bei Dark root on bright background wegklicken.



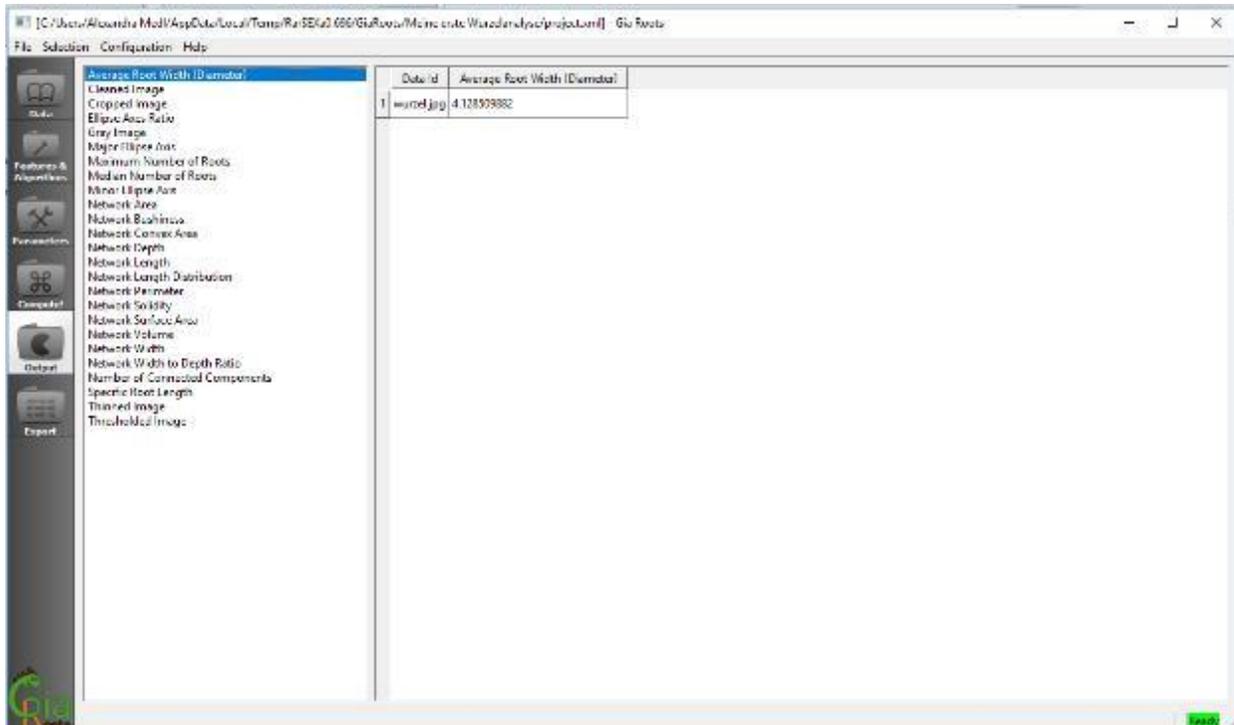
Schritt 7: Adaptive Image Thresholding so lassen wie vorgegeben.



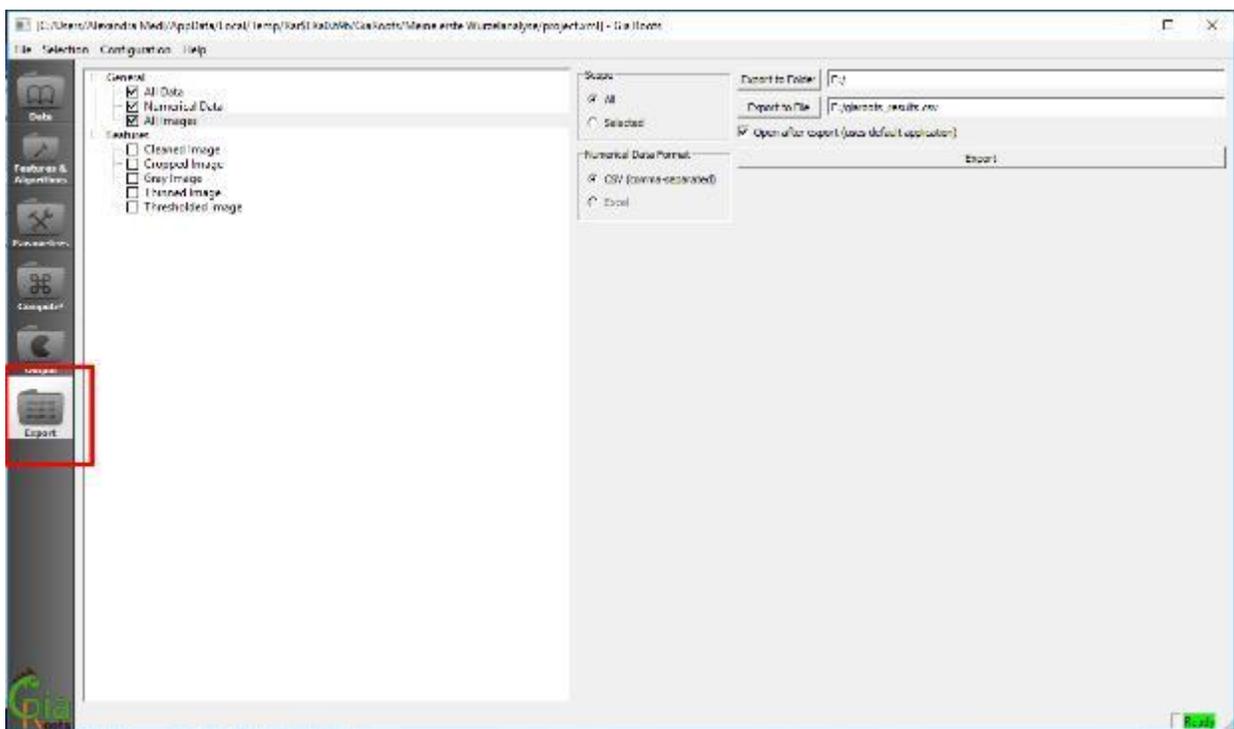
Schritt 7: Unter ‚Compute‘ ‚Compute on all Images anklicken‘.



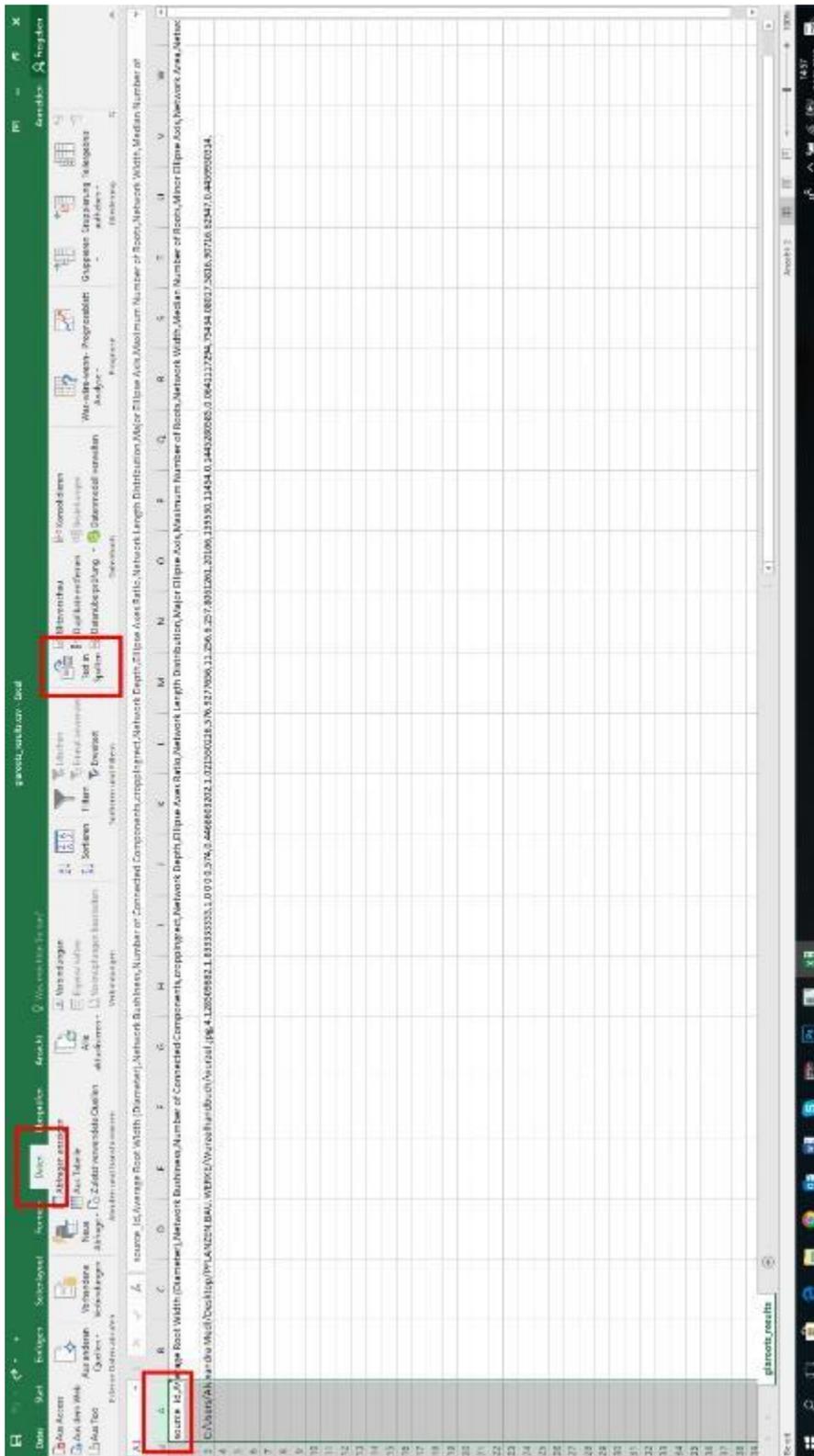
Schritt 7: Unter ‚Output‘ sind die gewonnenen Daten nachzulesen.



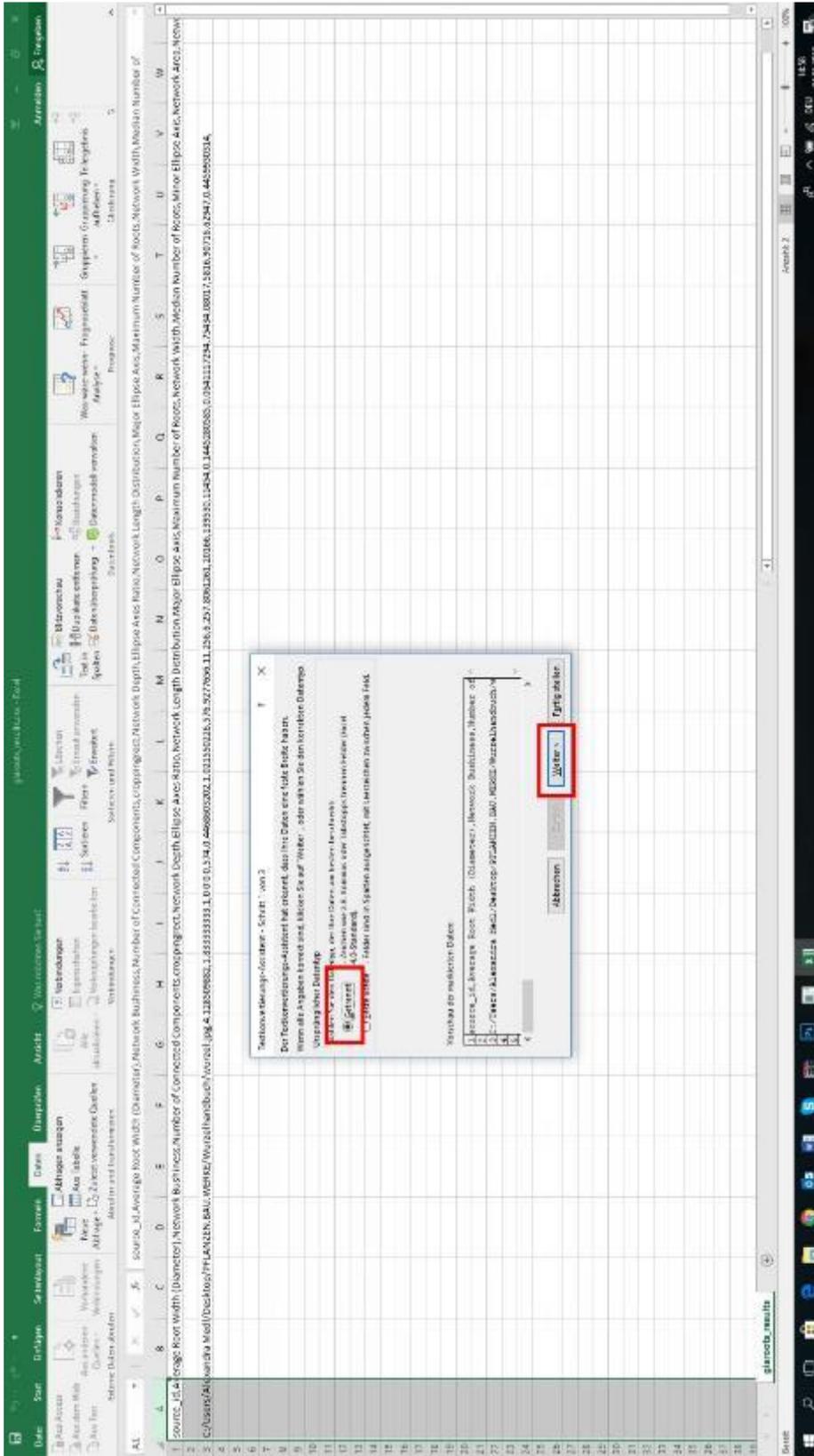
Schritt 8: Unter ‚Export‘ können die Daten als .csv gespeichert werden, welches dann in eine Excel-Datei umgewandelt werden kann.



**Umwandlung .csv in ein xls:** Öffnen der .csv-Datei in Excel. Dazu Excel starten → Datei → Öffnen → Datei auswählen. Erste Spalte (Spalte, in welcher sich die Daten befinden) markieren und unter ‚Daten‘ ‚Text in Spalten auswählen‘.



Button ‚Getrennt‘ anklicken → Weiter.







Fertig.

Source	Average Root Width (Eilametry)	Networks Built/View	Number of Connected Components	Mapping of Network Depth	Ellipse Area Ratio	Network Length Distribution	Major Ellipse Axis	Maximum Number of Roots	Network with Most Minor Ellipses	Minor Ellipse Axis	Networks with Most Minor Ellipses	Networks with Most Minor Ellipses	Networks with Most Minor Ellipses
glanslots results	4,228,879,882	1,853,333,333	1,000,000	5,74,0,444680202	1,021,350,226	5,789,277,696	11	296	6	888888888	20286	319330	4

## 4. LITERATURVERZEICHNIS

- ATKINSON, D.** (1991): Plant Root Growth. Oxford: Blackwell Scientific Publications.
- BALDER, H.** (1998): Die Wurzeln der Stadtbäume. Ein Handbuch zum vorbeugenden und nachsorgenden Wurzelschutz. Parey Buchverlag, Berlin.
- CANNEL, M.G.R.** (1985): Dry matter partitioning in tree crops. In: CANNEL M.G.R., JACKSON J.E. (eds) Attributes of trees as crop plants. Huntington. Institute of Terrestrial Ecology.
- COMBES, R.** (1946): La forme des végétaux et le milieu. Colect. Armand Colin 240. Paris.
- DONG S., NEILSEN D., NEILSEN G. H., WEIS M.** (2003): A Scanner-based Root Image Acquisition Technique for Measuring Roots on a Rhizotron Window. Hort Science 38 (7), 1385–1388.
- DORRIGHI, P.** (2016): Die Bewurzelung von Stechhölzern der Purpur-Weide (*Salix purpurea*) in Abhängigkeit unterschiedlicher Bodenkorngrößen. Masterarbeit. Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Universität für Bodenkultur, Wien.
- E.F.I.B** (Europäische Föderation für Ingenieurbiologie, 2015): Europäische Richtlinie für Ingenieurbiologie.
- FLORINETH, F.** (2012): Pflanzen statt Beton. Sichern und Gestalten mit Pflanzen. 2. Auflage. Patzer Verlag, Berlin-Hannover.
- GiA Roots Manual** (2011): Georgia Tech Research Corporation and Duke University.
- 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.
- JOHANNSON, N.** (1927): Einige Versuche über die Einwirkung verschiedener Belichtung auf die vegetative Entwicklung von *Raphanus sativus*. Flora N. F. 2.
- KLEPPER B.** (1991): Root-shoot relationship. In: WAISEL Y., ESHEL A., KAFKAFI U. (eds) Plant roots. The hidden half. New York, Dekker.
- KLEPPER B., KASPER T.C.** (1994): Rhizotrons: Their Development and Use in Agricultural Research. Agronomy Journal 86.
- KNAPP, R.** (1967): Die Vegetation von Nord- und Mittelamerika und der Hawaii-Inseln. G. Fischer. Stuttgart.
- KOPINGA, J.** (1994): Aspects of the damage to asphalt road pavings caused by roots. In Watson, G., and D. Neely (Eds.). The Landscape Below Ground. Proceedings of an International Workshop on Tree Root Development in Urban Soils. International Society of Arboriculture, Champaign, IL.
- KÖSTLER, J. N., BRÜCKNER, E., BIBELRIETHER, H.** (1968): Die Wurzeln der Waldbäume, Untersuchungen zur Morphologie der Waldbäume in Mitteleuropa. Hamburg – Berlin.
- KÜCK, U., WOLFF, G.** (2009): Botanisches Grundpraktikum. 2. überarbeitete und aktualisierte Auflage. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- KULL, U.** (2000): Grundriss der allgemeinen Botanik. Spektrum, Akad. Verlag, Heidelberg.

- KUTSCHERA, L.** (1960): Wurzelatlas mitteleuropäischer Äckerunkräuter und Kulturpflanzen. DLG, Frankfurt am Main.
- KUTSCHERA, L., LICHTENEGGER, E.** (2002): Wurzelatlas mitteleuropäischer Waldbäume du Stäucher. 1. Auflage. Leopold Stocker Verlag. Graz-Stuttgart.
- KUTSCHERA, L., LICHTENEGGER, E.** (2013): Wurzelatlas mitteleuropäischer Waldbäume du Stäucher. 2. Auflage. Leopold Stocker Verlag. Graz-Stuttgart.
- LOBET G., DRAYE X., PERILLEUX C.** (2013): An online database for plant image analysis software tools. Plant Methods 9.
- LÜTTGE, U., KLUGE, M.** (2012): Botanik: Die einführende Biologie der Pflanzen. 7. Auflage, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- MÜLLNER, M.** (2016): Gehölzwurzeln als Schadensverursacher von asphaltierten Wegebelägen. Das Eindringen von Wurzeln in Wegebelägen mit Kantkorn unterschiedlicher Korngrößenverteilung. Masterarbeit. Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Universität für Bodenkultur, Wien.
- NEUMANN G., TIMOTHY S. G., PLASSARD C.** (2009): Strategies and methods for studying the rhizosphere: the plant science toolbox. Plant and Soil 321.
- OMAROVA, D.** (2016): Die Wurzelarchitektur von Purpur-Weiden in Böden verschiedener Korngrößen – Untersuchungen mit Hilfe der Rhizobox. Dissertation in Bearbeitung. Universität für Bodenkultur. Wien.
- PFLERGER, J.** (2014): Verwendung von Rhizotronen zur Beobachtung der Wurzelarchitektur von Weidensteckhölzern. Aufnahme- und Auswertungsmethoden von Rhizotronbildern. Masterarbeit. Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Universität für Bodenkultur, Wien.
- POLOMSKI, J., KUHN, N.** (1998): Wurzelsysteme, Verlag Paul Haupt. Bern – Stuttgart – Wien.
- RAMANN, E.** (1898): Der Einfluss verschiedener Bodendecken auf die physikalischen Eigenschaften der Böden. Zeitschrift Forst- u. Jagdwirtschaft. 30.
- REICHWEIN, S.** (2002): Baumwurzeln unter Verkehrsflächen. Untersuchungen zu Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln und Ansätze zur Schadensbehebung und Schadensvermeidungen. Dissertation am Fachbereich Landschaftsarchitektur und Umweltentwicklung der Universität Hannover. Beiträge zur räumlichen Planung. Band 66. Schriftenreihe des Fachbereichs Landschaftsarchitektur und Umweltentwicklung der Universität Hannover.
- RÖHRIG, E.** (1966): Die Wurzelentwicklung der Waldbäume in Abhängigkeit von den ökologischen Verhältnissen. Forstarchiv 37.
- SCHEFFER, F., SCHACHSTSCHNABEL, P.** (2010): Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag GmbH Heidelberg – Berlin.
- SCHLÜTER, U.** (1984): Zur Geschichte der Ingenieurbiologie. Landschaft und Stadt, Heft 16 (1/2).
- SMARTROOT** (2014): SmartRoot Manual Version 4.1.
- SMIT, A.L., BENGOUGH, A.G., ENGELS, C., NOORDWIJK, M., PELLERIN, S., GEIJN, S.C.** (eds.) (2000): Root Methods. Springer-Verlag, Berlin.

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

**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.

**UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN** (2012): SmartRoot. Online im Internet: <http://www.uclouvain.be/en-smartroot> Stand: 24.01.2014

**WinRhizo™** (2009): Regent Instruments Canada Inc.

*Das vorliegende Handbuch dient zur Unterstützung der im Rahmen des Projektes PFLANZEN.BAU.WERKE durchgeführten Forschungsworkshops und ist ausschließlich für den privaten, persönlichen Gebrauch der Lehrenden und SchülerInnen bestimmt und explizit nur für die Verwendung im Rahmen dieser Veranstaltung hergestellt. Das Handbuch ist für den Schul-, Studien- und Unterrichtsgebrauch bestimmt und daher von der freien Werknutzung zum eigenen Schulgebrauch ausgenommen. Das Zugänglichmachen, Vervielfältigen oder die Weitergabe an Dritte als Ganzes oder auszugsweise ist unabhängig von der Form, wenn nichts anderes vereinbart, untersagt.*