



universität
wien

MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

„Untersuchungen zur Wurzelverteilung in einem
Schweizer Agroforstsystem“

verfasst von / submitted by

Sina Siedler BSc

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Master of Science (MSc)

Wien, 2016 / Vienna 2016

Studienkennzahl lt. Studienblatt /
degree programme code as it appears on
the student record sheet:

A 066879

Studienrichtung lt. Studienblatt /
degree programme as it appears on
the student record sheet:

Masterstudium Naturschutz und Biodiversitätsmanagement

Betreut von / Supervisor:

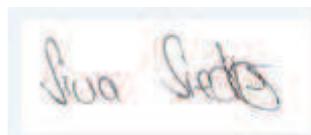
Ass. Prof. Dr. Thomas Wrbka

Erklärung

Hiermit erkläre ich,

- dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt habe und die aus anderen Quellen entnommenen Stellen als solche gekennzeichnet habe
- dass die eingereichte Arbeit weder vollständig noch in wesentlichen Teilen Gegenstand eines anderen Prüfungsverfahrens gewesen ist.

Nidau, den 04.10.2016

A rectangular box containing a handwritten signature in blue ink. The signature appears to read 'Sina Siedler'.

Sina Siedler, BSc

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde am Institut für Nachhaltigkeitswissenschaften des Kompetenzzentrums für landwirtschaftliche Forschung, Agroscope, Schweiz in der Arbeitsgruppe Landschaft und Biodiversität durchgeführt.

Besonders danken möchte ich meinen Betreuern Dr. Thomas Wrbka, Dr. Felix Herzog, Sonja Kay und Marta Petrillo für die umfassende und anregende Betreuung während der Durchführung und Erstellung dieser Arbeit sowie für die Möglichkeit eigenständig arbeiten zu können.

Des Weiteren möchte ich allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, Doktorandinnen und Doktoranden, MSc-Kandidatinnen und –Kandidaten sowie den Zivildienstlern der Arbeitsgruppe für die Unterstützung und Schaffung eines so schönen Arbeitsklimas danken.

Ein besonderer Dank geht auch an die Familie Dasen, die mir die Beprobung ihrer Apfel- und Birnbäume erlaubte, um die Morphologie der Baumwurzeln zu erlernen. Ebenso wie ich Gerhard Amrein für die Zurverfügungstellung seiner agroforstlich genutzten Fläche für meine Probennahme danken möchte sowie für seine stets freundlichen und hilfsbereiten Antworten bezüglich meiner zahlreichen Fragen über sein Bewirtschaftungssystem.

Nicht zuletzt ein großes Dankeschön auch an meine Familie und meinen Lebensgefährten David Blösch, die mich in den Jahren meines Studiums unterstützt und motiviert haben.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| 1. Einleitung | 1 |
| Der Begriff „Agroforstsystem“ | 2 |
| Geschichte der Agroforstsysteme in Europa vor dem Hintergrund der landwirtschaftlichen Entwicklung | 3 |
| Vorteile von Agroforstsystemen | 4 |
| Vorteile ohne Nachteile? – Konkurrenz in Agroforstsystemen | 5 |
| Spezieller Blick auf die Wurzelzone in Agroforstsystemen | 6 |
| Radialsymmetrie bei Baumwurzeln? | 9 |
| Zielsetzung | 9 |
| | |
| 2. Material und Methoden | |
| 2.1 Untersuchungsgebiet und Testorganismen | 11 |
| 2.2 Erlernen der Wurzelmorphologie | 12 |
| <i>Trifolium alexandrinum</i> und <i>Trifolium resupinatum</i> | 12 |
| <i>Lolium multiflorum</i> | 13 |
| <i>Dactylis glomerata</i> | 14 |
| <i>Malus sylvestris</i> und <i>Pyrus pyraeaster</i> | 14 |
| Vergleich der holzigen und krautigen Wurzelmorphologie | 15 |
| 2.3 Probennahme | 15 |
| 2.4 Gravimetrischer Wassergehalt und Lagerungsdichte | 17 |
| 2.5 Wurzelanalyse | 17 |
| 2.5.1 Erstellen der Kalibrierungskurve | 18 |
| 2.5.2 Vertikale Verteilung der Wurzellängendichten nach dem Gale & grigal-Modell | 20 |
| 2.6 Datenanalyse | 21 |
| | |
| 3. Ergebnisse | |
| 3.1 Bestimmung der Wurzellängendichten (WLD) | 23 |
| 3.2 Wurzelverteilungsmuster | 24 |
| 3.2.1 Vergleichende Gesamtbetrachtung | 25 |
| 3.2.2 Vertikale Wurzelverteilung | 24 |
| 3.2.3 Horizontale Wurzelverteilung | 28 |

| | |
|---|----|
| 3.2.4 Gale & Grigal Modell | 33 |
| 3.3 Lagerungsdichte | 35 |
| 3.4 Gravimetrischer Wassergehalt | 36 |
| 4. Diskussion | |
| 4.1 Kalibrierungskurve zur Schätzung der Wurzellängendichten | 37 |
| 4.2 Lagerungsdichte und Wassergehalt | 38 |
| 4.3 Wurzelsysteme | 38 |
| 4.3.1 Wurzelsysteme der Gräser | 39 |
| 4.3.2 Wurzelsystem der Bäume | 40 |
| 4.3.3 Kombinierte Wurzelsysteme: Interaktionen und Folgen für die Konkurrenz um Bodenressourcen | 41 |
| 4.4 Zukunftsprognose und weiterer Forschungsbedarf | 44 |
| 4.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen auf ökologischer und ökonomischer Ebene | 45 |
| 5. Literaturverzeichnis | 47 |
| 6. Anhang | |
| Zusammenfassung | 57 |
| Abstract | 58 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: : Alley-Cropping System des Naturhofs Amrein zum Besichtigungszeitpunkt im Februar 2016. | 11 |
| Abbildung 2: Anzucht von <i>Trifolium alexandrinum</i> und <i>Trifolium resupinatum</i> . | 12 |
| Abbildung 3: Wurzelmorphologie der Kleearten. | 13 |
| Abbildung 4: Wurzelmorphologie von <i>Lolium multiflorum</i> . | 13 |
| Abbildung 5: Herbarbeleg für <i>Dactylis glomerata</i> . | 14 |
| Abbildung 6: Wurzelmorphologie der Apfel- und Birnbäume. | 14 |
| Abbildung 7: Weiße Wurzelspitze bei einem Birnbaum. | 15 |
| Abbildung 8: Eine Wurzelprobe nach der Sortierung in Gras- und Baumwurzeln. | 15 |
| Abbildung 9: Eine Auswahl der entnommenen Bodenkerne aus dem Agroforstsystem. | 16 |
| Abbildung 10: Schemaskizze des Untersuchungsdesigns. | 16 |
| Abbildung 11: Core-break Methode zur Schätzung der Wurzellängendichte. | 18 |
| Abbildung 12: Eine herausragende Wurzel eines Holzapfelbaums an der Kernbruchstelle | 19 |
| Abbildung 13: Die Wurzelwaschmaschine. | 19 |
| Abbildung 14: Ausschnitt aus einem Wurzel-Scan. | 20 |
| Abbildung 15: Erklärung der verwendeten Abkürzungen in grafischer Form. | 24 |
| Abbildung 16: Die unterschiedliche Veränderung der Wurzellängendichten der Baumwurzeln mit zunehmender Tiefe bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung. | 42 |

Grafikverzeichnis

| | |
|--|----|
| Grafik 1: Lineare Regression zwischen der Anzahl von Wurzeln an einer horizontalen Ebene (N_{Wurzeln}) und der Wurzellängendichte (WLD) bei Gräsern. | 23 |
| Grafik 2: Lineare Regression zwischen der Anzahl von Wurzeln an einer horizontalen Ebene (N_{Wurzeln}) und der Wurzellängendichte (WLD) bei Bäumen. | 23 |
| Grafik 3: Veränderung der Wurzellängendichte (km m^{-3}) mit der Tiefe (cm), dargestellt für alle im Agroforstsystem vertretenen Pflanzengruppen (Kulturgräser und Baumwurzeln in der Kunstwiese sowie natürliche Gräser und Baumwurzeln in der Baumlinie). | 24 |
| Grafik 4: Veränderung der Wurzellängendichte (km m^{-3}) mit der Tiefe (cm), dargestellt für alle im Agroforstsystem vertretenen Pflanzengruppen (Kulturgräser und Baumwurzeln in der Kunstwiese sowie natürliche Gräser und Baumwurzeln in der Baumlinie). Diese Grafik zeigt in größerer Auflösung die Verhältnisse für die Wurzellängendichte von 0 – 25 km m^{-3} . | 25 |
| Grafik 5: Vergleich der Wurzelverteilung der natürlichen Gräser und Baumwurzeln in der Baumlinie. Die Blasengröße ist proportional zu den erhobenen Wurzellängendichten und zeigt die Wurzellängendichten der beiden Pflanzengruppen in unterschiedlichen Tiefen und Entfernungen zum Baumstamm. | 29 |
| Grafik 6: Vergleich der Wurzelverteilung der Kulturgräser und Baumwurzeln in der Kunstwiese. Die Blasengröße ist proportional zu den erhobenen Wurzellängendichten und zeigt die Wurzellängendichten der beiden Pflanzengruppen in unterschiedlichen Tiefen und Entfernungen zum Baumstamm. | 29 |
| Grafik 7: Vergleich der Wurzelverteilung der Kulturgräser in der Kunstwiese, der natürlichen Gräser in der Baumlinie und den Baumwurzeln, die in Richtung der Kunstwiese sowie innerhalb der Baumlinie gewachsen sind. Die Blasengröße ist proportional zu den erhobenen Wurzellängendichten und zeigt die Wurzelverteilung der verschiedenen Pflanzengruppen in unterschiedlichen Tiefen und Entfernungen zum Baumstamm. Zur besseren Übersicht wurden die Werte für die Bäume in der Kunstwiese auf einer um -5 cm versetzten sekundären Y-Achse eingezeichnet | 30 |
| Grafik 8: Boxplots der Wurzellängendichten bei d_{50} , d.h. in der Tiefe in der 50% der Wurzelmasse zu erwarten waren. Dargestellt sind diese für die verschiedenen Entfernungen zum Baumstamm (0,5 X, 1 X, 2 X, 3 X; mit X = Kronenradius) für alle Pflanzengruppen des Agroforstsystems (Kulturgräser und Baumwurzeln in der Kunstwiese sowie natürliche Gräser und Baumwurzeln in der Baumlinie) | 34 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 1: Vergleich der Spannweite der gezählten Wurzeln und der Wurzellängendichten (WLD) für Gräser und Bäume im Rahmen der Erstellung der Kalibrierungskurve. | 24 |
| Tabelle 2: Ergebnisse der statistischen Auswertung (zweiseitige t-Tests) des Vergleichs der Wurzellängendichten der Kulturgräser und der natürlichen Gräser; separiert für die einzelnen Tiefen (alle Entfernungen zum Baumstamm inkludiert). | 26 |
| Tabelle 3: Ergebnisse der statistischen Auswertung (zweiseitige t-Tests) des Vergleichs der Wurzellängendichten der Baumwurzeln, die in Richtung der Kunstwiese, bzw. innerhalb der Baumlinie, gewachsen sind; separiert für die einzelnen Tiefen (alle Entfernungen zum Baumstamm inkludiert). | 28 |
| Tabelle 4: Ergebnisse der statistischen Auswertung (Regression) des Einflusses einer zunehmenden Entfernung zum Baumstamm auf die Wurzellängendichten der Kulturgräser; separiert für die einzelnen Tiefen. | 32 |
| Tabelle 5: Ergebnisse der statistischen Auswertung (Regression) des Einflusses einer zunehmenden Entfernung zum Baumstamm auf die Wurzellängendichten der natürlichen Gräser; separiert für die einzelnen Tiefen. | 32 |
| Tabelle 6: Zusammenstellung von Literatur-Daten zur Wurzelverteilung von Gräsern und laubwerfenden Bäumen in gemäßigten Breiten. | 33 |
| Tabelle 7: Ergebnisse der statistischen Auswertung (zweiseitige t-Tests) des Vergleichs der Wurzellängendichten bei d_{50} der beiden Grasgruppen untereinander (Kulturgräser und natürliche Gräser); einzeln für jede Entfernung vom Baumstamm. | 35 |
| Tabelle 8: Ergebnisse der statistischen Auswertung (zweiseitige t-Tests) des Vergleichs der Wurzellängendichten bei d_{50} der Baumwurzeln, die innerhalb der Baumlinie wuchsen (WLD_{BaumB}) und denen, die in Richtung der Kunstwiese gewachsen sind (WLD_{BaumK}); einzeln für jede Entfernung vom Baumstamm. | 35 |
| Tabelle 9: Ergebnisse der statistischen Auswertung (ANKOVA) über die Lagerungsdichte. Einflussfaktoren stellten die <i>Entfernung zum Baumstamm</i> und die <i>Tiefe</i> dar, Zielvariable war die <i>Lagerungsdichte</i> . | 36 |
| Tabelle 10: Ergebnisse der statistischen Auswertung (Wilcoxon-Test) des Vergleichs der Wassergehalte in der Baumlinie und in der Kunstwiese; einzeln für jede Tiefe. | 36 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|----------------------|---|
| WLD | Wurzellängendichte |
| WLD _{BaumB} | Wurzellängendichte der Baumwurzeln, die innerhalb der Baumlinie gewachsen sind |
| WLD _{BaumK} | Wurzellängendichte der Baumwurzeln, die in Richtung der Kunstwiese gewachsen sind |
| WLD _{GrasB} | Wurzellängendichte der natürlichen Gräser in der Baumlinie |
| WLD _{GrasK} | Wurzellängendichte der Kulturgräser in der Kunstwiese |

1 Einleitung

Lange Zeit begleiteten Bäume die europäische Landwirtschaft und lieferten eine Reihe von ökosystemaren Dienstleistungen (Sereke et al. 2015). Mit der Industrialisierung und Intensivierung der Landwirtschaft in der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts mussten sie jedoch dem Einsatz von großen Maschinen, agrarpolitischen Entscheidungen und Flurbereinigungen weichen und verschwanden zunehmend aus den agrarischen Bewirtschaftungsplänen (Plieninger et al. 2003, Kumar und Nair 2006, Palang und Fry 2013, Sereke et al. 2015).

Heute erlebt die Kombination von agrar- und forstwirtschaftlichen Elementen unter dem Namen Agroforstwirtschaft eine Renaissance (Luick und Vonhoff 2009). Immer wieder ist die Rede von ökologischen und ökonomischen Vorteilen der kleinstrukturierten Systeme (Batish et al. 2007, Unseld et al. 2011). Sogenannte Schweizer Pionier-Bauern kombinieren wieder ganz gezielt Bäume mit Ackerkulturen, um die Produktivität auf ihrem Land zu steigern und von Synergien zwischen Bäumen und Ackerfrüchten zu profitieren (Sereke et al. 2015). Dabei kann es allerdings auch zu Konkurrenzen zwischen den Elementen eines Agroforstsystems kommen, die die Vorteile überlagern können (Van Noordwijk und Purnomosidhi 1995).

Während es zahlreiche Untersuchungen in tropischen Agroforstsystemen gibt (Nair 1993, Kumar und Nair 2006), sind diese in gemäßigten Breiten relativ wenig erforscht (Sereke et al. 2015). Insbesondere Interaktionen in der Wurzelzone stellen mehr oder weniger eine „Blackbox“ dar (Ong et al. 1991, Borden et al. 2016), was auf die Schwierigkeit und Komplexität von Wurzeluntersuchungen zurückzuführen ist (Jose et al. 2001, Smith et al. 1999). Lange Zeit ging man davon aus, dass Bäume nahezu grundsätzlich unterhalb der Wurzelzone von Acker- oder Reingraskulturen wurzeln und es deshalb zu wenig unterirdischen Konkurrenzen käme (Huxley 1983, Ong et al. 1991, Batish et al. 2007). Unterirdische Wurzelkonkurrenz entsteht, wenn ein Wurzelsystem den Zugang des anderen Wurzelsystems zu Wasser und Nährstoffen reduziert (Schroth 1995). Die Wahrscheinlichkeit, dass dies eintritt, ist größer, wenn zwei Wurzelsysteme dieselbe Wurzelzone besiedeln (Schroth 1995, Schroth 1998, Akkinifesi et al. 1999, Akinnifesi et al. 2004). Neuere Studien zeigen, dass die Wurzelarchitektur verschiedener Baumarten in Agroforstsystemen durchaus unterschiedlich sein kann und nicht jeder Baum gleich geeignet ist, um unterirdische Konkurrenzen von Bäumen und Ackerkulturen zu reduzieren (Livesley et al. 2000, Borden et al. 2016).

Wie ist vor diesem Hintergrund die Wurzelverteilung unserer heimischen Kernobstbäume zu beurteilen? Sind diese geeignet, um in Agroforstsystemen integriert zu werden und wieder für mehr Strukturen, Biodiversität und andere Ökosystemdienstleistungen (Brix et al. 2009) zu sorgen? Oder bilden die, als Flachwurzler bekannten, Baumarten (Yocum 1937, Kolesnikov 1971, Sutton und Tinus 1983) auch in Assoziation mit Ackerkulturen und Bodenbearbeitung den Großteil ihrer Wurzeln in oberflächennahen Bodenschichten aus und überlagern dadurch womöglich die Vorteile, die sie dem Agroforstsystem beisteuern (Van Noordwijk und Purnomosidhi 1995, van Noordwijk und Hairiah 2000, Brix et al. 2009)?

Diesen Fragen wird in der hier vorliegenden Masterarbeit am Beispiel von Holzapfel- und

Wildbirnbäumen nachgegangen, die in einem Schweizer Agroforstsystem zusammen mit einer typischen Herbst-Zwischenfutter-Kunstwiese¹ stehen. Durchgeführt wurde die Studie am Institut für Nachhaltigkeitswissenschaften des Kompetenzzentrums für landwirtschaftliche Forschung, Agroscope, im Rahmen des EU-Projekts AGFORWARD.

Die Aufstellung der konkreten Arbeitshypothesen sowie die Erläuterung der Hintergründe erfolgt ausführlich in den folgenden Abschnitten. Außerdem wurde ein besonderes Augenmerk auf die ökologischen Vorteile von Agroforstsystemen gelegt, was die Verbindung des Themas zum naturschutzfachlichen Bereich zeigen soll. Die geschichtliche Entwicklung von Agroforstsystemen und der Landwirtschaft an sich, ermöglicht eine kontextuelle Einordnung. Im 2. Kapitel wird die Methodik erläutert, Kapitel 3 zeigt die Ergebnisse, welche in Kapitel 4 diskutiert werden.

Der Begriff „Agroforstsystem“

Nach Lundgren und Raintree (1982) sind Agroforstsysteme Landnutzungssysteme in denen mehrjährige Gehölze, wie Bäume und Sträucher, mit einer Form der agrarwirtschaftlichen Nutzung gezielt auf einer Fläche kombiniert und bewirtschaftet werden. Es können zwei Arten von Agroforstsystemen unterschieden werden: In silvoarablen Systemen sind Bäume oder Sträucher mit einem ackerbaulichen Element kombiniert; in silvopastoralen Agroforstsystemen besteht die landwirtschaftliche Komponente aus Grünland- oder Weidenutzung (Lundgren und Raintree 1982, Chalmin und Augustenberg 2008).

Geschichte der Agroforstsysteme in Europa vor dem Hintergrund der landwirtschaftlichen Entwicklung

Bäume begleiten die Landwirtschaft seit einem Großteil der menschlichen Agrargeschichte (Sereke et al. 2015). Traditionell weit in Europa verbreitet waren silvopastorale Agroforstsysteme, wie beispielsweise Waldweide, Streunutzung und Eichelmast (Unselde et al. 2011). Schriftliche Dokumentationen der Waldweidenutzung gehen zurück bis ins 10. Jahrhundert (Brix et al. 2009). Ab dem 17. Jahrhundert begann der gezielte Ausbau von Streuobstwiesen, um, neben der Eigenversorgung, vor allem auch Früchte auf Märkten zu verkaufen (Küster 1996, Herzog 1998). Streuobstbestände wurden sowohl silvopastoral mit Viehweiden, als auch als silvoarable Systeme mit Mähwiesen als landwirtschaftlicher Komponente genutzt (Küster 1996). Und auch Heckensysteme, bei denen verschiedene Heckenformen als „lebende Zäune“ zur Abgrenzung von Weideflächen, zum Schutz der Weidetiere und der Gewinnung von Brenn- und Baumaterial genutzt wurden, sind seit dem 10. Jahrhundert dokumentiert (Brix et al. 2009).

Im letzten Jahrhundert wurde die Landwirtschaft zunehmend intensiviert und mechanisiert; hohe Erntemengen und eine ausreichende Nahrungsproduktion für die Bevölkerung waren die

¹ Kunstwiese ist ein in der Schweiz gebräuchlicher Begriff für eine vom Mensch angesäte Wiesenkultur und wird im weiteren Textverlauf synonym mit dem Wort Kulturwiese verwendet.

vorrangigen Ziele der Landwirtschaft (Brix et al. 2009). Es wurde verbessertes genetisches Material eingesetzt, moderne Managementtechniken genutzt, Dünger und Pestizide in großem Maß eingesetzt, ebenso wie große, spezialisierte Maschinen. Außerdem wurden kleinstrukturierte Landwirtschaftsflächen in große, ausgeräumte Parzellen umgewandelt (Bouma et al. 1998, Mermut und Eswaran 2001, Palma et al. 2007). Bäume und Hecken der traditionellen Agroforstsysteme mussten der modernisierten Bewirtschaftung, vor allem der Mechanisierung, weichen, da sie den Maschinen im Weg standen und die großen Geräte nicht unter den verstreut stehenden Gehölzen hindurchfahren konnten - und es kam zu Spezialisierungen in forstliche und landwirtschaftliche Aktivitäten (Brix et al. 2009). Die Schweizer Nachkriegspolitik finanzierte sogar Fällungen im Zuge der landwirtschaftlichen Modernisierung (Ewald und Klaus 2009). So ist es nicht verwunderlich, dass agroforstliche Praktiken in dieser Zeit einen starken Rückgang verzeichneten (Herzog 1998, Bürgi und Stuber 2003). Zahlen verdeutlichen dies: 1951 standen noch etwa 14 Millionen Bäume auf landwirtschaftlichem Boden in der Schweiz; im Jahr 2009 war die Zahl auf 2,9 Millionen geschrumpft (Bundesamt für Statistik/Eidgenössische Alkoholverwaltung 1993). In Österreich ist die Zahl von Streuobstwiesen zwischen 1968 und 1988 um 31 % zurückgegangen (Eichwalder 1990) und auch deutsche Streuobstbestände gingen nach Schätzungen des *NABU-Bundesfachausschuss Streuobst* von 1950 um 1,2 bis 1,5 Mio. ha auf rund 300.000 ha im Jahr 2011 zurück (Rösler 2011, Unseld et al. 2011).

Dennoch zeigen die Daten auch: Ganz verschwunden sind die Bäume aus den landwirtschaftlichen Flächen nie. Neben Streuobstwiesen haben sich auch Windschutzhecken in West-, Mittel- und Osteuropa in kleiner Zahl gehalten (Herzog 1998, Chalmin und Augustenberg 2008) und in Südeuropa zählen Dehesas zu heute noch vitalen Agroforstsystemen, die sich über drei Millionen Hektar ausbreiten (Moreno et al. 2005). Zudem erlebt der Agroforstgedanke wieder neuen Aufschwung. Moderne, produktionsorientierte Agroforstsystemen werden nach den Erfordernissen heutiger Produktionstechniken gestaltet und ermöglichen eine nahezu uneingeschränkte maschinelle Bewirtschaftung, sodass die Produktion ökonomisch konkurrenzfähig ist (Brix et al. 2009). Ein Beispiel stellt das Alley-Cropping-System dar, in welchem Baum- oder Buschreihen in Abwechslung mit Feldfrüchten oder Futterpflanzen auf Ackerlandstreifen stehen (Kang et al. 1989). Außerdem befindet sich die landwirtschaftliche Produktion momentan erneut in einem Wandel. Standen Mitte des 20. Jahrhunderts allein hohe Erträge im Vordergrund, stehen wir heute vor Problemen der Überproduktion und die Auswirkungen der intensivierten Landwirtschaft haben den Blick auf eine Umweltverträglichkeit der Landwirtschaft erweitert (Brix et al. 2009). Denn die erhöhten Erträge hatten auch ihren Preis: Es kam zum Verlust von halb-natürlichen und natürlichen Habitaten, was zu einem Rückgang der Biodiversität auf Landwirtschaftsflächen führte. Ebenso stellten sich Bodenerosionen durch die ausgeräumten Landschaften ein und es kam zu Bodenverdichtungen durch die schweren Maschinen. Der vermehrte Einsatz von Düngern und Pestiziden führte zur Verschmutzung der Grund- und Oberflächenwasser; verstärkt durch hohe Auswaschung in den ausgeräumten Großparzellen (Bouma et al. 1998, Mermut und Eswaran 2001, Palma et al. 2007).

Auch die Verbraucher werden sensibilisierter für Umweltthematiken und der Schutz der biologischen Vielfalt und der Umwelt gewinnt stetig an Bedeutung (Brix et al. 2009). Agroforstsysteme sind typischerweise mit einer Reihe von Vorteilen für die Umwelt und die Natur verbunden und stellen eine Möglichkeit dar, die Umweltverträglichkeit der Landwirtschaft zu verbessern (Palma et al. 2007). Die (ökologischen) Vorteile von Agroforstsystemen werden im nächsten Kapitel dargestellt.

Vorteile von Agroforstsystemen

Agroforstsysteme können biologisch produktiver als reine Ackerfrucht- oder Baum-Systeme sein, vorausgesetzt die beiden Komponenten sind zumindest zum Teil komplementär in der ober- und unterirdischen Ressourcennutzung (Van Noordwijk et al. 1991a). Dies ist der Fall, wenn Bäume in Bereiche vordringen, die für die Ackerfrüchte nicht verfügbar sind und dort beispielsweise tiefgelegenes Grundwasser erschliessen (Droppelmann et al. 2000), oder die Bäume und Ackerfrüchte ihre oberirdische Biomasse zu unterschiedlichen Zeitpunkten ausbilden, sodass insgesamt ein größerer Anteil der einfallenden Strahlung von Blättern aufgefangen und photosynthetisch genutzt werden kann (Cannell et al. 1996). Dann kann die Gesamtproduktivität des Agroforstsystem größer sein, als die kumulative Produktion getrennter Systeme auf einer äquivalenten Fläche (Cannell et al. 1996). Dies, da mehr limitierende Ressourcen genutzt werden, was eine vermehrte Verwendung von nicht-limitierenden Ressourcen ermöglicht, die nach Definition verfügbar, aber nicht ausgenutzt sind (Tilman 1985, Tilman und Grace 1990).

Bäume üben auch direkte positive Effekte auf die landwirtschaftlichen Kulturen aus, welche dem Natur-, Umweltschutz und dem Landnutzer zugutekommen: Baumstrukturen in landwirtschaftlichen Flächen liefern den Vorteil, dass sie die Wasserverfügbarkeit auf der Fläche erhöhen, indem sie die Windgeschwindigkeit und damit auch die Evaporation des Bodens reduzieren (Brix et al. 2009). Außerdem können Baumwurzeln vor Nährstoffauswaschung schützen indem sie als Auffangnetze unter der Ackerfruchtwurzelzone fungieren. Dabei kann das tiefer gelegene Wurzelnetz der Bäume Nährstoffe auffangen und nutzen, die durch Starkregen-Ereignisse sonst schnell ausgewaschen würden, und diese im Agroforstsystem speichern (Van Noordwijk et al. 1991a, van Noordwijk und Hairiah 2000). Weiterhin können Bäume in Agrarsystemen vor Wind- und Wassererosion schützen, erhöhen die Anreicherung von Biomasse und Nährstoffen durch Blattfall und Ausbildung von Feinwurzeln mit schnellen Umwandlungsraten; und sie können für ein verbessertes Mikroklima, ausgeglichene Temperaturen im Herbst und Frühjahr sowie für eine Förderung von Nützlingen sorgen (Burgess et al. 2000, Brix et al. 2009, Unseld et al. 2011). Eine weitere positive Auswirkung von Agroforstsystemen auf die Umwelt betrifft die Kohlenstoffspeicherung: Durch die Einführung von Bäumen in reine Grünland und Ackerbaubetriebe kann die Menge an gebundenem Kohlenstoff erhöht werden (Sharrow und Ismail 2004, Kirby und Potvin 2007). Zusätzlich zur großen Menge oberirdisch gespeicherten Kohlenstoffs speichern Agroforstsysteme Kohlenstoff auch verstärkt unterirdisch, wobei die größte und dauerhafteste Form der Kohlenstoffbindung entsteht, wenn die

Bäume erst in hohem Alter gefällt werden und anschließend langlebige Produkte gefertigt werden (Jose 2009).

Im Gegensatz zu Monokulturen, kann die Agroforstwirtschaft auch zur Diversifizierung der Einkommensquellen beitragen, was mehr Resilienz gegenüber externen Marktschwankungen oder dem krankheitsbedingten Ausfall einer Pflanzenart mit sich bringt (Graves et al. 2004, van der Werf et al. 2007).

Ein weiterer positiver Aspekt von Agroforstsystemen im Vergleich zur flächengetrennten agrarischen und forstlichen Nutzung stellt die potentielle Erhöhung der Biodiversität im betrachteten Produktionssystem dar. So zeigten Peng et al. (1993), dass die Abundanz und Vielfalt fliegender Arthropoden in einem untersuchten silvoarablen Agroforstsystem in Nordengland höher war, als auf der Kontroll-Ackerfläche. Weitere Studien in Grossbritannien zeigten, dass die Diversität von Arthropoden, wie Laufkäfern und Spinnen (Cuthbertson und McAdam 1996, Dennis et al. 1996, Burgess 1999, Mcadam et al. 2007) durch die Etablierung von silvopastoralen Systemen in reinen Grünlandbetrieben gefördert werden kann; ebenso wie die Einführung von silvoarablen Systemen zu einer Erhöhung der Vielfalt von kleinen Säugetieren führen kann (Wright 1994, Burgess 1999). Söderström et al. (2001) berichteten weiterhin über positive Effekte von Bäumen und Sträuchern in Weidelandschaften auf die Artenvielfalt von Vögeln in Schweden, was zum Teil auf die erhöhte Abundanz und Vielfalt von Insekten und anderen Invertebraten zurückgeführt wurde.

Es ist jedoch zu beachten, dass die Agroforstwirtschaft kein universelles Rezept liefert, um die Biodiversität oder ökologische Wertigkeit einer Produktionsfläche zu erhöhen; vielmehr ist eine Einzelfallbetrachtung anzustreben und die Bewertung eines neu zu etablierenden Agroforstsystems sollte sich am ökologischen Zustand der Ausgangsfläche orientieren. Während Aufwertungen vor allem auf intensiv genutzten Flächen erreicht werden können, sollten Veränderungen auf per se wertvollen, extensiv genutzten Flächen vorher sorgfältig geprüft werden (Reeg et al. 2009).

Vorteile ohne Nachteile? - Konkurrenz in Agroforstsystemen

Bislang wurden vor allem die möglichen Vorteile von Agroforstsystemen hervorgehoben. Um jedoch ein ganzheitliches Bild zu erstellen, sollen nun auch potentiell negative Effekte beleuchtet werden. Außerdem muss berücksichtigt werden, dass Agroforstsysteme, so viele ökologische Vorteile sie auch bergen mögen, Produktionsflächen bleiben, Erträge liefern sollen und an sich keine Naturschutzflächen darstellen, sodass vom Anbausystem induzierte große Ertragsdepressionen nicht tragbar wären (Nair 1993). Übermäßige Ertragsverluste in kombinierten Systemen haben weiterhin einen erhöhten Flächenbedarf zur Produktion zur Folge, was in einer erhöhten Umwandlung von natürlichen Habitaten in Anbauflächen resultiert und ökologischen oder naturschutzfachlichen Ambitionen entgegensteht (Jose 2009).

Prinzipiell können Bäume in landwirtschaftlichen Systemen Ertragsdepressionen durch Beschattung hervorrufen (Lichtkonkurrenz), ebenso wie es zu Konkurrenz um Wasser und Nährstoffe, einem

schlechteren Abtrocknen des Agrarbestands und somit einer erhöhten Anfälligkeit für Krankheiten kommen kann. Auch Allelopathie ist möglich sowie die Förderung von Schädlingen (Batish et al. 2007, Unseld et al. 2011). Die unterirdische Konkurrenzsituation wird im nächsten Abschnitt behandelt. Oberirdisch stellt Licht den Hauptfaktor dar, der Erträge in Agroforstsystemen beeinflusst (Batish et al. 2007). Dabei zeigten Chirko et al. (1996) beispielsweise, dass es in einer Mischkultur aus *Paulownia* und Winterweizen zu Ertragseinbußen des Winterweizens in der Nähe der Baumreihe kam, welche durch Beschattung der Baumkronen hervorgerufen wurden. Auch Lin et al. (1999) berichteten in einem Treibhausexperiment über eine signifikante Abnahme der Trockengewichte verschiedener Gras- und Gemüsearten durch Beschattung. Reduziert werden kann die Beschattung durch Bäume durch Asten (Miah et al. 1995, Reeg et al. 2009) und die Auswahl von Bäumen mit lichtdurchlässiger Krone (Reeg et al. 2009). Welche Auswirkung Beschattung hat, kann auch durch die Auswahl der Feldfrüchte beeinflusst werden: Im gemäßigten Klima erreichen C4-Pflanzen auch bei höchster Lichtintensität keine Lichtsättigung, sodass Beschattung für C4-Pflanzen in jedem Fall negativ ist. Aus landwirtschaftlicher Sicht sind C3-Pflanzen für die Kombination mit Bäumen deshalb besser geeignet (Reeg et al. 2009). Letztendlich ist jedes System ein Einzelfall und ob sich nun Konkurrenzbeziehungen um die Wachstumsfaktoren einstellen oder Synergieeffekte hängt vom Standort, dem Witterungsverlauf, den beteiligten Kulturen und der Ausrichtung des Gehölzstreifens ab (Unseld et al. 2011).

Spezieller Blick auf die Wurzelzone in Agroforstsystemen

Wie schon angedeutet, stellen unterirdische Interaktionen zwischen Feldfrüchten und Bäumen einen bedeutenden Aspekt in Agroforstsystemen dar. Während die oberirdischen Interaktionen aufgrund von guter Zugänglichkeit bereits in mehreren Studien untersucht wurden (Chirko et al. 1996, Lin et al. 1999, Batish et al. 2007, Reeg et al. 2009, Unseld et al. 2011), stellen die unterirdischen Zusammenhänge, vor allem in der gemäßigten Zone, in vielen Bereichen noch eine „Blackbox“ dar (Ong et al. 1991, Nair 1993, Borden et al. 2016). Die vorliegende Arbeit wirft daher einen Blick auf ein Schweizer Agroforstsystem, das typische Elemente des Obstbaus und der Grünlandbewirtschaftung kombiniert. Um den Leser in potentielle unterirdische Interaktionen einzuführen werden diese hier aufgegriffen und explizit erläutert, wobei die meisten Studien aus den Tropen und den Subtropen stammen.

Eine allgemeine Erwartung besagt, dass Bäume tiefer wurzeln, als Ackerfrüchte oder Reingraskulturen, Wasser aus tieferen Bodenschichten nutzen und andere Komponenten des Agroforstsystems unterirdisch kaum negativ beeinflussen (Batish et al. 2007).

Die Zersetzung von Baumwurzeln – im Zuge der Seneszenz oder nach dem Pflügen - führt außerdem zu einem Nährstoffeintrag für andere Pflanzen (Nambiar 1987, Ferrier und Alexander 1991, Schroth 1995). Des Weiteren wurde in verschiedenen Studien die Extension von Baumwurzeln in tiefe Unterbodenschichten und ihre Fähigkeit dort Nährstoffe aufzunehmen und

diese in die oberirdische Biomasse zu implementieren, gezeigt (Comerford et al. 1983, Stone und Kalisz 1991, Schroth 1995). Gehölze können zudem die Wurzelentwicklung von assoziierten Feldfrüchten fördern, indem sie Wurzelkanäle bilden (Stone und Kalisz 1991, van Noordwijk et al. 1991b, Schroth und Zech 1995), die Bodenstruktur durch eine vermehrte Aktivität von Regenwürmern (Hulugalle und Lal 1986) oder der Anreicherung durch organisches Material verbessern (Schroth 1995). Baumwurzeln können auch das bewurzelbare Bodenvolumen von nachfolgenden Feldfrüchten vergrößern, wenn sie zum Beispiel in verhärtete Bodenschichten eindringen und diese auflockern (Schroth 1995). Wie oben bereits erläutert, können Baumwurzeln als sogenannte „Auffangnetze“ fungieren, wenn sie Zonen unterhalb der Ackerfruchtwurzeln besiedeln (Van Noordwijk et al. 1991a, van Noordwijk und Hairiah 2000). Außerdem können Bäume durch hydraulischen Lift die Wasserversorgung der Bodenvegetation verbessern. Dabei kommt es zu einem Wassertransport von feuchten, tieferen Bodenschichten in die trockenere Oberfläche durch das Wurzelsystem der Bäume (Dawson 1993, Burgess et al. 1998, Lehmann 1998, Ong et al. 1999).

Die aufgeführten Prozesse lassen annehmen, dass der optimale Baum für den Erhalt der Bodenfruchtbarkeit ein Wurzelsystem mit einer hohen Biomasse, schnellen Umsatzrate und einer effizienten Nährstoffaufnahme aufweist. Allerdings können diese Eigenschaften gleichzeitig auch zu Wurzelkonkurrenz führen, wenn solche Bäume zusammen mit Feldfrüchten oder einer Kunstwiese angebaut werden (Schroth 1995). Wurzelkonkurrenz entsteht, wenn ein Wurzelsystem den Zugang des anderen Wurzelsystems zu Wasser und Nährstoffen reduziert, entweder indem es sie selbst aufnimmt (Schroth 1995), durch allelopathische Effekte (Rizvi et al. 1999) oder der Förderung von Wurzelkrankheiten (Mchowa und Ngugi 1994). Ersteres ist dabei die häufigste Form der Wurzelkonkurrenz (Nair 1993, Batish 2007) und wird weiterhin im Fokus stehen, da Allelopathie oder die Förderung von Wurzelkrankheiten für die untersuchten Arten im Schweizer Agroforstsystem nicht bekannt ist. Dass es Fälle gibt, in denen Bäume dieselben Bodenzonen besiedeln wie Ackerfrüchte und es zu folgenschwerer Konkurrenz um unterirdische Wachstumsressourcen kommt, zeigen Studien aus den Subtropen: Hier berichteten Singh et al. (1989) und Corlett et al. (1989), dass es zu Ertragsdepressionen bei Feldfrüchten, wie Bohnen und Hirse, in agroforstlich betriebenen Flächen kam, die durch die Errichtung von Wurzelbarrieren zwischen den forstlichen und agrarischen Komponenten aufgehoben werden konnte. Bei der Literaturrecherche fällt auf, dass in den meisten Studien der Ertrag der Feldfrüchte das Kriterium ist, nach welchem die Leistung des Agroforstsystems bewertet wird (Corlett et al. 1989, Singh et al. 1989, Malik und Sharma 1990, Nair 1993). Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Wurzelsystem der Feldfrüchte in der Regel geringere Ausmaße erreicht und auf Bodenhorizonte begrenzt ist, die auch von Bäumen in Agroforstsystemen erreicht werden können, wohingegen die Bäume in Bodenbereiche vordringen können, die jenseits der Reichweite der Feldfrüchte liegen, sodass unterirdische Konkurrenz für die Feldfruchtkomponente meist schwerwiegender ist (Nair 1993).

Um Konkurrenz mit Feldfrüchten oder Gräsern um unterirdische Ressourcen zu vermeiden, sollten

Bäume deshalb ein tiefes Wurzelsystem und eine geringe Wurzel­ausbreitung in den oberen Bodenschichten haben, sodass krautige Pflanzen die Ressourcen nahe der Oberfläche nutzen können, während die Bäume alleinigen Zugang zu den tieferen Bodenschichten haben (Schroth 1995, Cannell et al. 1995). Bei der Betrachtung der Wurzeltiefe ist es dennoch wichtig zwischen der maximalen Tiefe, die von einem Wurzelsystem erschlossen wird, und der Verteilung der Wurzeln zu unterscheiden. Oftmals werden Pflanzen als Flachwurzler deklariert, wenn sich eine starke Abnahme der Wurzelmasse in den oberen Bodenschichten zeigt (Schroth und Zech 1995, Schroth 1998). Sicherlich ist es wahrscheinlich, dass solche Pflanzen weniger Nährstoffe und Wasser aus Horizonten des Unterbodens aufnehmen, im Vergleich zu Pflanzen, die keinen so steilen Gradienten der vertikalen Wurzelverteilung aufweisen (Schroth 1998); allerdings können Pflanzen auch durchaus eine hohe Wurzelkonzentration im Oberboden haben und gleichzeitig einige sehr tiefe Wurzeln ausbilden. Dies wurde beispielsweise für einige Obstbaumarten in der gemäßigten Zone gezeigt: Sie vermögen Wurzeln in über 4 m Tiefe auszubilden, der Großteil ihrer Wurzeln befindet sich jedoch nahe der Oberfläche (Buwalda 1993).

Zwar kommt es nicht zwangsläufig zu starker Konkurrenz und nachteiligen Effekten auf die Feldfrüchte wenn Baumwurzeln in der Wurzelzone von assoziierten Feldfrüchten vorkommen (Schroth 1989, Akinnifesi et al. 2004), es ist jedoch wahrscheinlicher, dass Konkurrenzsituationen schärfer ausgeprägt sind, wenn Bäume ein flaches Wurzelwerk haben und überwiegend in den selben Tiefen wurzeln, wie die Feldfrüchte (Schroth 1995, Schroth 1998, Akinnifesi et al. 1999, Akinnifesi et al. 2004). Auf der anderen Seite können Feldfrüchte nur von dem Nährstoffeintrag durch Zersetzung von Baumwurzeln, der Ausbildung von Wurzelkanälen, hydraulischem Lift etc. profitieren, wenn sie zumindest einen Teil der Wurzelzone mit den Bäumen teilen (Schroth 1995, Batish et al. 2007).

Einige Studien zeigten, dass Bäume in Agroforstsystemen durch den Einfluss von Feldfrüchten in tiefere Bodenschichten ausweichen und es zu einer induzierten räumlichen Separierung auf vertikaler Ebene kommt (Yocum 1937, Mulia und Dupraz 2006, Zhang et al. 2015). Diese wird, nach den Autoren, vor allem dadurch hervorgerufen, dass die Feldfrüchte die oberen Bodenschichten besiedeln und die vorhandenen Wachstumsressourcen dort verbrauchen, sodass sich neu entwickelnde Baumwurzeln in tiefere Bodenschichten orientieren, wo vor allem die Wasserkapazität höher ist (Yocum 1937, Mulia und Dupraz 2006). Auch regelmäßiges Pflügen reduziert die laterale oberflächliche Ausbreitung von Baumwurzeln, was die Orientierung von Baumwurzeln in tiefere Bodenschichten beschleunigt (Brix et al. 2009). Dabei ist zu beachten, dass die Verteilung von Wurzeln sowohl vom Genotyp, als auch von den Bodenbedingungen, den Nährstoffverteilungen und der Vitalität der Pflanzen abhängt (Akinnifesi et al. 1998). Einige Studien zeigten eine erstaunliche morphologische Plastizität der Wurzelverteilung, die durch Ressourcenverfügbarkeit und/oder das Vorhandensein von konkurrierenden Pflanzen hervorgerufen wurde (Dawson et al. 2001, Wanvestraut et al. 2004, Moreno et al. 2005, Mulia und Dupraz 2005, Cahill et al. 2010, Isaac et al. 2014). So bildeten Steineichen Wurzeln in bis zu 5,2 m Tiefe aus, um eine Wasserkonkurrenz in

Dehesas zu vermeiden (Moreno et al. 2005), das Wurzelverteilungsmuster von Walnussbäumen in Mischkultur mit krautigen Pflanzen verschob sich um mehr als einen halben Meter nach unten (Mulia und Dupraz 2005) und auch Kirschbäume reagierten direkt mit einer Wurzelbildung in tieferen Bodenschichten auf krautige Konkurrenten (Dawson et al. 2001). Denn generell gilt in der Ökologie der Grundsatz, dass Arten dazu tendieren starke Konkurrenzen zu vermeiden und sich Nischenbildung einstellt (Grime 1973, Casper und Jackson 1997, Hall 1999).

Allerdings liegen in der Oberflächenschicht auch die höchsten Konzentrationen an Nährstoffen (v.a. N, P und K) und auch Sauerstoffmangel ist in flachen Bodenschichten am wenigsten wahrscheinlich (Jobbágy und Jackson 2001, Sposito 2008).

Dies lässt die spannende Frage aufkommen, wie sich diese Sachverhalte auf Wurzeln der Kernobstbäume und Kulturgräser im untersuchten Agroforstsystem auswirken. Kommt es zu einer induzierten räumlichen Separierung? Führt die Bodenbearbeitung und/oder Konkurrenz zwischen den Komponenten des Agroforstsystems dazu, dass Baumwurzeln in tiefere Bodenschichten ausweichen? Oder teilen sich die Baum- und Graswurzeln hier dieselbe Wurzelzone, was die Wahrscheinlichkeit von Konkurrenzen um unterirdische Ressourcen erhöht?

Radialsymmetrie bei Baumwurzeln?

Ein weiterer Aspekt, der bei Untersuchungen der Wurzelzone zu beachten ist, ist die Annahme einer Radialsymmetrie von Baumwurzeln. Diese wurde in einigen frühen Studien in Obstplantagen belegt, sodass die Orientierung einer Probennahme (sprich: innerhalb oder zwischen den Baumreihen) keinen Einfluss zu haben schien (Gandar und Hughes 1988, Hughes und Gandar 1993). 1998 kam eine Studie über Apfelbäume jedoch zu einem anderen Ergebnis: Hier zeigten 9-jährige Apfelbäume signifikant höhere Wurzelmassen zwischen den Baumreihen, als innerhalb der Baumreihen (De Silva et al. 1999).

Umso interessanter wird dieser Sachverhalt in einem Agroforstsystem, wo innerhalb der Baumreihen natürliche krautige Pflanzen zu finden sind, während zwischen den Baumreihen Feldfrüchte stehen, wobei sich nach Jackson et al. (1996) das Wurzelsystem von Feldfrüchten maßgeblich von dem anderer Biome unterscheiden soll. Zusätzlich kommt es zu unterschiedlichen Bodenbearbeitungen, da in den Feldfruchtreihen meist gepflügt wird – nicht aber in den Baumlinien (Reeg et al. 2009).

Zielsetzung

In dieser Arbeit sollte die Wurzelzone eines Schweizer Alley-Cropping-Agroforstsystems auf drei Haupthypothesen hin untersucht werden. Die erste Hypothese betrifft die Wurzelverteilung der beiden Komponenten des Agroforstsystems, Kernobstbäume und eine Kunstwiese, wobei die Arbeitshypothese **H₁** lautet: **Kernobstbäume und Kulturgräser wurzeln in unterschiedlichen Bodenschichten**. Ist dies der Fall kann ein wesentlicher potentieller Konkurrenzfaktor im untersuchten Agroforstsystem ausgeschlossen werden und die Kombination dieser zwei typischen

landwirtschaftlichen Elemente kann hinsichtlich unterirdischer Konkurrenzfaktoren empfohlen werden.

Des Weiteren sollte auch ein spezieller Blick auf die Ausprägung der Baumwurzeln innerhalb der Baumlinie geworfen werden. Dazu wurde die folgende Arbeitshypothese aufgestellt. **H₂: Die Bodenbearbeitung im Ackerland in Agroforstsystemen führt zu einem unterschiedlichen Wurzelwachstum von Kernobstbäumen innerhalb der Baumlinie und in Richtung des Ackerlands.**

Außerdem konnte untersucht werden, ob sich das Wurzelverteilungsmuster der Kulturgräser der Kunstwiese von dem der krautigen wildwachsenden Pflanzen in der Baumlinie unterscheidet. Gegebenenfalls kann dies Unterschiede im Wurzelverteilungsmuster der Bäume in den unterschiedlichen Bereichen erklären. Die Arbeitshypothese **H₃** lautet somit: **Das Wurzelverteilungsmuster der angesäten Kulturgräser in der Kunstwiese unterscheidet sich von dem der natürlich vorkommenden krautigen Vegetation in der Baumlinie.**

2. Material und Methoden

In dieser Studie wurde die Wurzelzone eines Schweizer Alley-Cropping-Agroforstsystems untersucht, indem Bodenkerne in verschiedenen Tiefen und Bereichen des Systems entnommen wurden. Die Proben wurden ausgewaschen, die Feinwurzeln der Bäume und Gräser separiert, die jeweiligen Wurzellängendichten bestimmt und auf die Verteilung in unterschiedlichen Tiefen und Entfernungen zur Baumlinie hin untersucht. Die Ergebnisse dieser Arbeit wurden dem EU-Projekt AGFORWARD zugeführt, wobei auch Parameter erhoben wurden, die hier keine direkte Verwendung finden, wie beispielsweise das Trockengewicht der Wurzeln.

2.1 Untersuchungsgebiet und Testorganismen

Die Studie wurde in einem Agroforstsystem in der Zentralschweiz (47°06' N - 8°02' E; Höhe: 584 m. ü. M) durchgeführt. Das untersuchte Agroforstsystem integriert Nuss-, Apfel-, Kirsch-, Zwetschgen-, Mirabellen und Birnbäume mit Mais- bzw. Kunstwiesenkultur in einem Alley-Cropping System: Zwischen den Baumreihen liegen Streifen mit einer Breite von 15 m, die ackerbaulich genutzt werden, wobei es sich um eine zweigliedrige Fruchtfolge (Mais / Kunstwiese) handelt, die in zweijähriger Rotation angebaut wird. Die Ackerfläche reicht dabei bis auf 70 cm an die Baumstämme heran. In diesem Bereich wird einmal jährlich vor der Aussaat 20 cm tief gepflügt. Die einzelnen Bäume in der Baumlinie sind in Abständen von 12 m gesetzt (vgl. Abb. 1).



Abbildung 1: Alley-Cropping System des Naturhofs Amrein zum Besichtigungszeitpunkt im Februar 2016. Zwischen den Baumreihen liegen 15 m, die agrarwirtschaftlich genutzt werden. Die Bäume in der Baumlinie sind in Abständen von 12 m gepflanzt © Sina Siedler.

Im Fokus dieser Studie stand die Feinwurzelverteilung der Holzapfel- und Wildbirnbäume sowie der angesäten Krautschicht in der Kunstwiese und den natürlich vorkommenden krautigen Pflanzen in der Baumlinie untersucht.

Die Holzapfel- und Wildbirnbäume (*Malus sylvestris* und *Pyrus pyraster*) wurden 2008 in einem Alter von drei bis vier Jahren und einer Größe von etwa 120 cm in das Agroforstsystem gepflanzt. Sie stammen aus der Emme-Forstbaumschulen AG, Wiler bei Utzenstorf, Schweiz. Durchschnittliche

Baummaße der untersuchten Birn- und Apfelbäume beliefen sich zum Untersuchungszeitpunkt auf einen BHD (Brusthöhendurchmesser) von 13,2 cm, eine Kronenbreite von 1,22 m und eine Baumhöhe von 2,84 m. Die Kunstwiese bestand aus *Lolium multiflorum*, *Trifolium alexandrinum* und *Trifolium resupinatum*, einer OH-106 Herbst-Zwischenfutter-Mischung (Weibel & Co. AG, Alberswil, Schweiz), die am 24.09.2015 ausgesät wurde und im weiteren Textverlauf die Bezeichnung „Kulturgräser in der Kunstwiese“ trägt. Die Kunstwiese wird etwa alle vier Wochen gemäht, sodass insgesamt sechs Mahden pro Saatperiode zustande kommen. Die Krautschicht in der Baumlinie war dominiert von *Dactylis glomerata*; daneben kamen auch *Poa annua*, *Taraxacum officinale* agg., *Bellis perennis* und *Ranunculus repens* in höherer Abundanz vor. Diese Pflanzengruppe wird aus stilistischen Gründen im weiteren Verlauf der Arbeit, wenn auch botanisch nicht ganz korrekt, als „natürliche Gräser in der Baumlinie“ bezeichnet.

Eine vom Landwirt im Jahr 2014 durchgeführte Bodenanalyse wies die Bodenart als sandigen Lehm aus, der mit einem pH-Wert von 6,5 schwach sauer und mit einem Humusanteil von 2,4 % schwach humos war.

Das Klima ist gemässigt. Klimadaten zeigen warme Sommermonate, eine kühle Winterzeit und viele feuchte Monate. Die Klimanormwerte der Jahre 1981 – 2010 belaufen sich an der 21,09 km südöstlich gelegenen Messstation Luzern auf eine Jahresdurchschnittstemperatur von 9,6 °C und einen Jahresniederschlag von 1173 mm (MeteoSchweiz 2016).

2.2 Erlernen der Wurzelmorphologie

In Vorarbeit galt es die Feinwurzeln der im Agroforstsystem vorkommenden Pflanzenarten eindeutig identifizieren zu können, um später die Wurzeln der krautigen und holzigen Elemente in den Bodenproben voneinander unterscheiden zu können. Dazu wurden Bodenproben von Reinflächen entnommen, Reinkulturen angezchtet, Baumwurzeln vom Stamm ab freigelegt bis Feinwurzeln zum Vorschein kamen und Literaturrecherche betrieben.

Trifolium alexandrinum und *Trifolium resupinatum*

Trifolium alexandrinum (Ägyptischer Klee) wurde mit Samen der Sorte Tigri, *Trifolium resupinatum* mit Samen der Sorte Gorby in einem eigenen Versuch in Reinkultur kultiviert (vgl. Abb. 2). Nach fünf Wochen wurden die Wurzeln ausgewaschen, fotografiert und morphologisch analysiert. Abbildung 3 zeigt, dass die Wurzeln beider Kleearten weisslich, rund und einfach verzweigt waren.

Zudem zeigte die Literatur, dass Kleewurzeln in Tiefen von bis zu 50 cm zu erwarten sind (Pearson und Jacobs 1985) und die Wurzeln von *Trifolium alexandrinum* einen mittleren Durchmesser von 0,35 mm mit Höchstwerten von bis zu 0,39 mm aufweisen (Yu et al. 2016).



Abbildung 2: Anzucht von *Trifolium alexandrinum* und *Trifolium resupinatum*. Die Abbildung zeigt die Kleearten nach einer Kultivierungszeit von fünf Wochen © Sina Siedler.



Abbildung 3: Wurzelmorphologie der Kleearten. Links: *Trifolium alexandrinum* nach einer Kultivierungszeit von fünf Wochen. Rechts: *Trifolium resupinatum* nach einer Kultivierungszeit von 5 Wochen © Sina Siedler.

Lolium multiflorum

Eine Reinfläche des Italienischem Raygrases konnte direkt am Agroscope-Standort Reckenholz beprobt werden. Hier wurden mit einem Handbohrer Bodenproben in bis zu 85 cm Tiefe genommen, das Wurzelmaterial ausgewaschen und anschliessend fotografiert und untersucht (vgl. Abb. 4). Es zeigte sich, dass *Lolium multiflorum* Wurzeln mit einem weiss-beigen bis orangen Farbton aufweist. Ausserdem bildete das Italienische Raygras ein eher rundliches, ein- bis mehrfach verzweigtes Wurzelbild aus.

Die Literaturrecherche ergab zudem, dass Wurzeln des Italienischen Raygrases in bis zu 1 m Tiefe vorkommen können (Crush et al. 2005) und



Abbildung 4: Wurzelmorphologie von *Lolium multiflorum* © Sina Siedler.

Lolium-Arten Wurzeln mit einem mittleren Durchmesser von 0,16 mm hervorbringen. Der geringere mittlere Durchmesser im Vergleich zu *Trifolium* ist darauf zurückzuführen, dass *Lolium* feiner verzweigt ist, höhere Wurzelhaarlängen und insgesamt auch mehr Wurzeln mit Wurzelhaaren ausbildet (Evans 1977).

Dactylis glomerata

Die gute Datenlage über das Wurzelwerk von *Dactylis glomerata* in der Literatur, erübrigte eine Kultivierung dieses Indikators für die krautige Schicht der Baumlinie. Es konnten Herbarbelege mit Wurzeln gefunden werden sowie Studien über die Wurzelverteilung: *Dactylis glomerata* wurzelt in bis zu 1 Meter Tiefe und bildet dabei ein dichtes, verzweigtes Wurzelwerk aus (Molyneux und Davies 1983, Voltaire und Thomas 1995, Körner 2013). Ein eigener sowie zusätzliche Herbarbelege aus Datenbanken (vgl. Abb. 5) zeigten, dass der Triebgrund von zahlreichen braunen Blattscheidenresten umgeben ist, während die Wurzeln selbst rundlich und hell weisslich sind.



Abbildung 5: Herbarbeleg für *Dactylis glomerata* © soilcropandmore.info

Malus sylvestris und *Pyrus pyraeaster*

Die Wurzeln von 30- bis 120-jährigen Apfel- und Birnbäumen wurden auf einer obstbaulich genutzten Fläche der Gebrüder Dasen in Täuffelen, Ortsteil Gerolfingen im Kanton Bern beprobt. Dabei wurden die Wurzeln der Kernobstbäume vom Stamm ab mit Pickel, Schaufel und in Handarbeit freigelegt, bis neben den Grobwurzeln auch Feinwurzeln zum Vorschein kamen. Diese wurden entnommen, um auch hier eine fotografische Dokumentation der Eigenschaften zu erstellen: Das Wurzelbild ist geprägt durch eine dunkle Färbung, die von hellbraun über orange bis zu einem rötlichen oder schwärzlichen Braun reicht (vgl. Abb. 6).

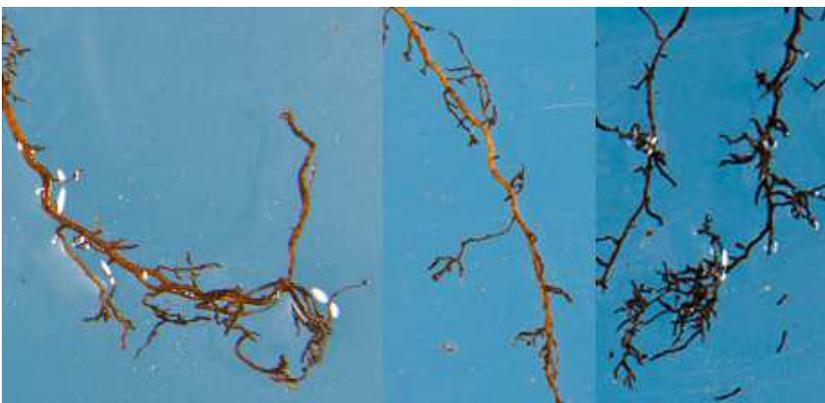


Abbildung 6: Wurzelmorphologie der Apfel- und Birnbäume © Sina Siedler.



Wie auch Moreno et al. (2005) berichten, zeigte sich, dass die wachsenden Wurzelspitzen von Baumwurzeln weisslich sein können, jedoch dicker ausfallen als bei Gräsern (vgl. Abb. 7). Ausserdem bildeten Apfel- und Birnbäume knorrige, mehrfache Verzweigungen aus.

Einige Studien wiesen die Wurzeln der Kernobstbäume in über einem Meter Tiefe nach (Yocum 1937, Atkinson 1980, Fernandez et al. 1995). Eine allgemeingültige präzise Angabe über die maximale Wurzeltiefe und den Wurzelradius einer Baumart ist insgesamt schwer möglich, da sie maßgeblich von der Bodengüte und der Vitalität des Baumes abhängt (Bosshard 2013).

Abbildung 7: Weisse Wurzelspitzen bei einem Birnbaum © Sina Siedler.

Vergleich der holzigen und krautigen Wurzelmorphologie

Während die Wurzeln der im untersuchten Agroforstsystem vorkommenden Gräser eine helle Färbung und einen rundlichen Charakter aufwiesen, bildeten die Baumwurzeln ein dunkleres,



knorrigeres Wurzelbild aus, sodass sie insgesamt gut unterscheidbar waren. Eine Unterscheidung der Wurzeln der krautigen Arten, war aufgrund der Ähnlichkeit nicht möglich. Dies war für die Untersuchung der Forschungsfragen allerdings auch nicht notwendig. Abb. 8 zeigt exemplarisch

Abbildung 8: Eine Wurzelprobe nach der Sortierung in Gras- (links) und Baumwurzeln (rechts) © Sina Siedler.

Wurzelproben nach der Sortierung in Baum- und Graswurzeln.

2.3 Probennahme

Zwischen dem 04.05.16 und 17.05.16 wurden 258 zylindrische Bodenkerne (vgl. Abb. 9) mit einem Durchmesser von 5 cm und einer Länge von 20 cm aus dem zu untersuchenden Agroforstsystem entnommen.

Um räumliche Unterschiede der Wurzeldichten von Bäumen und Gräsern zu berücksichtigen, wurden die Bodenproben in bis zu 1 m Tiefe und in verschiedenen Abständen zu den Baumstämmen extrahiert. Probestellen waren unter der Krone (X/2), am Kronenrand (X) sowie ausserhalb der Krone (2X und 3X), wobei X für den Kronenradius steht. Insgesamt wurden auf diese Art und Weise drei Holzapfelbäume (*Malus sylvestris*) und ein Wildbirnenbaum (*Pyrus pyraster*) beprobt, inklusive der jeweiligen krautigen Vegetation. Die beschriebene Probennahme wurde in drei Orientierungen

durchgeführt: beidseitig jedes Baums in Richtung der Kulturwiese sowie einfach in Richtung der Baumlinie, sodass schliesslich für jedes Replikat drei Proben pro Entfernung und Tiefe vorlagen (vgl. Abb. 10). In einigen Fällen war es trotz mehrfacher Versuche nicht möglich Bodenproben bis zur maximalen Tiefe zu nehmen, da grosse Steine im Untergrund (in einem Fall eine Kiesbank) die Bohrung behinderten.



Abbildung 9: Eine Auswahl der entnommenen Bodenkerne aus dem Agroforstsystem. Die Bodenkerne wiesen einen Durchmesser von 5 cm und eine Länge von 20 cm auf © Sina Siedler.

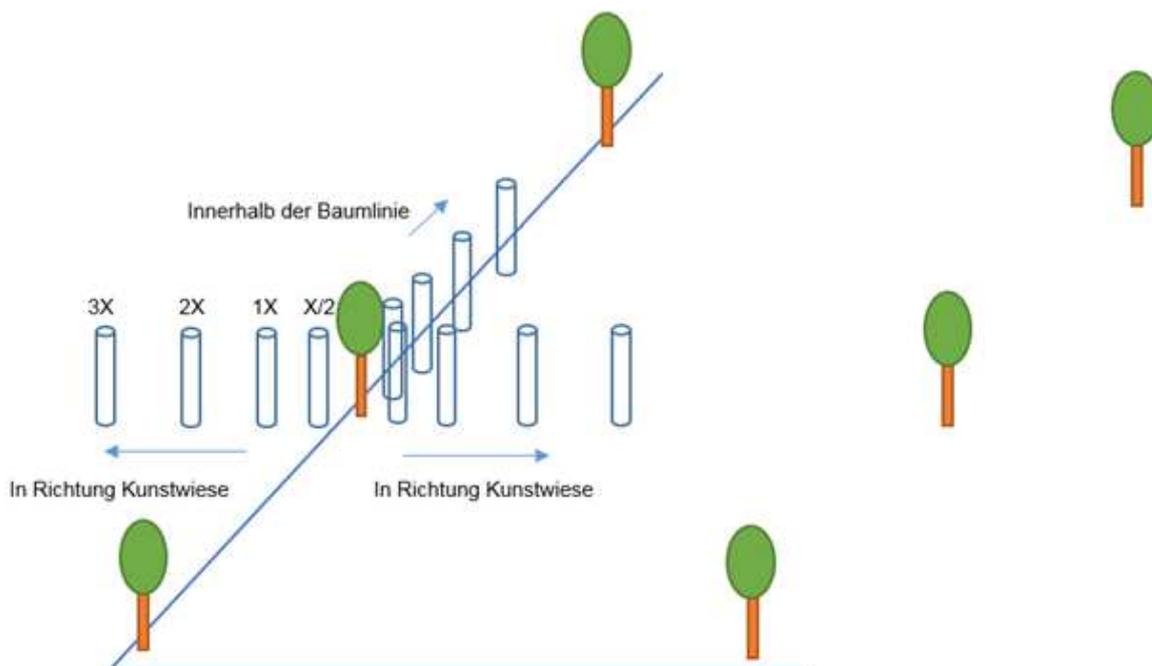


Abbildung 10: Schemaskizze des Untersuchungsdesigns: Positionen der Probennahmestellen im Agroforstsystem. Die Bodenkerne wurden an den Stellen X/2, 1X, 2X und 3X entnommen, wobei X dem Kronenradius des beprobten Baums entspricht. Die Entnahme wurde für drei Orientierungen durchgeführt: beidseitig jedes Baums in Richtung der Kunstwiese sowie einseitig innerhalb der Baumlinie.

Zur Entnahme der Bodenkerne wurde ein Humax-Bohrer (Martin Burch AG, Humax Bohrsonden, Rothenburg, Schweiz) mit rotierender Bohrsonde eingesetzt, angetrieben durch einen 2-Takt Benzinmotor (Stihl BT360). Die Bodenkerne wurden durch eingesetzte PVC-Hülsen (Martin Burch AG, Humax Bohrsonden, Rothenburg, Schweiz) im Bohrrohr bei der Probennahme automatisch in die Hülsen gefüllt. Die Hülsen wurden mit einem eindeutigen Identifizierungscode versehen, verschlossen und anschliessend bei 4 °C im Kühlraum gelagert, um die Wurzeln bis zur Analyse frisch zu halten.

2.4 Gravimetrischer Wassergehalt und Lagerungsdichte

Im Anschluss an die Probennahme wurden der komplette Probenreihe einer Orientierung in Richtung Kulturwiese sowie einer Orientierung in Richtung der Baumlinie zylindrische Teilproben (Durchmesser: 15,2 mm) mit einem Korkbohrer entnommen, um den gravimetrischen Wassergehalt nach Blume et al. (2009) und die Lagerungsdichte nach Cresswell und Hamilton (2002) zu bestimmen. Dazu wurde zunächst das Leergewicht des jeweiligen Glasbehälters (Rollrandglas, Gerber Instruments, Zürich, Schweiz) auf ein Hundertstel genau gewogen und das Nassgewicht der Bodenprobe mit derselben Genauigkeit gemessen (Laborwaage PM 30, Mettler Toledo, Greifensee, Schweiz). Anschliessend wurden die Proben bei 60 °C mindestens 55 h getrocknet (Trockenschrank SalvisLab, 0 – 240°C, Renggli AG, Rotkreuz, Schweiz), in Exsikkatoren (Vacuum-Exsikkator DURAN Mobilex, Gerber Instruments, Zürich, Schweiz) mit Silikagel (SiO₂-Granulat (2,5-4mm), Merck AG, Darmstadt, Deutschland) auf Zimmertemperatur abgekühlt und schliesslich erneut gewogen, um das Trockengewicht zu bestimmen. Eine weitere Stunde im Trockenschrank mit anschliessender Abkühlphase in den Exsikkatoren und erneutem Wiegen verifizierte, dass die Proben vollständig getrocknet waren, da Gewichtskonstanz erreicht worden war.

Die Berechnung des gravimetrischen Wassergehalts erfolgte nach Blume et al. (2009) nach der folgenden Formel:

$$\theta_{grav} = \frac{m_w - m_d}{m_w}$$

| | | |
|-----------------|------------------------------|-------|
| θ_{grav} | Gravimetrischer Wassergehalt | kg/kg |
| m_w | Masse der feuchten Proben | kg |
| m_d | Masse der getrockneten Probe | kg |

Die Berechnung der Lagerungsdichte erfolgte Cresswell und Hamilton (2002) nach der folgenden Formel:

$$\rho_B = \frac{m_f}{V_g}$$

| | | |
|----------|-----------------------------------|-------------------|
| ρ_B | Lagerungsdichte resp. Raumgewicht | g/cm ³ |
| m_f | Masse der Festsubstanz | g |
| V_g | Volumen der Gesamtprobe | cm ³ |

2.5 Wurzel-Analyse

Ziel der Wurzel-Analyse war es, die Feinwurzelmenge über die Parameter Wurzellängendichte (WLD, Wurzellänge pro Volumeneinheit Boden) und Trockengewicht, getrennt nach Baum- und Graswurzeln, in den verschiedenen Tiefen und Entfernungen zum Baumstamm zu bestimmen. Dazu wurde die 'soil core-break'-Methode (Baldwin et al. 1971, Drew und Saker 1980) angewandt.

Diese Methode erlaubt es, nach Kalibrierung, von der Anzahl der Wurzeln (N_{Wurzeln}) an beiden Bruchflächen eines horizontal gebrochenen Bodenkerns auf die Wurzellängendichte der Probe zu schließen. Dies bringt eine enorme Zeitersparnis mit sich und stellt eine gängige Methode in Wurzeluntersuchungen dar (van Noordwijk et al. 2001).

Es wurden nur Feinwurzeln berücksichtigt, da diese die relevanten Parameter für die Nährstoff- und Wasseraufnahme darstellen (Smit et al. 2013). Die Grenze für Feinwurzeln wurde nach Smit et al. (2013) auf 2 mm festgelegt.

2.5.1 Erstellen der Kalibrierungskurve

Zur Erstellung der Kalibrierungskurve wurden 82 Proben semi-randomisiert ausgewählt. Es erfolgte zunächst eine rein zufällige Auswahl von 50 Proben, die jedoch erweitert wurde, bis jeder Baum, jede Tiefe, jede Distanz und jede Orientierung mit mindestens 3 Proben in der Kalibrierung vertreten war. Dies sollte eine Unterrepräsentation einzelner Faktoren vermeiden. Des Weiteren wurde darauf geachtet, dass die gesamte Spannweite der gezählten Wurzeln in der Kalibrierung enthalten war. Die Erhöhung der Stichprobenzahl führte zu einer zuverlässigeren Vorhersage der Wurzelmasse aus den gezählten Wurzeln beim Kernbruch (N_{Wurzeln}), was sich in einem besseren Korrelationskoeffizienten r und Bestimmtheitsmaß R^2 der

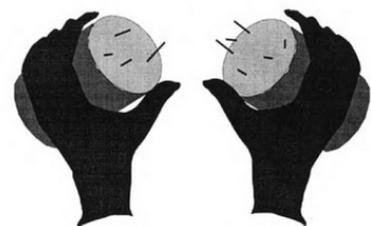


Abbildung 11: Core-break Methode zur Schätzung der Wurzellängendichte, anhand von Wurzeln, die an den horizontalen Bruchstellen eines Bodenkerns sichtbar sind (Smit et al. 2013).

Kalibrierungskurve zeigte.

Die für die Kalibrierung ausgewählten Bodenkerne wurden in 10 cm lange Proben geteilt. Jede dieser Proben wurde von Hand in zwei Hälften gebrochen, woraufhin die herausragenden Gras- bzw. Baumwurzeln an der Bruchstelle auf beiden Seiten gezählt wurden (vgl. Abb. 11). Abbildung 12 zeigt beispielhaft eine herausragende Holzapfelbaumwurzel an der Bruchstelle. Es galt die Wurzeln auf beiden Seiten zu zählen und zu addieren, da bei einem Kernbruch davon auszugehen ist, dass Wurzeln in einiger Entfernung zur Bruchstelle brechen und eine Wurzel somit immer nur auf einem Bruchhorizont präsentiert ist. Wurzelverzweigungen wurden ignoriert, da sich die Zählung auf die Betrachtungsebene und nicht auf ein Volumen bezog (van Noordwijk et al. 2001).

Nach dem Zählen der herausragenden Wurzeln wurde die gebrochene Probe mithilfe einer druckluftgetriebenen Wurzelwaschmaschine ausgewaschen. Dazu konnte eine Probe in das in Abbildung 13 sichtbare Rohr gefüllt werden und nach einigen Minuten die reine Wurzelmasse aus einem 530 µm Sieb entnommen werden. Anschliessend wurden die Gras- und Baumwurzeln voneinander unterschieden und dementsprechend sortiert. Die Gras- und Baumwurzeln wurden von nun an getrennt behandelt. Es folgte die Erstellung eines Scans der einzelnen Wurzelmassen. Dazu wurde ein spezieller Scanner (Epson Expression 11000XL



Abbildung 12: Eine herausragende Wurzel eines Holzapfelbaums an der Kernbruchstelle © Sina Siedler.



Abbildung 13: Die Wurzelwaschmaschine © Sina Siedler.

3.49, Seiko Epson Corporation, Suwa, Nagano, Japan) benutzt, der ein Abbild der Wurzeln erzeugt, indem die Wurzelmasse in einen mit Wasser befüllten Behälter (Regent's water-proof trays, Regent Instruments., Quebec, Kanada) gelegt wurde, der im Scanner montiert werden konnte.

Die anschließende Analyse der Scans mit der WinRhizo Pro Software (WinRhizoPro 2013d 32-Bit, Regent Instruments, Quebec, Kanada) lieferte die Wurzellängendichte in der Einheit Länge pro Volumen [cm/m^3], wobei sich das Bodenvolumen jeder Probe auf $0,000196 \text{ m}^3$ belief.

Bei der Analyse war darauf zu achten, dass die Ränder des Behälters, Kratzer im Behälter oder beim Befüllen entstandene Luftblasen, nicht fälschlicherweise von der Software als Wurzeln behandelt wurden. Um dies zu vermeiden wurden die Scans von solch unerwünschten Artefakten vor der Analyse mithilfe der Grafiksoftware Microsoft Paint (Windows 10) bereinigt. Zusätzlich musste sichergestellt werden, dass hingegen jede Wurzel als solche vom Programm erkannt wurde. Dies war mitunter bei sehr feinen Wurzeln, die nur eine helle Grauschattierung in den Abbildern aufwiesen, nicht der Fall. Dem konnte jedoch entgegengewirkt werden, indem nicht erkannte Wurzelteile nach der Analyse von Hand nacherfasst wurden (vgl. Abb. 14).

Nach der Bestimmung der Wurzellängendichte wurde das Trockengewicht jeder ausgewaschenen

Probe bestimmt: Dazu wurden die sortierten Wurzelmengen in Petrischalen (Greiner Bio-One, HuberLab AG, Aesch, Schweiz) in einem Trockenschrank (SalvisLab, 0 – 240°C, Renggli AG, Rotkreuz, Schweiz), 48 h bei 65°C getrocknet, in Exsikkatoren (Vacuum-Exsikkator DURAN Mobilex,

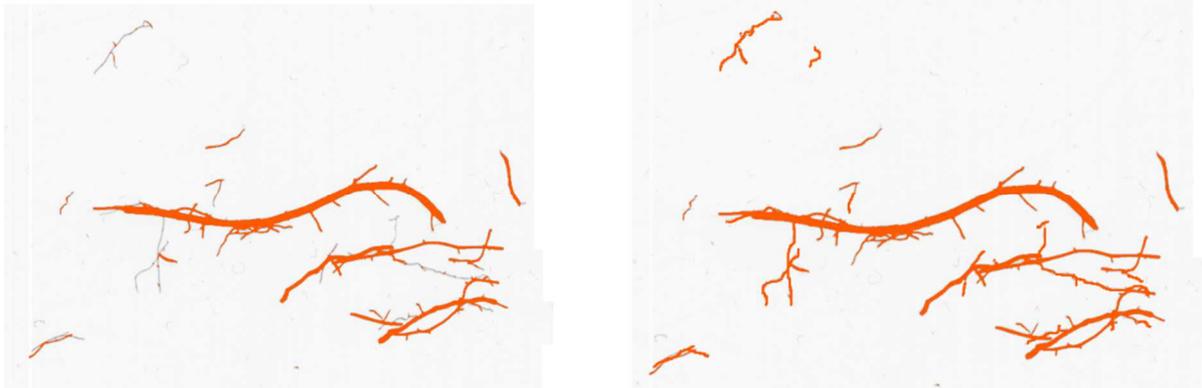


Abbildung 14: Ausschnitt aus einem Wurzel-Scan. Das rot markierte Skelett stellt den analysierten Bereich dar. Links: Vor der Nachbearbeitung. Es sind Wurzelabschnitte vorhanden, die von der Analyse-Software nicht erkannt wurden und grau erscheinen. Rechts: Nach der Nachbearbeitung. Alle Wurzelteile wurden analysiert und zur Wurzellängendichte addiert.

Gerber Instruments, Zürich, Schweiz) mit Silikagel (SiO_2 -Granulat (2,5-4mm), Merck AG, Darmstadt, Deutschland) auf Raumtemperatur heruntergekühlt und nach Übertragung in eine genullte Petrischale auf einer Analyse-Waage (AT460 DeltaRange, Mettler-Toledo AG, Greifensee, Schweiz) auf ein Zehntausendstel genau gewogen. Eine zusätzliche Periode von 1 h im Trockenschrank mit anschließender Abkühlphase in Exsikkatoren und erneutem Wiegen verifizierte die vollständige Trocknung.

Somit wurde für jede der 82 Proben die gezählten Wurzeln [m^{-2}] an der Kernbruchstelle, die Wurzellängendichte [km m^{-3}] und das Trockengewicht [g] bestimmt. Daraus konnten mit einfachen linearen Regressionen Kalibrierungskurven für die Gras- und Baumwurzeln erstellt werden. Anhand dieser Kalibrationen, konnte über die Anzahl der herausragenden Wurzeln an der Bruchstelle jeder weiteren Probe die Wurzellängendichte und das Trockengewicht der gesamten Probe geschätzt werden.

Da die Wurzellängendichte als besserer Indikator für die Funktionen eines Wurzelsystems hinsichtlich der Wasser- und Nährstoffaufnahme gilt, als das Trockengewicht oder die Anzahl der Wurzeln (Jones et al. 1998, Moreno et al. 2005), wurden die nachfolgenden Analysen und Grafiken im Wesentlichen auf den Daten der Wurzellängendichten aufgebaut.

2.5.2 Vertikale Verteilung der Wurzellängendichten nach dem Gale & Grigal-Modell

Da die Datenlage der vertikalen Wurzelverteilung dieser Studie auf 1 m begrenzt ist, wurden mithilfe von Literaturwerten nach dem Gale & Grigal-Modell (1987) die Tiefen bestimmt, in denen 50 % bzw. 95 % (d_{50} bzw. d_{95}) der kumulativen Wurzeldichten zu erwarten waren. Es war erforderlich

Literaturwerte zu benutzen, da auch im tiefsten untersuchten Bodenhorizont noch Baum- und Graswurzeln gefunden wurden und somit nicht sichergestellt werden konnte, dass die gesamte Wurzelmasse erfasst worden war.

Das Gale & Grigal-Modell beschreibt die vertikale kumulative Wurzelverteilung mit der folgenden Exponentialfunktion:

$$Y = 1 - \beta^d$$

Bei Y handelt es sich um den kumulativen Wurzelanteil in einer bestimmten Tiefe d . β ist der angepasste Extinktionskoeffizient, der im weiteren Verlauf Tiefenkoeffizient genannt wird. Mit zunehmender Bodentiefe nähert sich der kumulative Wurzelanteil Y asymptotisch 100 % an. Verschiedene Studien liefern empirisch erfasste Werte für den Tiefenkoeffizient β spezifischer Arten, klassifizierter Pflanzengruppen oder Biomen (Gale und Grigal 1987, Jackson et al. 1996). Hohe β -Werte sagen aus, dass der Wurzelanteil in tieferen Bodenschichten höher ist, während kleinere Werte für β auf einen höheren Anteil von Wurzeln in bodennahen Horizonten schließen lassen oder anders ausgedrückt: Umso mehr sich β dem Wert 1 annähert, umso weniger tendieren die Wurzeln dazu oberflächennah konzentriert zu sein (Mao et al. 2015). Für die hier untersuchten Baumwurzeln konnte ein β -Wert von 0,970 angenommen werden, für die Graswurzeln ein β -Wert von 0,943 (Jackson et al. 1996). Die jeweiligen d_{50} - und d_{95} -Werte konnten daraufhin nach den folgenden Formeln berechnet werden:

$$d_{50} = \frac{\ln(0,5)}{\ln(\beta)}$$

$$d_{95} = \frac{\ln(0,05)}{\ln(\beta)}$$

Anschließend konnten die Wurzellängendichten für jede Pflanzengruppe und Distanz bestimmt werden, an der 50 % bzw. 95 % der Wurzelmasse zu erwarten war. Dies lieferte eine weitere Vergleichsmöglichkeit der Wurzelverteilung der verschiedenen Elemente des Agroforstsystems.

2.6 Datenanalyse

Die statistische Auswertung erfolgte mit JMP®12.2.0 (SAS Institute Inc., Cary, USA) und R®0.99.903 (RStudio: Integrated Development for R. RStudio, Inc., Boston), wobei R im Wesentlichen für die Überprüfung der Normalverteilung und Varianzhomogenität der Daten benutzt wurde.

Lineare Regressionen konnte angewendet werden, um die Kalibrierung der 'soil core-break'-

Methode durchzuführen. Dazu wurden die ermittelten WLD-Werte der 82 bearbeiteten Proben in Beziehung zu den gezählten Wurzeln (N_{Wurzeln}) gesetzt, wie von Smit et al. beschrieben (2013).

Die Normalverteilung der Daten wurde mit Q-Q-Diagrammen und Histogrammen der Residuen überprüft, sowie zusätzlich durch den Shapiro-Wilks-Test abgesichert. Die Varianzhomogenität wurde mit dem Fligner-Killeen-Test getestet. Eine Transformation der Daten war in allen Fällen für die Wurzellängendichten notwendig; durch die Transformation in die 3. Wurzel lagen jedoch stets parametrische Daten vor. Da die Datensätze Nullwerte enthielten, wurde eine Konstante vor der Wurzeltransformation hinzugezählt, wobei nach Sokal und Rohlf (1995) der Wert 0,5 gewählt wurde. Bei der Lagerungsdichte war keine Transformation notwendig, sodass die Analyse mit den ursprünglichen Datensätzen durchgeführt werden konnte. Auch die Wassergehalte der Bodenproben, die in der Kunstwiese genommen wurden, waren in Ursprungsform normalverteilt und varianzhomogen; die Wassergehalte der Bodenproben, die innerhalb der Baumlinie genommen wurden, konnten hingegen durch keine Transformation, die nicht die Ränge verändert hätte, in eine parametrische Form gebracht werden. Dies erforderte die Verwendung eines nicht-parametrischen Tests, um die Wassergehalte zu analysieren.

Die Verteilungsmuster der erhobenen Wurzel- und Bodendaten wurden mit Kovarianzanalysen (ANCOVAs), Varianzanalysen (ANOVAs, zweiseitige t-Tests), Regressionen sowie dem Wilcoxon-Test ausgewertet.

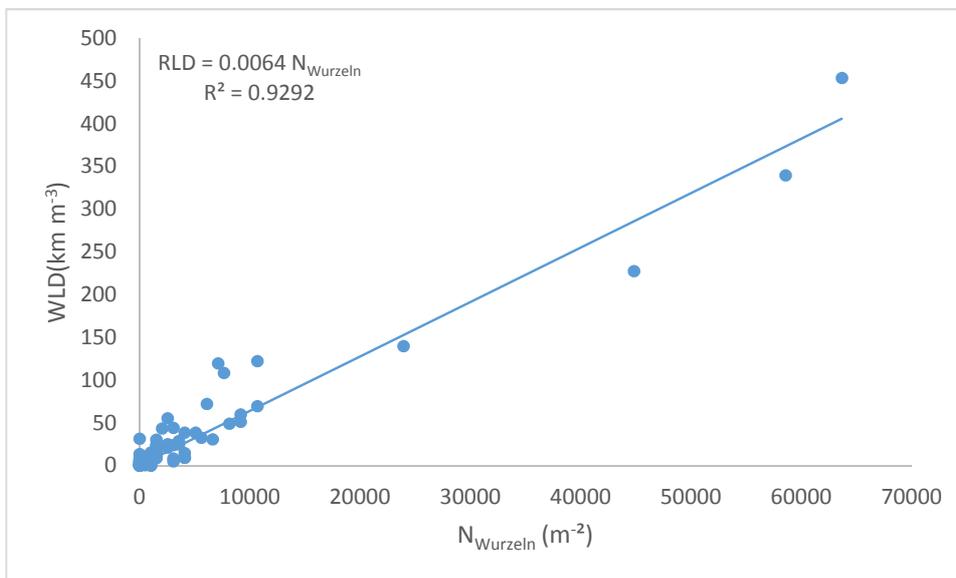
ANCOVAs wurden benutzt, um den Einfluss der unabhängigen Variablen (*Tiefe* und *Entfernung*) auf die abhängige Variable *Wurzellängendichte* sowie auf die abhängige Zielvariable *Lagerungsdichte* zu untersuchen. Eine One-Way ANOVA wurde eingesetzt, um Unterschiede zwischen den WLD-Werten an der Stelle d_{50} der unterschiedlichen Bestandteile des Agroforstsystems zu detektieren. T-Tests wurden angewendet um Unterschiede, hinsichtlich der Wurzellängendichten, zwischen der Wuchsrichtung der Bäume sowie zwischen der natürlichen Grasgruppe und den Kulturgräsern der Kunstwiese zu untersuchen. Außerdem wurde mithilfe von t-Tests untersucht, ob sich die Lagerungsdichten in der Kunstwiese und in der Baumlinie voneinander unterscheiden. Mithilfe von Regressionen wurde die Reaktion der Wurzellängendichten auf die zunehmende Entfernung zum Baumstamm untersucht. Wilcoxon-Tests wurden verwendet, um die Wassergehalte in den unterschiedlichen Bereichen (in der Baumlinie und in der Kunstwiese) zu vergleichen. Um detaillierte Ergebnisse zu erhalten, wurden einige der unabhängigen Variablen aufgesplittet analysiert, indem z.B. einzelne Tiefen oder einzelne Entfernungen zum Baumstamm separat betrachtet wurden.

Das Signifikanzniveau wurde auf $p \leq 0,05$: signifikant (*) festgelegt.

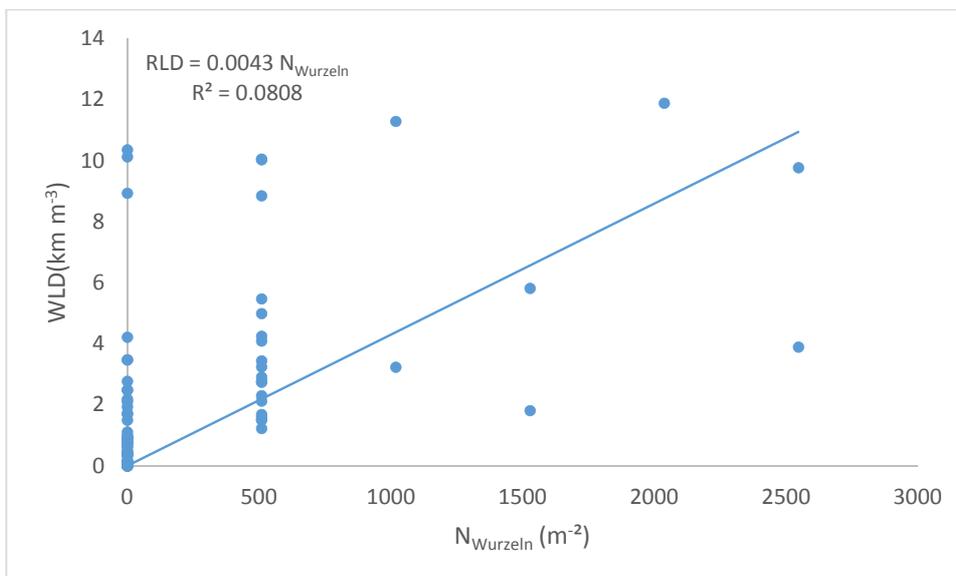
3 Ergebnisse

3.1 Bestimmung der Wurzellängendichten (WLD)

Die Kalibrierungskurven für das Verhältnis zwischen der Wurzelanzahl im Rahmen des Kernbruchs (N_{Wurzeln}) und den ermittelten WLD-Werten wurden für Gräser und Bäume separat erstellt und sind in Grafik 1 und 2 dargestellt. Für die Gräser lag eine bessere lineare Beziehung vor ($r = 0,92$, $R^2 = 0,9292$) als für die Bäume ($r = 0,52$, $R^2 = 0,0808$). Beide Regressionen waren jedoch hoch signifikant mit $p < 0,001$ ($n = 82$ für Bäume und Gräser). Die der Kalibration zugrundeliegenden Daten über die Spannweite der gezählten Wurzeln (N_{Wurzeln}) und die WLD-Werte der Gräser und Bäume ist in Tabelle 1 zu finden.



Grafik 1: Lineare Regression zwischen der Anzahl von Wurzeln an den horizontalen Ebenen beim Kernbruch (N_{Wurzeln}) und der Wurzellängendichte (WLD) bei Gräsern.



Grafik 2: Lineare Regression zwischen der Anzahl von Wurzeln an den horizontalen Ebenen beim Kernbruch (N_{Wurzeln}) und der Wurzellängendichte (WLD) bei Bäumen.

Tabelle 1: Vergleich der Spannweite der gezählten Wurzeln und der Wurzellängendichten (WLD) für Gräser und Bäume im Rahmen der Erstellung der Kalibrierungskurve.

| Vegetationstyp | Spannweite von N_{Wurzeln} | Spannweite der WLD |
|----------------|-------------------------------------|----------------------------|
| Gräser | 0 – 63.662 Wurzel m^{-2} | 0 – 454 km m^{-3} |
| Bäume | 0 – 2.547 Wurzel m^{-2} | 0 – 12 km m^{-3} |

3.2 Wurzelverteilungsmuster

Zur besseren Lesbarkeit sollen im weiteren Textverlauf Abkürzungen verwendet werden (vgl. Abb. 15): Wurzellängendichten der Baumwurzeln, die innerhalb der Baumlinie gewachsen sind werden mit WLD_{BaumB} bezeichnet; Wurzellängendichten der Baumwurzeln, die in Richtung der Kunstwiese gewachsen sind, tragen die Bezeichnung WLD_{BaumK} . Bei den Gräsern wurden die Bezeichnungen WLD_{GrasB} bzw. WLD_{GrasK} für die Wurzellängendichten der natürlichen Gräser in der Baumlinie bzw. für die Wurzellängendichten der Kulturgräser in der Kunstwiese vergeben.

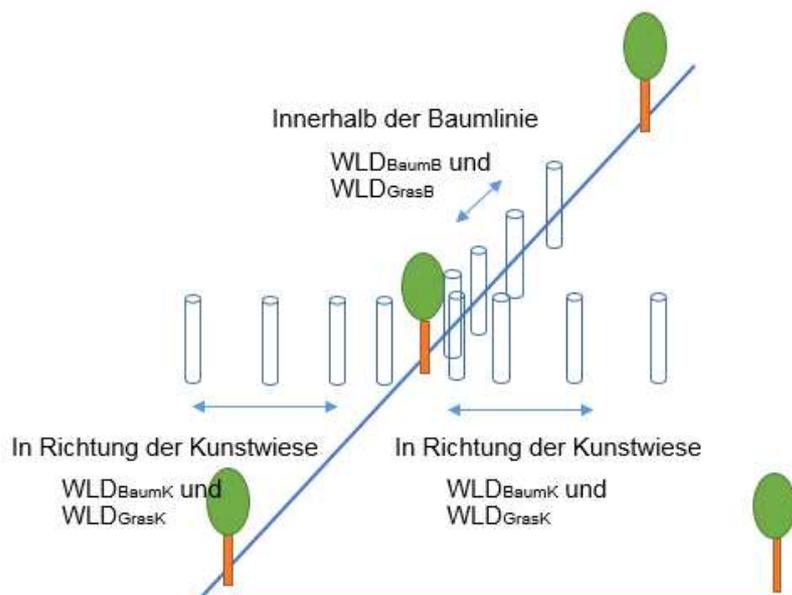


Abbildung 15: Erklärung der verwendeten Abkürzungen in grafischer Form.

3.2.1 Vergleichende Gesamtbetrachtung

Unter Berücksichtigung aller Tiefen und Entfernungen in einer gemeinsamen Betrachtung, konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den Wurzellängendichten der natürlichen Gräser und denen der Kulturgräser festgestellt werden (t-test, $t = 0,7558$, $dF = 390$, $p = 0,4502$). Die Wurzellängendichten der Baumwurzeln hingegen waren in der Baumlinie signifikant höher, als in der

Kulturwiese (t-test, $t = -4,0517$, $dF = 390$, $p < 0,0001$). In den folgenden Abschnitten werden einzelne Tiefen und Entfernungen getrennt betrachtet, um genauer hinter das Wurzelverteilungsmuster der Bäume und Gräser blicken zu können.

3.2.2 Vertikale Wurzelverteilung

Gräser zeigten sehr hohe Wurzellängendichten in den oberen Bodenschichten, die in exponentieller Form mit zunehmender Tiefe abnahmen. Dies gilt sowohl für die Gräser der Kulturwiese, als auch für die natürlichen Gräser, die in der Baumlinie vertreten waren (vgl. Grafik 3). Es ließen sich die folgenden Funktionen herleiten:

Funktion für die Tiefenverteilung der Kulturgräser in der Kunstwiese (WLD_{GrasK}):

$$WLD(km\ m^{-3}) = 193,75 * e^{-0,054 \times Tiefe(cm)} \quad (R^2 = 0,95, F = 166,7877, p < 0,0001)$$

Funktion für die Tiefenverteilung der natürlichen Gräser in der Baumlinie (WLD_{GrasB}):

$$WLD(km\ m^{-3}) = 385,37 * e^{-0,080 \times Tiefe(cm)} \quad (R^2 = 0,96, F = 177,2356, p < 0,0001)$$

Bei einer Bodentiefe zwischen 30 und 40 cm war die Wurzellängendichte beider Grasgruppen bereits um ein 10-faches geringer als in den ersten 10 cm. Unter 90 cm waren Graswurzeln nur noch vereinzelt anzutreffen. Die Abnahme der Wurzellängendichte mit zunehmender Tiefe war für beide Grasgruppen hoch signifikant (ANCOVA-Ergebnisse: $dF = 1$, F-Wert = 320,9093, $p < 0,0001$ für WLD_{GrasB} ; $dF = 1$, F-Wert = 415,9403, $p < 0,0001$ für WLD_{GrasK}), wobei Interaktionen zwischen der Tiefe und der Distanz ausgeschlossen werden konnten. Signifikante Unterschiede zwischen den beiden Grasgruppen konnten nur bei einer Tiefe von 60-70 cm ausgemacht werden. Hier wiesen die Kulturgräser in der Kunstwiese eine signifikant höhere Wurzellängendichte auf, als die natürlichen Gräser in der Baumlinie (t-test, $t = 2,1328$, $dF = 36$, $p = 0,0398$). Die gesamte Ergebnisreihe des unabhängigen, zweiseitigen t-Tests findet sich in Tabelle 2.

Grafik 3 und 4 zeigen die Wurzellängendichten der Bäume in Abhängigkeit von der Tiefe. In Grafik 3 sind die Ergebnisse für die gesamte Spannweite der WLDs gezeigt. Grafik 4 zeigt die Wurzelverteilung für die Wurzellängendichten von 0 – 25 $km\ m^{-3}$ in höherer Auflösung. Während sich in der Baumlinie eine exponentielle Abnahme zeigte, passte sich die Abnahme der WLD_{BaumK} , einer linearen Abnahmefunktion am besten an:

Funktion für die Baumwurzeln, die in Richtung der Kunstwiese gewachsen sind (WLD_{BaumK}):

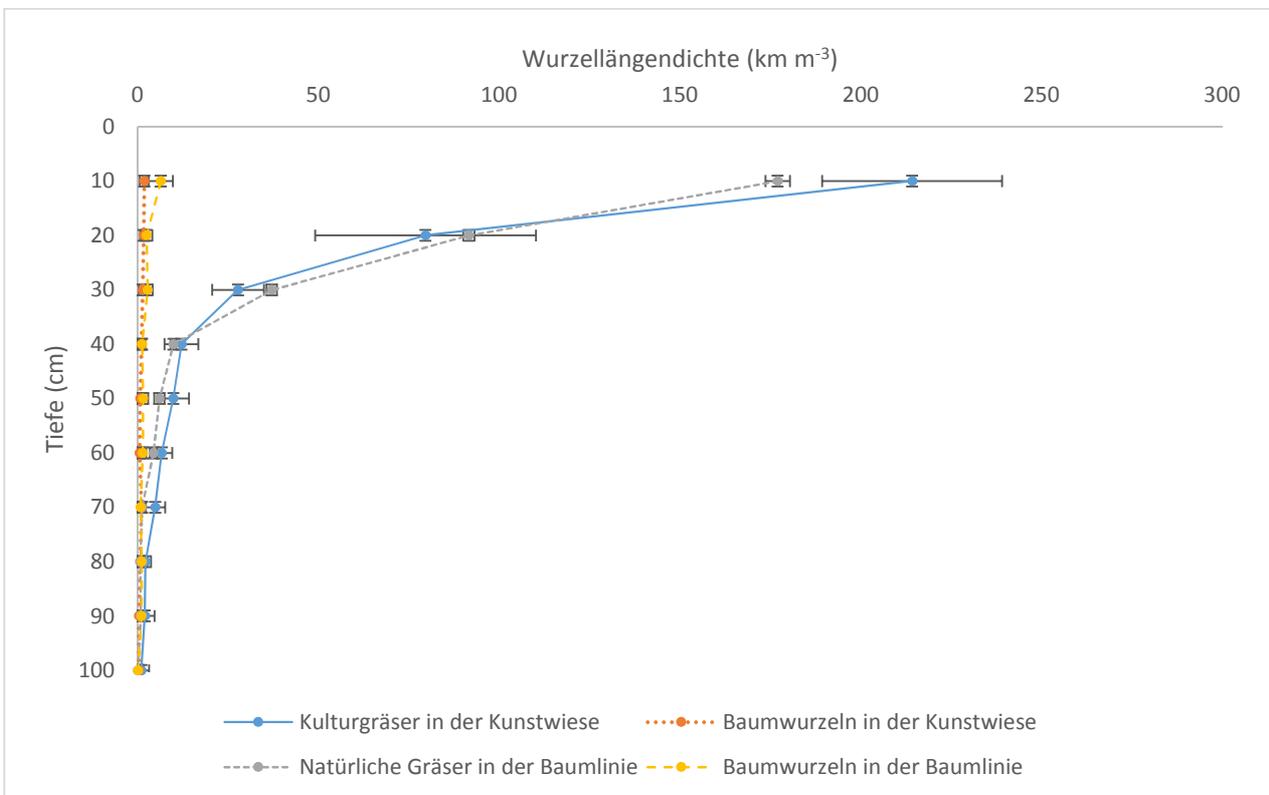
$$WLD(km\ m^{-3}) = 1,871 - 0,0162 * Tiefe(cm) \quad (R^2 = 0,82, F = 36,8261, p < 0,0003)$$

Funktion für die Baumwurzeln innerhalb der Baumlinie (WLD_{BaumB}):

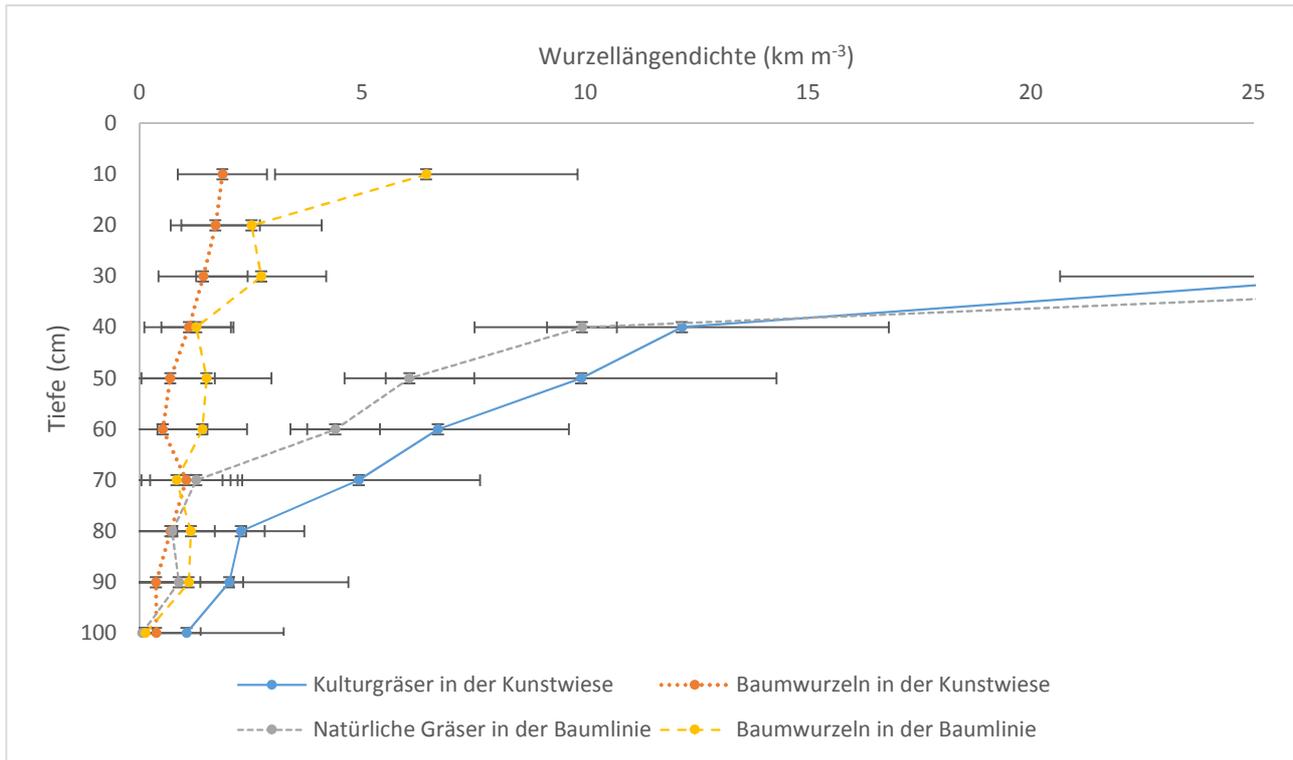
$$WLD(km\ m^{-3}) = 6,250 * e^{-0,028 \times Tiefe(cm)} \quad (R^2 = 0,72, F = 20,5560, p < 0,0019)$$

Tabelle 2: Ergebnisse der statistischen Auswertung (zweiseitige t-Tests) des Vergleichs der Wurzellängendichten der Kulturgräser und der natürlichen Gräser; separiert für die einzelnen Tiefen (alle Entfernungen zum Baumstamm inkludiert).

| Zielvariable | Einflussfaktor | Tiefe | dF | t-Wert | p-Wert |
|--------------------|----------------|-------------|----|---------|----------|
| Wurzellängendichte | Grasgruppe | 0 – 10 cm | 44 | 1,8554 | 0,0702 |
| | | 10 - 20 cm | 44 | -1,1995 | 0,2367 |
| | | 20 - 30 cm | 44 | -1,5773 | 0,1219 |
| | | 30 - 40 cm | 44 | 0,6825 | 0,4985 |
| | | 40 – 50 cm | 38 | 1,2265 | 0,2276 |
| | | 50 – 60 cm | 37 | 0,7817 | 0,4394 |
| | | 60 – 70 cm | 36 | 2,1328 | 0,0398 * |
| | | 70 – 80 cm | 36 | 1,2454 | 0,2210 |
| | | 80 – 90 cm | 28 | 0,0692 | 0,4944 |
| | | 90 – 100 cm | 21 | 0,8261 | 0,4180 |



Grafik 3: Veränderung der Wurzellängendichte (km m^{-3}) mit der Tiefe (cm), dargestellt für alle im Agroforstsystem vertretenen Pflanzengruppen (Kulturgräser und Baumwurzeln in der Kunstwiese sowie natürliche Gräser und Baumwurzeln in der Baumlinie).



Grafik 4: Veränderung der Wurzellängendichte (km m^{-3}) mit der Tiefe (cm), dargestellt für alle im Agroforstsystem vertretenen Pflanzengruppen (Kulturgräser und Baumwurzeln in der Kunstwiese sowie natürliche Gräser und Baumwurzeln in der Baumlinie). Diese Grafik zeigt in größerer Auflösung die Verhältnisse für die Wurzellängendichte von 0 – 25 km m^{-3} .

Auch für die Wurzellängendichten der Bäume zeigte sich ein signifikanter Einfluss der Tiefe (ANCOVA-Ergebnisse: $dF = 1$, F-Wert = 37,8550, $p < 0,001$ für WLD_{BaumB} ; $dF = 1$, F-Wert = 11,9707, $p < 0,0001$ für WLD_{BaumK}), wobei signifikante Interaktionen zwischen den unabhängigen Variablen (Tiefe und Entfernung zum Baumstamm) ausgeschlossen werden konnten. Ein signifikanter Unterschied zwischen WLD_{BaumB} und WLD_{BaumK} wurde für die ersten 10 cm sowie bei einer Bodentiefe von 20 - 30 cm detektiert. In beiden Fällen lagen signifikant höhere Wurzellängendichten innerhalb der Baumlinie vor (t-Test, $t = -3,2163$, $dF = 44$, $p = 0,0024$ für die ersten 10 cm; t-Test, $t = -2,1195$, $dF = 44$, $p = 0,0397$ bei 20 – 30 cm). Bis 70 cm zeigten sich auch tendenziell höhere Werte für WLD_{BaumB} , ab größeren Tiefen ging die Tendenz leicht zu höherem WLD_{BaumK} . Die komplette Ergebnisreihe des unabhängigen, zweiseitigen t-Tests ist in Tabelle 3 zu sehen.

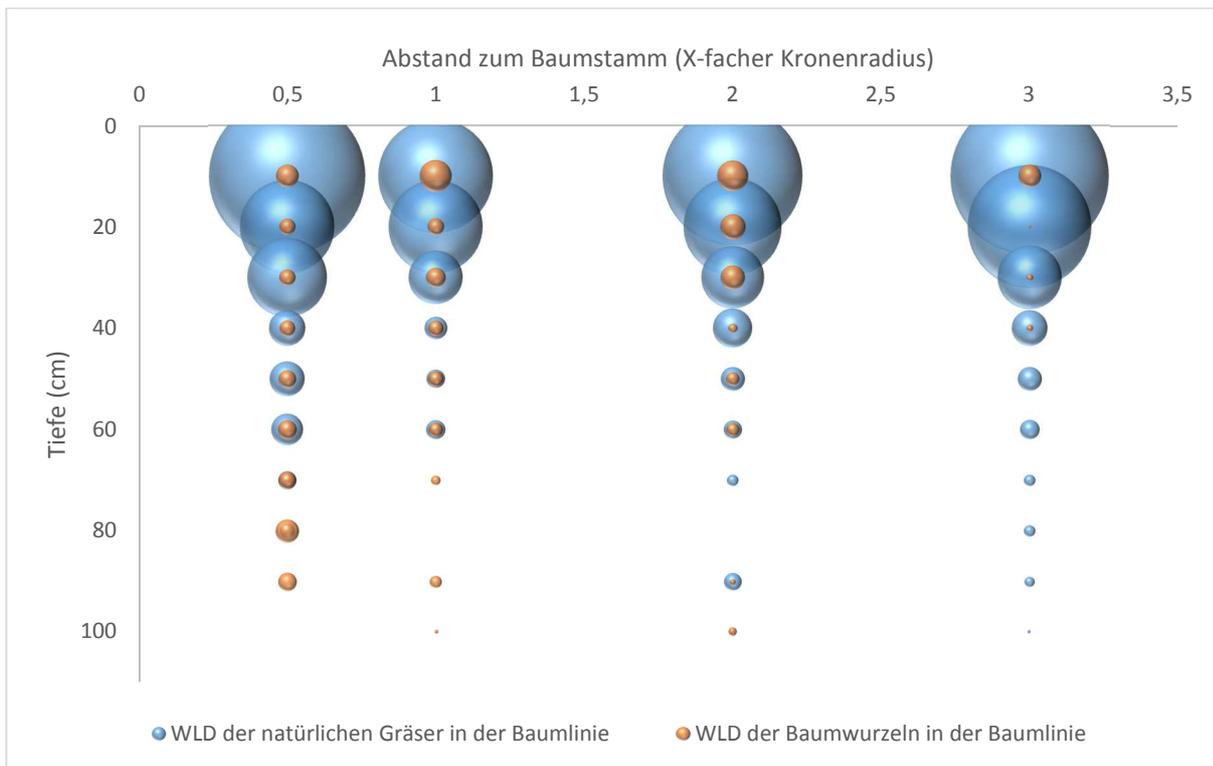
Tabelle 3: Ergebnisse der statistischen Auswertung (zweiseitige t-Tests) des Vergleichs der Wurzellängendichten der Baumwurzeln, die in Richtung der Kunstwiese, bzw. innerhalb der Baumlinie, gewachsen sind; separiert für die einzelnen Tiefen (alle Entfernungen zum Baumstamm inkludiert).

| Zielvariable | Einflussfaktor | Tiefe | dF | t-Wert | p-Wert |
|-------------------------|----------------------------------|-------------|----|---------|----------|
| Wurzellängen- dichte | Wuchsrichtung der Baumwurzeln | 0 – 10 cm | 44 | -3,2163 | 0,0024 * |
| | | 10 - 20 cm | 44 | -1,2103 | 0,2326 |
| | | 20 - 30 cm | 44 | -2,1195 | 0,0397 * |
| | | 30 - 40 cm | 44 | -1,0711 | 0,1982 |
| | | 40 – 50 cm | 38 | -1,3097 | 0,2007 |
| | | 50 – 60 cm | 37 | -1,8694 | 0,0695 |
| | | 60 – 70 cm | 36 | -0,0750 | 0,9406 |
| | | 70 – 80 cm | 36 | -0,4047 | 0,6881 |
| | | 80 – 90 cm | 28 | -1,4330 | 0,1629 |
| | | 90 – 100 cm | 21 | 0,6197 | 0,5421 |

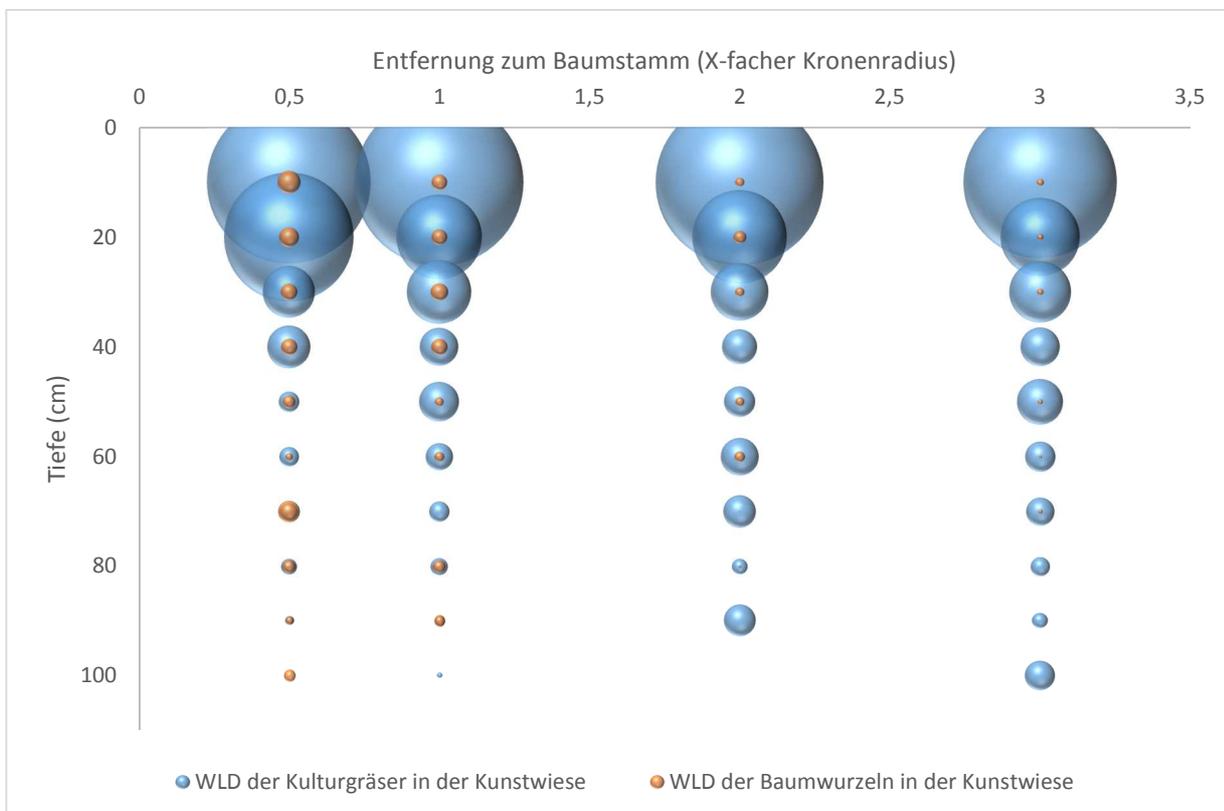
3.2.3 Horizontale Wurzelverteilung

Neben der vertikalen Wurzelverteilung sollte auch die horizontale Wurzelverteilung im Agroforstsystem betrachtet werden; d.h. wie verhalten sich die Wurzellängendichten der Gräser und Bäume in Abhängigkeit von verschiedenen Entfernungen zu den Baumstämmen. Grafik 5 bzw. 6 zeigen das proportionale Aufkommen der Wurzeln, die in der Baumlinie, bzw. in der Kunstwiese, extrahiert wurden. Grafik 7 stellt beide Ergebnisse zusammen dar.

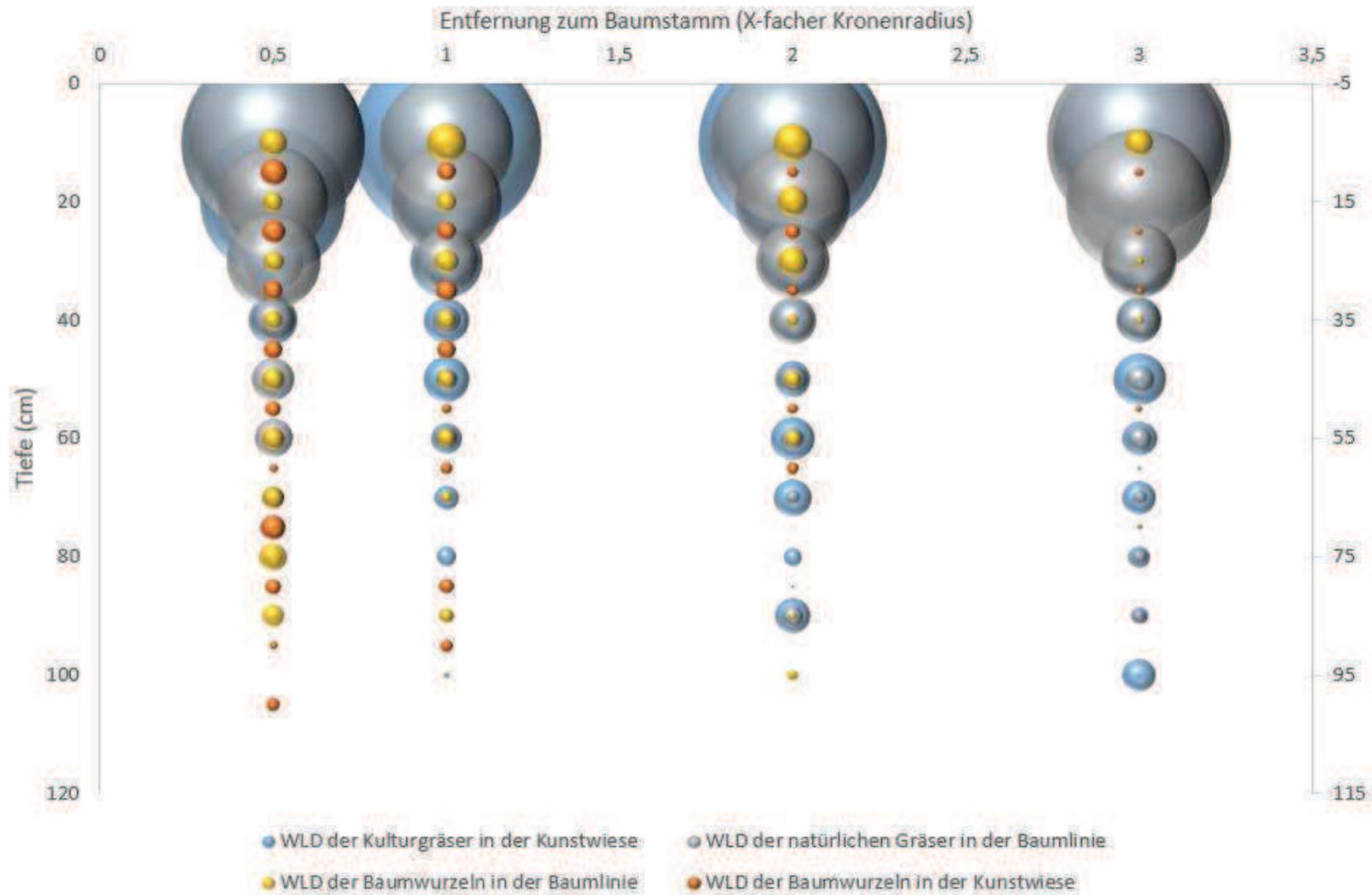
Wie die Grafiken 5, 6 und 7 erahnen lassen, war der Einfluss der Entfernung zum Baumstamm auf die Wurzellängendichten der Grasgruppen in der Gesamtbetrachtung nicht signifikant (ANCOVA-Ergebnisse: $dF = 1$, F-Wert = 0,1226, $p = 0,9467$ für WLD_{GrasK} ; $dF = 1$, F-Wert = 1,8272, $p = 0,1454$ für WLD_{GrasB}). Die Graswurzeln der Kunstwiese zeigten zwar höhere WLDs in tiefen Bodenschichten bei größeren Entfernungen zum Baumstamm, gleichzeitig traten hier jedoch geringere Wurzellängendichten in den oberen Bodenbereichen auf. Um dies genauer zu untersuchen, wurden Regressionsanalysen angewandt, da die Reaktion der WLDs auf eine zunehmende Entfernung im Mittelpunkt des Interesses stand. In der Gesamtbetrachtung zeigte sich eine leichte Zunahme der Wurzellängendichten mit zunehmender Entfernung zum Baumstamm für die natürlichen Gräser ($R^2 = 0,0003$, $dF = 1$, 135, F-Wert = 0,0399, $p = 0,8420$) und eine etwas steilere Zunahme für die Kulturgräser ($R^2 = 0,0023$, $dF = 1$, 253, F-Wert = 0,579, $p = 0,4472$). Eine separate Betrachtung der



Grafik 5: Vergleich der Wurzelverteilung der natürlichen Gräser und Baumwurzeln in der Baumlinie. Die Blasengröße ist proportional zu den erhobenen Wurzellängendichten und zeigt die Wurzellängendichten der beiden Pflanzengruppen in unterschiedlichen Tiefen und Entfernungen zum Baumstamm.



Grafik 6: Vergleich der Wurzelverteilung der Kulturgräser und Baumwurzeln in der Kunstwiese. Die Blasengröße ist proportional zu den erhobenen Wurzellängendichten und zeigt die Wurzellängendichten der beiden Pflanzengruppen in unterschiedlichen Tiefen und Entfernungen zum Baumstamm.



Grafik 7: Vergleich der Wurzelverteilung der Kulturgräser in der Kunstwiese, der natürlichen Gräser in der Baumlinie und den Baumwurzeln, die in Richtung der Kunstwiese sowie innerhalb der Baumlinie gewachsen sind. Die Blasengröße ist proportional zu den erhobenen Wurzellängendichten und zeigt die Wurzelverteilung der verschiedenen Pflanzengruppen in unterschiedlichen Tiefen und Entfernungen zum Baumstamm. Zur besseren Übersicht wurden die Werte für die Bäume in der Kunstwiese auf einer um -5 cm versetzten sekundären Y-Achse eingezeichnet.

einzelnen Tiefen lieferte detaillierte Ergebnisse (vgl. Tabelle 4 für WLD_{GrasK} und Tabelle 5 für WLD_{GrasB}). Dabei zeigte sich, dass in tieferen Bodenschichten eine Zunahme der Wurzellängendichten der Kulturgräser mit zunehmender Entfernungen zum Baumstamm vorlag, jedoch wiesen diese keine signifikanten Werte auf. Für die Tiefe zwischen 90 und 100 cm lag der Wert mit $p = 0,0531$ allerdings nur knapp unter dem Signifikanzniveau.

Die unterschiedlichen Zusammenhänge in den Regressionsanalysen der natürlichen krautigen Pflanzen (zunehmende WLD mit zunehmender Entfernung zum Baumstamm für 0 - 10, 10 – 20, 30-40, 80 – 90, 90 – 100 und abnehmende WLD mit zunehmender Entfernung zum Baumstamm für 20 - 30, 50 – 60, 60 – 70 cm) zeigen, dass hier insgesamt keine klaren linearen Beziehungen zwischen den Wurzellängendichten der natürlichen Gräser und der Entfernung zum Baumstamm vorliegen. Wie auch Grafik 5 andeutet, zeigen sich bei einem halben Kronenradius relativ hohe Wurzellängendichten, bei einem einfachen Kronenradius hingegen eher geringe WLDs. Dies hat zur Folge, dass trotz höherer WLDs bei einem dreifachen Kronenradius keine lineare Zunahme der WLDs mit zunehmender Entfernung zum Baumstamm für einige Tiefen vorliegt.

Bei den Baumwurzeln hingegen zeigten sich klare und hochsignifikante Unterschiede: Die Entfernung zum Baumstamm hatte sowohl auf WLD_{BaumB} , als auch auf WLD_{BaumK} , einen signifikanten Einfluss (ANCOVA-Ergebnisse: $dF = 3$, F-Wert = 11,9707, $p < 0,0001$ für WLD_{BaumK} ; $dF = 3$, F-Wert = 9,1641, $p < 0,0001$ für WLD_{BaumB}). Dass hier eine lineare Abnahme der WLDs mit zunehmender Entfernung zum Baumstamm vorlag, bestätigten die Regressionsanalysen ($R^2 = 0,1083$, $dF = 1, 253$, F-Wert = 30,7386, $p < 0,0001$ für WLD_{BaumK} ; $R^2 = 0,1175$, $dF = 1, 135$, F-Wert = 17,9754, $p < 0,0001$ für WLD_{BaumB}).

Ob ein Unterschied in der Reaktion der WLDs der Bäume, die innerhalb der Baumreihe gewachsen sind und derer, die in Richtung der Kunstwiese gewachsen sind, vorliegt, wurde mit einem zweiseitigen t-Test getestet. Dabei zeigten sich signifikant höhere Werte für WLD_{BaumB} bei einem einfachen (t-Test, t-Wert = -2,2871, $dF = 100$, $p = 0,0243$) und einem zweifachen Kronenradius (t-Test, t-Wert = -4,0099, $dF = 88$, $p < 0,0001$). Bei einem halben (t-Test, t-Wert = -1,8243, $dF = 104$, $p = 0,0710$) und einem dreifachen Kronenradius (t-Test, t-Wert = -1,1972, $dF = 92$, $p = 0,2343$) hingegen konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden, wobei die Tendenzen auch hier höhere WLDs innerhalb der Baumlinie anzeigen. Dies geht einher mit der Gesamtuntersuchung, die zeigte, dass innerhalb der Baumreihe insgesamt höhere Wurzellängendichten vorliegen, als außerhalb der Baumlinie (t-Test, t-Wert = -4,0517, $dF = 390$, $p < 0,0001$).

Tabelle 4: Ergebnisse der statistischen Auswertung (Regression) des Einflusses einer zunehmenden Entfernung zum Baumstamm auf die Wurzellängendichten der Kulturgräser; separiert für die einzelnen Tiefen.

| Zielvariable | Einflussfaktor | Tiefe | R ² | dF | F-Wert | p-Wert | Zusammenhang |
|-------------------------|--|-------------|----------------|-------|--------|--------|--------------|
| Wurzellängen- dichte | Zunehmende Entfernung zum Baumstamm | 0 – 10 cm | 0,0295 | 1, 28 | 0,8515 | 0,3640 | negativ |
| | | 10 - 20 cm | 0,1200 | 1, 28 | 3,8165 | 0,0608 | negativ |
| | | 20 - 30 cm | 0,0142 | 1, 28 | 0,4026 | 0,5309 | positiv |
| | | 30 - 40 cm | 0,0002 | 1, 28 | 0,0060 | 0,9390 | keiner |
| | | 40 – 50 cm | 0,1335 | 1, 24 | 3,6990 | 0,0664 | positiv |
| | | 50 – 60 cm | 0,0271 | 1, 24 | 0,6695 | 0,4213 | positiv |
| | | 60 – 70 cm | 0,0694 | 1, 24 | 1,7908 | 0,1934 | positiv |
| | | 70 – 80 cm | 0,0166 | 1, 24 | 0,4045 | 0,5308 | positiv |
| | | 80 – 90 cm | 0,0677 | 1, 16 | 1,1616 | 0,2971 | positiv |
| | | 90 – 100 cm | 0,2999 | 1, 11 | 4,6914 | 0,0531 | positiv |

Tabelle 5: Ergebnisse der statistischen Auswertung (Regression) des Einflusses einer zunehmenden Entfernung zum Baumstamm auf die Wurzellängendichten der natürlichen Gräser; separiert für die einzelnen Tiefen.

| Zielvariable | Einflussfaktor | Tiefe | R ² | dF | F-Wert | p-Wert | Zusammenhang |
|-------------------------|--|-------------|----------------|-------|--------|--------|--------------|
| Wurzellängen- dichte | Zunehmende Entfernung zum Baumstamm | 0 – 10 cm | 0,0635 | 1, 14 | 0,9503 | 0,3462 | positiv |
| | | 10 - 20 cm | 0,1784 | 1, 14 | 3,0389 | 0,1032 | positiv |
| | | 20 - 30 cm | 0,0396 | 1, 14 | 0,5777 | 0,4598 | negativ |
| | | 30 - 40 cm | 0,0198 | 1, 14 | 0,2830 | 0,6031 | positiv |
| | | 40 – 50 cm | 0,0162 | 1, 12 | 0,1971 | 0,6650 | negativ |
| | | 50 – 60 cm | 0,0289 | 1, 11 | 0,3273 | 0,5788 | negativ |
| | | 60 – 70 cm | 0,0694 | 1, 10 | 0,0219 | 0,8853 | negativ |
| | | 70 – 80 cm | 0,0166 | 1, 10 | 0,1972 | 0,6664 | negativ |
| | | 80 – 90 cm | 0,0677 | 1, 10 | 1,1238 | 0,3140 | positiv |
| | | 90 – 100 cm | 0,2999 | 1, 8 | 1,3366 | 0,2810 | positiv |

3.2.4 Gale & Grigal-Modell

Da durch die Beprobungstiefe von 1 m nicht sichergestellt werden konnte, dass die gesamte Wurzelmasse der Bäume erfasst wurde, wurden mithilfe von Literaturwerten nach dem Gale & Grigal-Modell (1987) die Tiefen bestimmt, in denen 50% (d_{50}) bzw. 95% (d_{95}) der Wurzelmasse der Gräser und Bäume zu erwarten waren. Die Literaturwerte sind in Tabelle 6 zu finden. Mithilfe dieser Werte konnten die Wurzellängendichten an den Stellen d_{50} und d_{95} für jede Pflanzengruppe und Entfernung zum Baumstamm bestimmt werden.

Tabelle 6: Zusammenstellung von Literatur-Daten zur Wurzelverteilung von Gräsern und laubwerfenden Bäumen in gemäßigten Breiten.

| Vegetationstyp | β | R ² | d_{50}^c (m) | d_{95}^c (m) | Maximale Wurzeltiefe (m) |
|--|--------------------|-------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|
| Gräser in gemäßigten Breiten | 0,943 ^a | 0,88 ^a | 0,12 ^{a,d} | 0,51 ^{a,e} | 2,6 ^b |
| Laubwerfende Bäume in gemäßigten Breiten | 0,966 ^a | 0,97 ^a | 0,22 ^{a,d} | 0,98 ^{a,e} | 2,9 ^b |

^a Gemittelte Daten von Arten der ganzen Welt (Jackson et al. 1996)

^b Gemittelte Daten von 82 Grasarten bzw. 21 Baumarten der gemäßigten Breiten (Canadell et al. 1996)

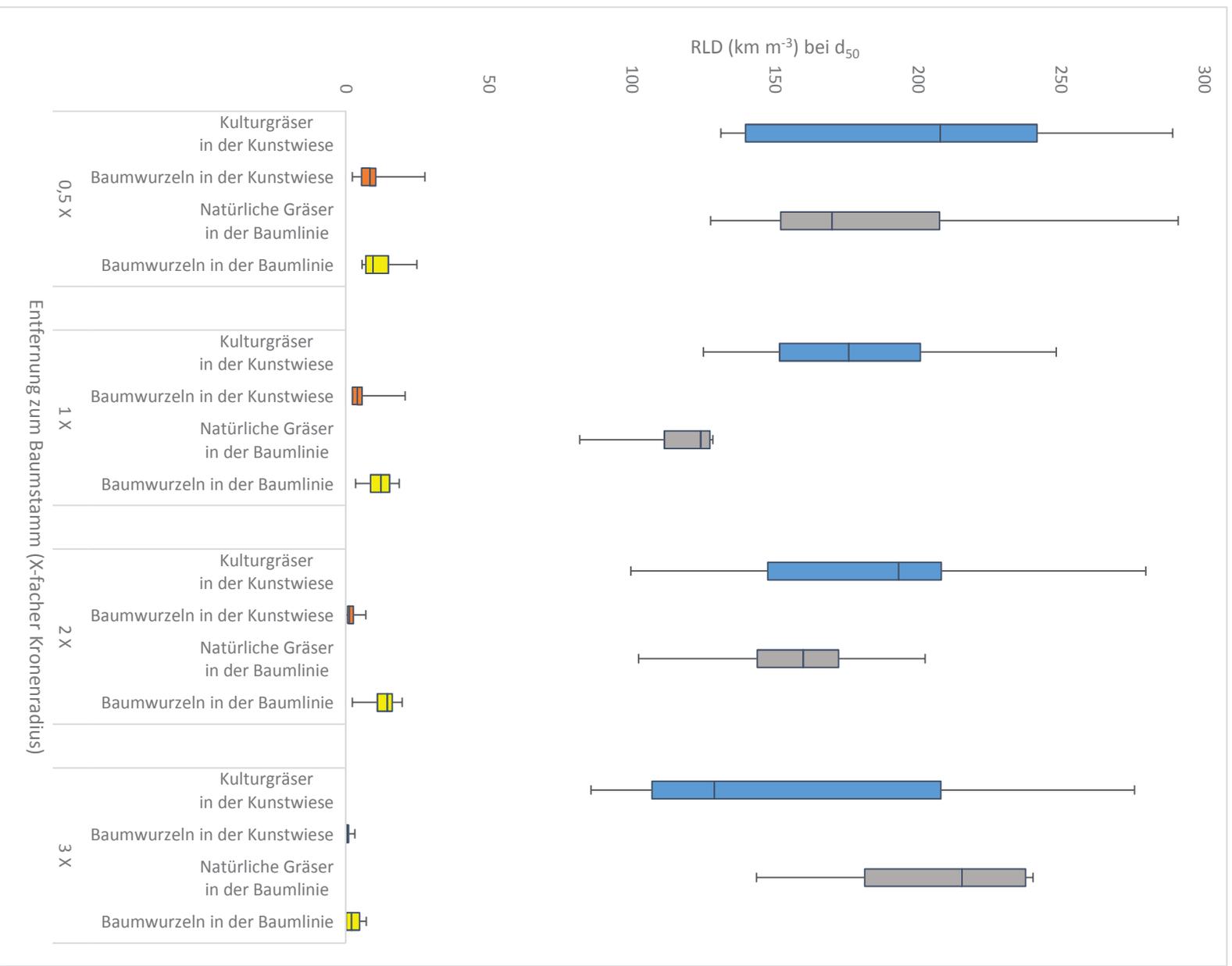
^c d_{50} und d_{95} zeigen die Tiefe an, an welcher 50% bzw. 95% des kumulativen Wurzelanteils zu erwarten sind. Bei diesen Werten handelt es sich um Schätzwerte nach dem Gale & Grigal-Modell (1987): $Y = 1 - \beta^d$; $Y =$ kumulativer Wurzelanteil von der Oberfläche bis zur Tiefe d , $\beta =$ Tiefenkoeffizient.

^d berechnet nach der Formel $\ln(0,5)/\ln(\beta)$

^e berechnet nach der Formel $\ln(0,05)/\ln(\beta)$

Grafik 8 zeigt Boxplots über die Wurzellängendichten aller verschiedenen Pflanzengruppen im Agroforstsystem an der Stelle d_{50} . Diese Grafik ermöglicht einen Vergleich der gemittelten kumulativen WLD-Werte der verschiedenen Pflanzengruppen bei einer Bodentiefe, in der 50 % der Wurzellängendichten zu erwarten waren, aufgezeigt für die einzelnen Entfernungen zum Baumstamm.

Die WLD-Werte der krautigen Wurzeln überragten die der Baumwurzeln in allen Fällen um ein Vielfaches (One-Way ANOVA: F-Wert = 318,9424, $dF = 3$, $p < 0,0001$). WLD_{GrasK} zeigte bei einer Entfernung von einem einfachen Kronenradius signifikant höhere Werte an der Stelle d_{50} als WLD_{GrasB} (t-test, t-Wert = -3,3626, $dF = 9$, $p < 0,0152$). Bei den restlichen Entfernungen konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Grasgruppen ausgemacht werden. Beim Vergleich der Wurzellängendichten der Baumwurzeln zeigte sich, dass die Wurzeln, die im Bereich der Baumlinie untersucht wurden, bei einer Entfernung von einem zweifachen Kronenradius signifikant höhere d_{50} -Werte erreichten, als die Wurzeln, die in der Kunstwiese untersucht wurden (t-test, t-Wert = -3,3626, $dF = 9$, $p < 0,0084$). Die gesamten statistischen Ergebnisse der t-Tests sind in Tabelle 7 und 8 dargestellt.



Grafik: Boxplots der Wurzellängendichte bei d_{50} , d.h. in der Tiefe, in der 59 % der Wurzelmasse zu erwarten waren. Dargestellt sind diese für die verschiedenen Entfernungen zum Baumstamm (= 0,5 X, 1 X, 2 X, 3 X; mit X = Kronenradius) für alle Pflanzengruppen des Agroforstsystems (Kulturgräser und Baumwurzeln in der Kunstwiese sowie natürliche Gräser und Baumwurzeln in der Baumlinie).

Tabelle 7: Ergebnisse der statistischen Auswertung (zweiseitige t-Tests) des Vergleichs der Wurzellängendichten bei d_{50} der beiden Grasgruppen untereinander (Kulturgräser und natürliche Gräser); einzeln für jede Entfernung vom Baumstamm.

| Zielvariable | Einflussfaktor | Entfernung zum Baumstamm | t-Wert | dF | p-Wert |
|----------------------------|----------------|--------------------------|---------|----|----------|
| WLD an der Stelle d_{50} | Grasgruppe | 0,5 X | 0,2929 | 10 | 0,7756 |
| | | 1 X | 2,9237 | 10 | 0,0152 * |
| | | 2 X | 0,7515 | 9 | 0,4715 |
| | | 3X | -1,2106 | 9 | 0,2569 |

Tabelle 8: Ergebnisse der statistischen Auswertung (zweiseitige t-Tests) des Vergleichs der Wurzellängendichten bei d_{50} der Baumwurzeln, die innerhalb der Baumlinie wuchsen (WLD_{BaumB}) und denen, die in Richtung der Kunstwiese gewachsen sind (WLD_{BaumK}); einzeln für jede Entfernung vom Baumstamm.

| Zielvariable | Einflussfaktor | Entfernung zum Baumstamm | t-Wert | dF | p-Wert |
|----------------------------|-------------------------------|--------------------------|---------|----|----------|
| WLD an der Stelle d_{50} | Wuchsrichtung der Baumwurzeln | 0,5 X | -0,6204 | 10 | 0,5488 |
| | | 1 X | -1,7149 | 10 | 0,1171 |
| | | 2 X | -3,3626 | 9 | 0,0084 * |
| | | 3X | -1,1295 | 9 | 0,2879 |

3.3 Lagerungsdichte

Während die Tiefe einen signifikanten Einfluss auf die Lagerungsdichte hatte, konnte kein Einfluss der Entfernung zum Baumstamm festgestellt werden (vgl. Tabelle 9). Dass der Tiefeneinfluss sukzessiver Natur war, zeigten Regressionsanalysen ($R^2 = 0,2592$, $dF = 1, 55$, F-Wert = 19,2428, $p < 0,0001$ für die Lagerungsdichte in der Baumlinie, $R^2 = 0,2815$, $dF = 1, 62$, F-Wert = 23,8986, $p < 0,0001$ für die Lagerungsdichte in der Kunstwiese). Der höchste Wert der Lagerungsdichte wurde in der Kulturwiese in einer Tiefe von 60 - 80 cm, in einer Distanz von einem einfachen Kronenradius zum Baumstamm gemessen und beträgt $1,53 \text{ g cm}^{-3}$. Der niedrigste Wert lag bei $0,64 \text{ g cm}^{-3}$ (Bodentiefe: 0-20 cm, Entfernung zum Baumstamm: einfacher Kronenradius). Unterschiede zwischen der Lagerungsdichte in der Kulturwiese und in der Baumlinie konnten nicht detektiert werden (t-Test, t-Wert = 1,3124, $dF = 116$, $p = 0,1920$).

Tabelle 9: Ergebnisse der statistischen Auswertung (ANKOVA) über die Lagerungsdichte. Einflussfaktoren stellten die Entfernung zum Baumstamm und die Tiefe dar, Zielvariable war die Lagerungsdichte.

| Zielvariable | Einflussfaktor | dF | F-Wert | p-Wert |
|------------------------------------|--------------------|----|--------|------------|
| Lagerungsdichte in der Kulturwiese | Entfernung | 1 | 0,00 | 0,9826 |
| | Tiefe | 1 | 23,47 | < 0,0001 * |
| | Entfernung*Distanz | 1 | 1,63 | 0,2067 |
| | | | | |
| Lagerungsdichte in der Baumlinie | Entfernung | 1 | 0,10 | 0,7479 |
| | Tiefe | 1 | 18,45 | < 0,0001 * |
| | Entfernung*Distanz | 1 | 0,04 | 0,8482 |

3.4 Gravimetrischer Wassergehalt

Da keine parametrischen Daten für die Wassergehalte in der Baumlinie erzeugt werden konnten, wurden mittels eines Wilcoxon-Tests die Wassergehalte in der Baumlinie und in der Kunstwiese miteinander verglichen. Dabei zeigten sich signifikant höhere Wassergehalte in der Baumlinie, als in der Kunstwiese (Wilcoxon, $Z = 4,3874$, $n_{\text{Baumlinie}} = 57$, $n_{\text{Kunstwiese}} = 65$, $p < 0,0001$). Betrachtet man die einzelnen Tiefen separat, sind die Ergebnisse für die Tiefen zwischen 0 und 20, 40 und 60 und 80 und 100 cm signifikant (vgl. Tabelle 10).

Tabelle 10: Ergebnisse der statistischen Auswertung (Wilcoxon-Test) des Vergleichs der Wassergehalte in der Baumlinie und in der Kunstwiese; einzeln für jede Tiefe.

| Zielvariable | Einflussfaktor | Tiefe | Z-Wert | $n_{\text{Baumlinie}}$ | $n_{\text{Kunstwiese}}$ | p-Wert |
|--------------|---------------------------|-------------|--------|------------------------|-------------------------|----------|
| Wassergehalt | Kulturwiese vs. Baumlinie | 0 – 20 cm | 2,7472 | 15 | 16 | 0,0060 * |
| | | 20 – 40 cm | 1,9119 | 11 | 13 | 0,0559 |
| | | 40 – 60 cm | 2,8546 | 12 | 14 | 0,0043 * |
| | | 60 – 80 cm | 0,7583 | 10 | 12 | 0,4483 |
| | | 80 – 100 cm | 2,6536 | 9 | 10 | 0,0080 * |

4 Diskussion

Die Struktur des Diskussionskapitels beläuft sich auf die folgenden Aspekte. Zunächst werden die methodischen Aspekte der Wurzeluntersuchungen beleuchtet. Anschließend wird auf die Faktoren eingegangen, die die Untersuchungsergebnisse beeinflusst haben könnten, wobei unter anderem die Wurzelsysteme der Gräser und Bäume detailliert beschrieben werden. Daraufhin erfolgt die Verifizierung bzw. Falsifizierung der Arbeitshypothesen samt Ergebnisdiskussion. Schlussendlich werden Forschungsfragen für die Zukunft formuliert.

4.1 Kalibrierungskurve zur Schätzung der Wurzellängendichten

Die Beziehung zwischen N_{Wurzeln} und den WLD-Werten war für die Gräser ($R^2 = 0,92$) deutlich besser als für die Bäume ($R^2 = 0,08$). Da diese Kalibrierungskurve die Grundlage für einen Großteil der WLD-Daten ist, sind die Ergebnisse für die Bäume mit Vorsicht zu interpretieren. Auch eine Erhöhung der Stichprobenzahl konnte keine bessere Beziehung erzeugen. Während andere Autoren lediglich 18 oder 19 (Mulia und Dupraz 2006) bzw. 65 (Moreno et al. 2005) Proben zur Erstellung der Kalibrierungskurven verwendet hatten, wurden in dieser Arbeit 82 Ergebnisse kalibriert. Dabei wurde auch darauf geachtet, dass die gesamte Spannweite der gezählten Wurzeln in der Regression vertreten war.

Zum Teil lässt sich das geringe Bestimmtheitsmaß der Regression für die Baumwurzeln mit einer kleinen Spannweite der gezählten Wurzeln während des Kernbruchs ($0 - 2.547$ Wurzeln m^{-2} bei Bäumen bzw. $0 - 63.662$ Wurzeln m^{-2} bei Gräsern) erklären, sowie einer geringen Spannweite bei den tatsächlich ermittelten Werten der Wurzellängendichten ($0 - 12$ km m^{-3} bei Bäumen bzw. $0 - 454$ km m^{-3} bei Gräsern). Eine weitere Erklärung findet sich in dem lückenhaften Verteilungsmuster von Baumwurzeln (Gilman 1990, Moreno et al. 2005): Dadurch treten diese auch in den Bodenkernproben weniger gleichverteilt auf, was in einer weniger präzisen Vorhersage aus der Kernbruchzählung resultiert. So kam es in einigen Fällen vor, dass eine aggregierte Menge an Feinwurzeln in einem Bodenkern vorhanden war, diese jedoch nicht bis an die Kernbrucebene reichte und somit nicht zu N_{Wurzeln} gezählt wurde. Dies erklärt beispielsweise die Unstimmigkeiten in der Kalibrierungskurve, wo keine zählbaren Baumwurzeln Wurzellängendichten über 10 km m^{-3} aufwiesen. Gleichzeitig konnte es vorkommen, dass genau eine solche aggregierte Feinwurzelmenge in der Kernbrucebene lag und zu einem hohen N_{Wurzeln} führte, im Rest des Bodenkerns allerdings keine weiteren Baumwurzeln vorhanden waren, sodass die gesamt ermittelte Wurzellängendichte eher gering war.

Auch in ähnlichen Studien ist die Regression von Baumwurzeln tendenziell schlechter als die von Gräserwurzeln (Moreno et al. 2005, Mulia und Dupraz 2006). Dennoch konnten Moreno et al. (2005) R^2 -Werte von $0,47$ (für Steineichen, *Quercus ilex*) und Mulia und Dupraz (2006) R^2 -Werte von $0,32$ (für Pappeln, *Populus euramericana*) und $0,56$ (für Walnussbäume, *Juglans regia x nigra*) ermitteln – und dies trotz geringerer Stichprobenzahlen als Kalibrierungsgrundlage.

Eine Erklärung dieses Unterschieds könnte sich im höheren Alter der Bäume in diesen beiden Studien finden lassen. Die Steineichen waren zum Untersuchungszeitpunkt beispielsweise knapp 8 m hoch und die Walnussbäume und Pappeln wurden 11 bzw. 10 Jahre vor der Beprobung in die Untersuchungsflächen in Südfrankreich gepflanzt. Die in der vorliegenden Studie untersuchten Holzapfel- und Wildbirnbäume wurden hingegen erst vor 8 Jahren in die Untersuchungsfläche gepflanzt und waren zum Untersuchungszeitpunkt im Schnitt nur 2,84 m hoch. Mit zunehmendem Alter vergrößert und verdichtet sich das Wurzelwerk der Bäume, wohingegen das Wurzelwerk von jungen Bäumen sehr lückenhaft verteilt ist (Gilman 1990, Moreno et al. 2005); was, wie oben beschrieben, zu einer schlechteren Vorhersage aus der Kernbruchzählung führt.

Hierbei ist zusätzlich die Methodik zu diskutieren, denn die Ergebnisse von Moreno et al. (2005) und Mulia und Dupraz (2006) sind nicht direkt mit den hier vorliegenden Ergebnissen vergleichbar. Während die Bodenkerne in dieser Arbeit lediglich einen Durchmesser von 5 cm ausmachten, wiesen die Bodenkerne in der Studie von Muli und Dupraz (2006) einen Durchmesser von 8,5 und in den Untersuchungen von Moreno et al. (2005) einen Durchmesser von 10 cm auf. Dadurch stellten unterschiedlich große Oberflächen die Ausgangslagen beim Kernbruch dar und es wurden unterschiedliche Bodenvolumina (196,35 cm³ bzw. 2269,80 cm³ bzw. 3141,60 cm³) untersucht.

4.2 Lagerungsdichte und Wassergehalt

Die Lagerungsdichte des Bodens nahm mit zunehmender Tiefe sowohl in der Kunstwiese, als auch innerhalb der Baumlinie sukzessive zu ($p < 0,0001$), was für einen normalverdichteten Boden spricht (Gisi 1997). Die Ergebnisse zeigten keinen limitierenden Einfluss der Lagerungsdichte: Es zeigten sich auch in den tiefen Bodenschichten von 60 – 80 cm und 80 – 100 cm gemittelte Werte für die Lagerungsdichte um die 1,12 g cm⁻³, was unter der kritischen Grenze von 1,6 g cm⁻³ liegt, ab der das Wurzelwachstum eingeschränkt ist (McKenzie et al. 2004). Unterschiede zwischen der Lagerungsdichte in der Baumlinie und in der Kunstwiese konnten nicht ausgemacht werden (vgl. Tabelle 9), sodass diese als Einflussfaktor für im Folgenden diskutierte Unterschiede in der Baumlinie und in der Kunstwiese ausgeschlossen werden kann.

Die gravimetrischen Wassergehalte hingegen waren in der Baumlinie signifikant höher als in der Kunstwiese ($p < 0,0001$). Zwar handelt es sich hierbei um eine Momentaufnahme zum Beprobungszeitpunkt, es wurde jedoch darauf geachtet, dass einzelne Probennahmen in der Baumlinie und in der Kunstwiese immer am selben Tag durchgeführt wurden, sodass z.B. Wetterereignisse die Ergebnisse nicht unterschiedlich beeinflussen konnten.

4.3 Wurzelsysteme

In diesem Agroforstsystem wurden tief wurzelnde Gräser (Crush et al. 2005) zusammen mit Bäumen gepflanzt, die als Flachwurzler gelten (Yocum 1937, Kolesnikov 1971, Sutton und Tinus 1983). Dies

liefert zwar nicht die besten Voraussetzungen für ein profitables Agroforstsystem, da die Komponenten dafür bestenfalls eine komplementäre Ressourcennutzung aufweisen (Van Noordwijk et al. 1991a), aber eine interessante Ausgangslage für diese Untersuchung. Einige Studien zeigten eine erstaunliche Plastizität von Wurzelsystemen (Yocum 1937, Moreno et al. 2005, Mulia und Dupraz 2005) und eine Tendenz von Pflanzen schwerwiegende, unterirdische Konkurrenz zu vermeiden (Schroth 1998) und Nischen zu finden (Casper und Jackson 1997, Moreno et al. 2005). Dies wird nachfolgend hinsichtlich der observierten Wurzeldaten diskutiert.

Vorab kann festgehalten werden, dass H₁: *Kernobstbäume und Kulturgräser wurzeln in unterschiedlichen Bodenschichten* falsifiziert wurde. H₂: *Die Bodenbearbeitung im Ackerland in Agroforstsystemen führt zu einem unterschiedlichen Wurzelwachstum von Kernobstbäumen innerhalb der Baumlinie und in Richtung des Ackerlands* hingegen konnte mit hochsignifikanten Ergebnissen verifiziert werden. H₃: *Das Wurzelverteilungsmuster der angesäten Kulturgräser in der Kunstwiese unterscheidet sich von dem der natürlich vorkommenden krautigen Vegetation in der Baumlinie* wurde ebenfalls falsifiziert.

4.3.1 Wurzelsystem der Gräser

Die Wurzellängendichten beider Grasgruppen nahmen mit zunehmender Tiefe in exponentieller Form hochsignifikant ab ($p < 0,0001$). Dies konnte auch in anderen Studien gezeigt werden: Eine umfangreiche Studie von Schenk und Jackson (2002) kam zu dem Ergebnis, dass die meisten Pflanzen mindestens 50 % ihrer Biomasse in den ersten 30 cm des Bodens ausbilden. Auch spezielle Studien über Kulturgräser und *Lolium*-Arten zeigten ein solches Verteilungsmuster (Kristensen und Thorup-Kristensen 2004, Crush et al. 2005, Deru et al. 2012). Die Größenverhältnisse der Wurzellängendichten stimmen mit anderen Studien ähnlicher krautiger Vegetation überein (Deru et al. 2012, Yu et al. 2016).

Sowohl in der Kunstwiese als auch in der Baumlinie wurden in der tiefsten untersuchten Bodenschicht, bei 1 m Tiefe, noch vereinzelt Graswurzeln gefunden. In der Kunstwiese waren dies wahrscheinlich vor allem Wurzeln von *Lolium multiflorum*, da auch Crush et al. (2005) Wurzeln des Italienischen Raygrases noch bei 1 m Tiefe nachweisen konnten. Kristensen und Thorup-Kristensen (2004) fanden Wurzeln von *Lolium multiflorum* nur bis zu einer Tiefe von 75 cm, wobei Inkonsistenz bei Beschreibungen von Wurzeltiefen einzelner Arten nach Coile (1937) die Variabilität von Bodeneigenschaften widerspiegeln. Dass hier kein limitierender Einfluss der Lagerungsdichte gezeigt werden konnte, geht mit diesem Sachverhalt einher. Die beiden *Trifolium*-Arten, weitere Bestandteile der Kunstwiese, waren hingegen nur in Tiefen bis zu 50 cm zu erwarten (Pearson und Jacobs 1985, Lambrechts et al. 2014). In der Baumlinie war *Dactylis glomerata* die Art mit den tiefsten Wurzeln, die 1 m Tiefe erreichen können (Molyneux und Davies 1983, Voltaire und Thomas 1995, Körner 2013).

Es konnte kein maßgeblicher Unterschied zwischen den Wurzellängendichten der natürlichen

krautigen Vegetation in der Baumlinie und der angesäten Kunstwiese ausgemacht werden ($p = 0,4502$), sodass die Arbeitshypothese H_3 falsifiziert wurde. Dieses Ergebnis stimmt nicht mit Berichten von Jackson et al. (1996) überein, nach denen Anbauflächen sehr geringe Wurzelmassen im Vergleich zu den meisten anderen Biomen zeigten. Im Vergleich zu Grünland der gemäßigten Breiten sollten sie sich auf nur 1/10 belaufen. Die Ergebnisse decken sich auch nicht mit dem Befund von Moreno et al. (2005), die höhere Wurzellängendichten für angesäte Pflanzen im Vergleich zur natürlichen krautigen Vegetation in Dehesas fanden. Dies spricht dafür, dass Anbauflächen womöglich je nach Feldfrucht, Bodenbedingungen und klimatischen Verhältnissen zu divers sind, als dass die Wurzelverteilung und -masse mit einem β -Wert (im Rahmen des Gale & Grigal-Modells) und einer durchschnittlichen Biomasse pro m^2 beschrieben werden könnten.

Aus diesem Grund wurden zur Berechnung der WLDs an der Stelle d_{50} für beide Grasgruppen der Literaturwert für *Grünland der gemäßigten Breiten* benutzt. Dafür sprach mitunter, dass beide Grasgruppen ähnlich hohe Werte der Wurzellängendichten aufwiesen und ähnliche Verteilungsmuster zeigten.

4.3.2 Wurzelsystem der Bäume

Baumwurzeln zeigten in beiden Orientierungen eine Abnahme der Wurzellängendichten mit zunehmender Tiefe ($p < 0,0001$ für WLD_{BaumK} und WLD_{BaumB}) und zunehmender Entfernung vom Baumstamm ($p < 0,0001$ für WLD_{BaumK} und WLD_{BaumB}), wobei bei allen untersuchten Bäumen noch vereinzelt Wurzeln bei einem dreifachen Kronenradius gefunden werden konnten. Dies bestätigt frühere Untersuchungen, die zeigten, dass Obstbäume Wurzeln in zwei- bis dreifachen Kronenradien ausbilden können (Rogers und Booth 1960). Das vertikale Verteilungsmuster entspricht den Ergebnissen nach Schenk und Jackson (2002) und Jackson et al. (1996).

Unterschiede zwischen den Baumwurzeln, die innerhalb der Baumlinie bzw. in Richtung der Kunstwiese gewachsen sind zeigten sich in der Geometrie der vertikalen Abnahmeform: Während WLD_{BaumB} exponentiell mit zunehmender Tiefe abnahm, nahm WLD_{BaumK} quasi-linear ab. Populäre Wurzelmodelle (z.B. HyPAR (Mobbs et al. 1999), WaNuLCAS (Van Noordwijk und Lusiana 2000)) nehmen eine exponentielle Abnahme mit der Bodentiefe an, was passend für die Baumwurzeln innerhalb der Baumlinie war, nicht aber für die Baumwurzeln, die in Richtung der Kunstwiese gewachsen sind. Dass diese Modelle die simple Form einer exponentiellen Abnahme der Baumwurzeln mit zunehmender Tiefe und Distanz vom Baumstamm annehmen, ist nach einigen Autoren auf die Schwierigkeit und Komplexität von Wurzeluntersuchungen zurückzuführen, was in einem Mangel an quantitativen Informationen über Wurzelsysteme resultiert (Jose et al. 2001, Smith et al. 1999, Moreno et al. 2005). Eine monotone exponentielle Abnahme der Wurzellängendichten mit zunehmender Entfernung zum Baumstamm erscheint zunächst logisch und wurde für zahlreiche Baumarten, vor allem in Monokulturen, nachgewiesen (Rogers und Booth 1960, Pallardy 2010,

Moreno et al. 2005, Mulia und Dupraz 2005). Eine Studie über die Wurzelverteilung von Pappeln und Hartweizen in einem Agroforstsystem kam jedoch zu einem andersartigen Ergebnis. Darin bilden Pappeln ihre höchsten WLDs bei der maximal untersuchten Entfernung zum Baumstamm, mitten in der Hartweizenfläche, aus (Mulia und Dupraz 2006). Auch eine Studie über Apfelbäume in Neuseeland kam zu dem Ergebnis, dass sich das horizontale Verteilungsmuster der Bäume im Verlauf der Zeit ändert (De Silva et al. 1999). So wiesen junge Apfelbäume (5-jährig) eine schalenförmige Wurzelverteilung auf, wonach sich die Wurzellängendichten mit zunehmender radialer Entfernung zum Baumstamm verringerten. Im Gegensatz dazu erhöhten sich die Wurzellängendichten von älteren Apfelbäumen (9-jährig) mit zunehmender Entfernung zum Baumstamm. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass Apfelbäume keine Pfahlwurzel ausbilden, sondern die lateralen Strukturwurzeln weiterwachsen und sich verzweigen. Mit der Zeit entsteht daher eine höhere unterirdische Biomasse in größerer Entfernung zum Baumstamm (De Silva et al. 1999). Dass die Apfelbäume im untersuchten Agroforstsystem schon seit 8 Jahren in der Untersuchungsfläche stehen, jedoch immer noch die schalenförmige Wurzelverteilung aufweisen, kann auf der einen Seite sicherlich auf eine längere Vegetationsperiode in Neuseeland zurückgeführt werden (Niwa 2016). Auf der anderen Seite können aber auch Interaktionen zwischen Feldfrüchten und Baumwurzeln das Wurzelverteilungsmuster der Bäume beeinflussen (Yocum 1937, Lehmann et al. 1998, Wanvestraut et al. 2004, Mulia und Dupraz 2005).

Neben den unterschiedlichen Abnahmefunktionen der Wurzellängendichten mit der Tiefe, zeigte sich innerhalb und außerhalb der Baumreihe ein weiterer großer Unterschied für die Baumwurzeln: Innerhalb der Baumreihe lagen insgesamt signifikant höhere Wurzellängendichten vor als in der Kunstwiese ($p < 0,0001$). Dies legt nahe, dass es Einflussfaktoren geben muss, die dazu führen, dass WLD_{BaumK} und WLD_{BaumB} so unterschiedliche Parameter annehmen. Dieser Sachverhalt wird im Folgenden im Zusammenhang mit den Ergebnissen der Graswurzeln, der Bodenbearbeitung und der Wassergehalte im Agroforstsystem diskutiert.

4.3.3 Kombinierte Wurzelsysteme: Interaktionen und Folgen für die Konkurrenz um Bodenressourcen

Wie schon angesprochen, zeigten sich signifikant höhere Wurzellängendichten für die Baumwurzeln innerhalb der Baumlinie, gegenüber jenen, die in der Kunstwiese gefunden und untersucht worden waren ($p < 0,0001$). In der für die einzelnen Tiefen separat durchgeführten Analyse zeigten sich die ausschlaggebenden Unterschiede überwiegend in oberflächennahen Bereichen (vgl. Tabelle 3). Da hier kein Unterschied bei den Wurzellängendichten der Gräser detektiert wurde (vgl. Tabelle 2), kann Wurzelkonkurrenz durch die Gräser als Einflussfaktor vernachlässigt werden. Vielmehr lässt sich annehmen, dass die Bodenbearbeitung einen entscheidenden Faktor darstellt. In der Literatur wird Pflügen explizit als Maßnahme genannt, um Baumwurzeln in den oberen Bodenschichten zu stören,

worauhin diese sich weniger in oberflächennahen Bodenbereichen ausbreiten und sich schneller in tiefere Bodenschichten orientieren (Brix et al. 2009). Dass im untersuchten Agroforstsystem in der Kunstwiese ab einem einfachen Kronenradius 20 cm tief gepflügt wird, nicht aber in der Baumlinie, kann erklären, warum in der Baumlinie vermehrt Baumwurzeln in der Oberflächenschicht auftauchen. Dass sich eine Veränderung von einer exponentiellen Abnahmefunktion in einem Bereich ohne oberflächliche Bodenbearbeitung (WLD_{BaumB}) hin zu einer linearen Abnahme in einem Bereich mit oberflächlicher Bodenbearbeitung (WLD_{BaumK}) zeigt, spiegelt die veränderte Orientierung von Baumwurzeln in tiefere Bodenschichten durch das Pflügen wider. Abbildung 16 veranschaulicht dies. Die Annahme, dass hier ein Einfluss des Pflügens vorliegt, wird bestätigt durch signifikante höhere Werte für $d_{50}\text{-}WLD_{BaumB}$ bei einem zweifachen Kronenradius, nicht aber bei einem halben oder einfachen Kronenradius. Bei einem dreifachen Kronenradius waren die Werte für $d_{50}\text{-}WLD_{BaumB}$ und $d_{50}\text{-}WLD_{BaumK}$ aufgrund der großen Entfernung sehr gering und es konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Mit einem gemittelten Wert von $2,83 \text{ km m}^{-3}$ zeigte $d_{50}\text{-}WLD_{BaumB}$ bei dieser Entfernung aber dennoch höhere Werte als $d_{50}\text{-}WLD_{BaumK}$ ($0,81 \text{ km m}^{-3}$).

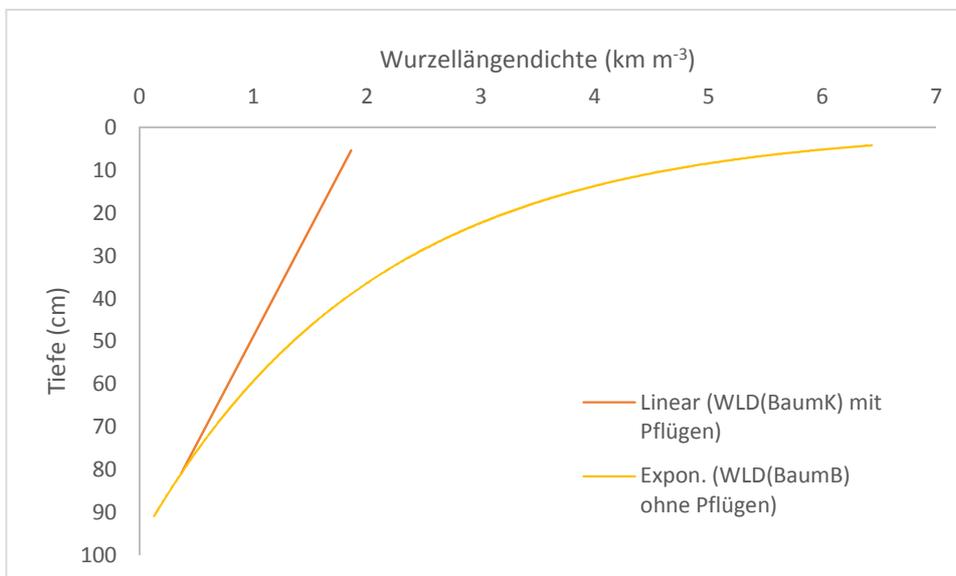


Abbildung 16: Die unterschiedliche Veränderung der Wurzellängendichten der Baumwurzeln mit zunehmender Tiefe bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung. Im Wurzelbereich WLD_{BaumK} wurde gepflügt und es zeigte sich eine lineare Abnahmeform. Im Wurzelbereich von WLD_{BaumB} wurde nicht gepflügt und es zeigte sich eine exponentielle Abnahmeform.

Daraus lässt sich weiterhin ableiten, dass die präferierte Orientierung der Wurzeln der Holzapfel und Wildbirnbäume, ohne menschliche Einflussfaktoren, in Richtung der oberen Bodenschichten geht. Dies bestätigt die Klassifizierung der Bäume als Flachwurzler (Yocum 1937, Kolesnikov 1971, Sutton und Tinus 1983). Da WLD_{BaumB} auch unterhalb der gepflügten Bodenschichten bis 70 cm höhere Werte, gegenüber WLD_{BaumK} , annahm, lässt sich annehmen, dass die Baumwurzeln insgesamt bevorzugt in diesem ungestörten Bereich wurzeln. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Wurzelwachstum der Kernobstbäume innerhalb der Baumlinie und in Richtung der Kunstwiese deutliche Unterschiede aufwies. Dies spricht für die Verifizierung der Arbeitshypothese H_2 : Die

Bodenbearbeitung im Ackerland in Agroforstsystemen führt zu einem unterschiedlichen Wurzelwachstum von Kernobstbäumen in Richtung der Baumlinie und in Richtung des Ackerlands.

Diese horizontale Separierung der Baumwurzeln und Ackerfruchtwurzeln legt zugleich nahe, dass die unterirdische Konkurrenz der Bäume und Ackerfrüchte des Agroforstsystems reduziert ist.

Die Ergebnisse zeigen auch, dass, zumindest in Agroforstsystemen, die unterschiedliche Bodenbearbeitungen innerhalb und außerhalb der Baumlinie aufzeigen, nicht von einer Radialsymmetrie der Baumwurzeln ausgegangen werden sollte. Dies sollten zukünftige Studien in Agroforstsystemen berücksichtigen.

Ob aber das Pflügen allein für höhere Wurzellängendichten in der Baumlinie verantwortlich ist, wird durch höhere Wassergehalte in der Baumlinie in Frage gestellt. Nach Yocum (1937) und Mulia und Dupraz (2007) spielen bei der Ausbildung von induzierten räumlichen Separierungen (s. Seite 8) verringerte Wassergehalte in der Wurzelzone, die von Ackerfrüchten besiedelt wird, eine induzierende Rolle für das „Ausweichen“ der Baumwurzeln in tiefere Bodenschichten. Dies legt nahe, dass die höheren Wassergehalte in der Baumlinie die vermehrte Wurzelbildung der Bäume in diesem Bereich mitbedingen.

Im Gegensatz zu anderen agroforstlichen Studien (Malik und Sharma 1990, Moreno et al. 2005) kam es im untersuchten Agroforstsystem zu keiner signifikanten Zunahme der Wurzellängendichten der Gräser mit zunehmender Entfernung zum Baumstamm. Während die Wurzellängendichten der Bäume mit zunehmender Entfernung zum Baumstamm hochsignifikant abnahmen ($p < 0,0001$ für WLD_{BaumK} und WLD_{BaumB}), zeigten sich für die Graswurzeln nur tendenziell gegenläufige Zunahmen der Gesamt-WLD ($p = 0,8420$ für WLD_{GrasB} , $p = 0,4472$ für WLD_{GrasK}). Daraus kann geschlossen werden, dass im untersuchten Agroforstsystem, auch in Bereichen, wo größere Wurzelmassen der Bäume vorkommen, keine scharfe unterirdische Konkurrenzsituation vorliegt, die die Wurzelbildung der Gräser limitiert.

Bei Betrachtung der Veränderung von WLD_{GrasK} auf eine zunehmende Entfernung in den einzelnen Bodentiefen, zeigte sich eine tendenzielle Abnahme mit zunehmender Entfernung in den oberen Bodenschichten. Ab einer Tiefe von 40 cm kam es zu einer tendenziellen Zunahme. Insgesamt resultierte dies in der erwähnten leichten (aber nicht signifikanten) Zunahme der Wurzellängendichten. Dies zeigt an, dass es vor allem zu vertikalen Verlagerungen der Wurzelmasse der Kulturgräser kommt: In Entfernungen, wo Baumwurzeln vermehrt in größeren Tiefen vorkommen bilden die Kulturgräser einen größeren Teil ihrer Wurzelmasse in oberflächennahen Schichten aus. In Bereichen, wo Baumwurzeln nur noch vereinzelt in größeren Tiefen vorkommen, nutzen sie hingegen das gesamte Bodenvolumen, sodass in bis zu einem Meter Tiefe größere krautige Wurzelmenge vorkommen. Gerade in der tiefsten untersuchten Bodenschicht lag die Zunahme der WLDs der Kulturgräser mit zunehmender Entfernung zum Baumstamm nur knapp unter dem Signifikanzniveau ($p = 0,0531$). Schroth fasste solche Gegebenheiten in einem Review über unterirdische Interaktionen in Agroforstsystemen als Tendenz von Pflanzen auf, Wurzelkonkurrenz zu vermeiden, sodass assoziierte Pflanzenarten vertikal

stratifizierte Wurzelsysteme ausbilden (1998). Ob dies, und auch die insgesamt tendenziell erhöhten Wurzellängendichten der Kulturgräser mit zunehmender Entfernung, aber allein auf eine unterirdische Konkurrenzsituation zurückzuführen ist, bleibt offen. Wenn man den Blick von der Wurzelebene auf das gesamte Agroforstsystems erweitert, wird hier noch eine weitere Erklärung möglich. So werden die Gräser in größeren Entfernungen weniger von der Baumkrone beschattet, woraufhin mehr Energie zur Ausbildung einer höheren und tiefergehenden Wurzelmasse zur Verfügung stehen könnte (Lott 1998, Reeg et al. 2009).

Die Ausbildung von räumlich getrennten, geschichteten Wurzelsystemen der agrarischen und forstlichen Komponenten in Agroforstsystemen konnte allerdings in mehreren Studien gezeigt werden; sowohl in den Tropen (Lehmann et al. 1998), als auch in der gemäßigten Zone (Wanvestrau et al. (2004): Danach kommt es zu einer vermehrten Entwicklung von Baumwurzeln in den unteren Bodenschichten, während die Feldfrüchte eine vermehrte Wurzelentwicklung in den oberen Bodenschichten aufweisen. Dies im Vergleich zu Standorten, auf denen Bäume und Feldfrüchte jeweils alleine angepflanzt werden. Dass die Kulturgräser in der hier vorliegenden Studie in Entfernungen, wo die Wurzellängendichten der Bäume nachlassen, eine tendenziell vermehrte Wurzelentwicklung in den tieferen Bodenschicht zeigen (vgl. Grafik 6 und Tabelle 4), könnte ein Hinweis darauf sein, dass auch hier eine induzierte vertikale Trennung vorliegt bzw. dabei ist sich zu entwickeln. Damit eine solche räumliche Separierung angenommen werden kann, müssten allerdings auch die Baumwurzeln mitspielen. Die in der Kunstwiese gefundenen Baumwurzeln zeigten jedoch die höchsten Wurzellängendichten oberflächennah (vgl. Grafik 4 und 6) und wiesen zudem eine Abnahme der WLDs mit zunehmender Tiefe auf ($p < 0,0001$). Vor allem bei einer Entfernung von einem halben Kronenradius, wo das Wurzelwerk der Bäume am ausgeprägtesten ist, lassen sich jedoch unterstützende Tendenzen auf qualitativem Niveau finden: Die WLDs sind zwischen 0 und 40 cm Bodentiefe gleichmäßig hoch, nehmen dann zwischen 40 und 60 cm ab, woraufhin eine erneute Zunahme bei 60 cm folgt, die mit zunehmender Tiefe bis zu 1 m wieder abnimmt (vgl. Grafik 6). In der Baumlinie ist ein solches Verteilungsmuster nicht zu erkennen. Bei einer Bodentiefe von 60 – 70 cm zeigte sich auch der einzige signifikante Unterschied zwischen den Wurzellängendichten der Gräser: WLD_{GrasK} war hier signifikant höher als WLD_{GrasB} ($p = 0,0398$). Auch eine Studie über 14-jährige Apfelbäume in Obstplantagen zeigte ab 50 cm eine monotone Abnahme der Wurzellängendichten (Green und Clothier 1999). Dies deutet in der Kunstwiese die Ausbildung einer zweiten Wurzelschicht der Bäume in größeren Tiefen an. Dabei ist interessant, dass bei dieser Entfernung zum Baumstamm aus technischen Gründen noch nicht gepflügt werden kann, sodass der induzierende Faktor für diese Ausprägung in unterirdischen Interaktionen der Ackerfrüchte und Bäume zu liegen scheint. Die Arbeitshypothese H_1 : *Kernobstbäume und Kulturgräser wurzeln in unterschiedlichen Bodenschichten* konnte aufgrund der vorliegenden Daten allerdings weder eindeutig verifiziert noch falsifiziert werden.

4.4 Zukunftsprognose und weiterer Forschungsbedarf

Während die Baumwurzeln momentan noch sehr lückenhaft verteilt sind, ist vorauszusehen, dass sich das Wurzelnetz der Bäume in den nächsten Jahren vergrößern und verdichten wird (Gilman 1990). Dies kann den Konkurrenzdruck auf die Ackerfrüchte erhöhen, wenn keine Trennung der Wurzelsysteme erfolgt (Schroth 1995, Schroth 1998, Akkinifesi et al. 1999, Akinnifesi et al. 2004). Bislang ist eine Trennung vor allem auf horizontaler Ebene ausgebildet, was sich durch größere Wurzelmassen der Bäume in der Baumlinie und geringere Wurzelmassen der Bäume im Ackerland zeigt. Da die Baumlinie mit einer Breite von 1,40 m nur begrenzten Platz für die Ausbreitung der Baumwurzeln birgt, ist es denkbar, dass ein erweitertes Wurzelwerk der Bäume zukünftig in das Ackerland vordringen wird. Dort konnte eine vertikal stratifizierte Trennung der Wurzelsysteme ansatzweise auf qualitativem Niveau gezeigt werden.

Als äußerst interessant wird deshalb die zukünftige Entwicklung dieses noch jungen Agroforstsystems eingeschätzt. Dazu wurden die folgenden Forschungsfragen für eine weitere Untersuchung in einigen Jahren formuliert:

- Wird das Wurzelwerk der Bäume mit zunehmender Größe vermehrt in das Ackerland vordringen?
- Wird sich im Ackerfruchtfeld eine klare vertikale Schichtung der Wurzelsysteme der Bäume und Ackerfrüchte zeigen? Und wenn ja, können Kernobstbäume dabei Wurzelzonen erschließen, die die Ackerfrüchte nicht erreichen und damit die Gesamtproduktivität des Systems erhöhen?

Insbesondere für diese Untersuchung liefert die vorliegende Studie eine wertvolle Grundlage, da vertikale Verlagerungen der Wurzellängendichten der Kulturgräser von einer tatsächlichen Erschließung ungenutzter Bodenschichten durch die Bäume unterschieden werden können.

- Und nicht zuletzt, werden Kernobstbäume ohne Pfahlwurzel mit höherem Alter auch in Agroforstsystemen eine Zunahme der Wurzellängendichten mit größerer Entfernung zum Baumstamm ausbilden.

4.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen auf ökologischer und ökonomischer Ebene

Die Untersuchungen zeigten, dass Baumwurzeln signifikant höhere Wurzellängendichten innerhalb der Baumlinie, als in Richtung der Kunstwiese, ausbilden. Dies zeigt an, dass sie in diesen Bereich, ohne Bodenbearbeitung und mit höheren Wassergehalten, ausweichen und vermehrt Wachstumsressourcen aus einer Zone aufnehmen, die nicht mit den Ackerfrüchten geteilt wird. Dadurch wird Wurzelkonkurrenz zwischen den beiden Komponenten des Agroforstsystems vermieden. Dass es auf horizontaler Ebene zu keiner gegenläufigen Zunahme der WLD_{GrasK} mit abnehmender WLD_{BaumK} kam, bestätigte, dass vorkommende Baumwurzeln in der Kunstwiese

keinen schwerwiegenden kompetitiven Druck auf die Kulturgräser ausübten. Gleichsam zeigten sich erste Anzeichen für die Ausbildung einer vertikal stratifizierten Trennung der Wurzelsysteme im jungen Agroforstsystem. Somit konnten negative Einflüsse der Wurzelverteilung auf die Produktivität des Agroforstsystems auch bei flachwurzelnden Kernobstbäumen größtenteils ausgeschlossen werden. Eine Erhöhung der Gesamtproduktivität des kombinierten Systems konnte anhand von unterirdischen Faktoren allerdings nicht belegt werden, da nicht gezeigt werden konnte, dass die Baumwurzeln Bereiche erschließen, die nicht von den Kulturgräsern erreicht wurden. Die Baumlinie darf in diesem Fall nicht berücksichtigt werden, da diese in getrennten Systemen keine ackerfruchtfreie Fläche darstellen würde. Es wird vorgeschlagen in den nächsten Jahren eine erneute Untersuchung durchzuführen, wenn die Bäume das Potential haben größere Tiefen unterhalb der Ackerfruchtwurzelzone zu erschließen, um diesen Sachverhalt abschließend klären zu können.

Ein Ausbleiben einer negativen Beeinflussung der Produktivität im Agroforstsystem kann angesichts der zahlreichen Vorteile, die Agroforstsysteme bergen, allerdings schon positiv bewertet werden. So hat das kombinierte System das Potential Vorteile, wie den Schutz vor Wind- und Wassererosion, einer reduzierten Evaporation des Bodens, einer erhöhten Bodenfruchtbarkeit und Biodiversität sowie einer vermehrten Bindung von Kohlenstoff, auszuschöpfen, während die Produktivität hinsichtlich unterirdischer Einflussfaktoren nicht beeinträchtigt wird. Hierbei ist zu beachten, dass die Vorteile sowohl dem Umwelt- und Naturschutz, als auch den Landnutzern zugutekommen.

5. Literaturverzeichnis

Internetquellen:

MeteoSchweiz (2016): <http://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/vergangenheit/klimanormwerte/klimadiagramme-und-normwerte-pro-station.html?region=Tabelle>, abgerufen am 21.07.16

Niwa (2016): <https://www.niwa.co.nz/education-and-training/schools/resources/climate/overview>, abgerufen am 08.09.2016.

Publikationen

Akinnifesi, F. K., E. C. Rowe, S. J. Livesley, F. R. Kwesiga, B. Vanlauwe und J. C. Alegre (2004). "Tree Root Architecture." pp 61-82. In: Van Noordwikk, M., C. Cadish und C. K. Ong (eds.), Below-ground Interactions in Tropical Agroecosystems: Concepts and Models with Multiple Plant Components. CAB International, Wallingford, UK.

Atkinson, D. (1980). "The distribution and effectiveness of the roots of tree crops." Horticultural reviews(2) 424-490.

Baldwin, J., P. Tinker und F. Marriott (1971). "The measurement of length and distribution of onion roots in the field and the laboratory." Journal of applied ecology: 543-554.

Batish, D. R., R. K. Kohli, S. Jose und H. P. Singh (2007). Ecological basis of agroforestry, CRC Press, Boca Raton, FL.

Bellow, J. und P. Nair (2003). "Comparing common methods for assessing understory light availability in shaded-perennial agroforestry systems." Agricultural and forest meteorology **114**(3): 197-211.

Bird, P. (1998). "Tree windbreaks and shelter benefits to pasture in temperate grazing systems." Agroforestry systems **41**(1): 35-54.

Blume, H.-P., G. W. Brümmer, R. Horn, E. Kandeler, I. Kögel-Knabner, R. Kretschmar, K. Stahr und B.-M. Wilke (2009). Scheffer/Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde, Springer-Verlag.

Borden, K. A., S. C. Thomas und M. E. Isaac (2016). "Interspecific variation of tree root architecture in a temperate agroforestry system characterized using ground-penetrating radar." Plant and Soil: 1-12.

Bosshard, H. H. (2013). Holzkunde: Band 2 Zur Biologie, Physik und Chemie des Holzes, Springer-Verlag.

- Bouma, J., G. Varallyay und N. Batjes (1998). "Principal land use changes anticipated in Europe." Agriculture, Ecosystems & Environment **67**(2): 103-119.
- Brix, M., B. Bender, A. Chalmin, J. Hampel, C. Heindorf, F. Hohlfeld, S. Jäger, W. Konold, U. Kretschmer und G. Mathiak (2009). "Neue Optionen für eine nachhaltige Landnutzung–Schlussbericht des Projektes agroforst." Accès: [http://www. agroforst. uni-freiburg. de/ergebnisse. php](http://www.agroforst.uni-freiburg.de/ergebnisse.php) [24.08. 2011].
- Bundesamt für Statistik/Eidgenössische Alkoholverwaltung (1993). „Schweizerische Obstbaumzählung: Der Obstbau in der Schweiz (Feldobstbau/Obstkulturen).“ Bern, Land- und Forstwirtschaft: 7, 220 pp.
- Burgess, P., I. Seymour, L. Incoll, D. Corry, B. Hart, A. Beaton, S. Cook, W. Cormack, M. Green und J. Holland (2000). "The application of silvoarable agroforestry in the UK." Aspects of Applied Biology(62): 269-276.
- Burgess, P. J. (1999). "Effects of agroforestry on farm biodiversity in the UK." Scottish Forestry **53**(1): 24-27.
- Burgess, S. S., M. A. Adams, N. C. Turner und C. K. Ong (1998). "The redistribution of soil water by tree root systems." Oecologia **115**(3): 306-311.
- Bürgi, M. und M. Stuber (2003). "Agrarische Waldnutzungen in der Schweiz 1800-1950. Waldfeldbau, Waldfrüchte und Harz| Agricultural use of forests in Switzerland 1800-1950. Field crops and forestry in alternation, forest fruits and resin." Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen **154**(9): 360-375.
- Buwalda, J. (1993). "The carbon costs of root systems of perennial fruit crops." Environmental and experimental botany **33**(1): 131-140.
- Cahill, J. F., G. G. McNickle, J. J. Haag, E. G. Lamb, S. M. Nyanumba und C. C. S. Clair (2010). "Plants integrate information about nutrients and neighbors." Science **328**(5986): 1657-1657.
- Canadell, J., R. Jackson, J. Ehleringer, H. Mooney, O. Sala und E.-D. Schulze (1996). "Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale." Oecologia **108**(4): 583-595.
- Cannell, M., M. Van Noordwijk und C. K. Ong (1996). "The central agroforestry hypothesis: the trees must acquire resources that the crop would not otherwise acquire." Agroforestry systems **34**(1): 27-31.
- Casper, B. B. und R. B. Jackson (1997). "Plant competition underground." Annual review of ecology and systematics: 545-570.
- Chalmin, A. und L. Augustenberg (2008). "Agroforstsysteme in Deutschland." Landinfo **7**: 1-7.
- Coile, T. (1937). "Distribution of forest tree roots in North Carolina Piedmont soils." Journal of Forestry **35**(3): 247-257.

- Comerford, N., G. Kidder und A. Mollitor (1983). Importance of subsoil fertility to forest and non-forest plant nutrition. 6. North American Forest Soils Conference, Knoxville (USA), Jun 1983, Dept. of Forestry.
- Cresswell, H. und G. Hamilton (2002). "Particle size analysis." Soil physical measurement and interpretation for land evaluation. CSIRO Publishing, Collingwood.
- Crush, J., J. Waller und D. Care (2005). "Root distribution and nitrate interception in eleven temperate forage grasses." Grass and Forage Science **60**(4): 385-392.
- Cuthbertson, A. und J. McAdam (1996). The effect of tree density and species on carabid beetles in a range of pasture-tree agroforestry systems on a lowland site. Agroforestry Forum **7**(3): 14-17.
- Dawson, L., E. Duff, C. Campbell und D. Hirst (2001). "Depth distribution of cherry (*Prunus avium* L.) tree roots as influenced by grass root competition." Plant and soil **231**(1): 11-19.
- Dawson, T. E. (1993). "Hydraulic lift and water use by plants: implications for water balance, performance and plant-plant interactions." Oecologia **95**(4): 565-574.
- De Silva, H., A. Hall, D. Tustin und P. Gandar (1999). "Analysis of distribution of root length density of apple trees on different dwarfing rootstocks." Annals of Botany **83**(4): 335-345.
- Dennis, P., L. Shellard und R. Agnew (1996). "Shifts in arthropod species assemblages in relation to silvopastoral establishment in upland pastures". Agroforestry Forum **7**(3): 14-21
- Deru, J., N. Van Eekeren und H. De Boer (2012). "Rooting density of three grass species and eight *Lolium perenne* cultivars." Grassland Science in Europe **17**: 604-606.
- Drew, M. und L. Saker (1980). "Assessment of a rapid method, using soil cores, for estimating the amount and distribution of crop roots in the field." Plant and Soil **55**(2): 297-305.
- Droppelmann, K., J. Ephrath und P. Berliner (2000). "Tree/crop complementarity in an arid zone runoff agroforestry system in northern Kenya." Agroforestry Systems **50**(1): 1-16.
- Eichwalder, R (1990). „Obstbäume und Obststräucher im Besitz von Privathaushalten.“ Stat Nachr **45**(6): 364-373.
- Eleki, K., R. M. Cruse und K. A. Albrecht (2005). "Root segregation of C3 and C4 species using carbon isotope composition." Crop science **45**(3): 879-882.
- Evans, P. S. (1977). "Comparative root morphology of some pasture grasses and clovers." New Zealand journal of agricultural research **20**(3): 331-335.
- Ewald, K. C. und G. Klaus (2009). Die ausgewechselte Landschaft: Vom Umgang der Schweiz mit ihrer wichtigsten natürlichen Ressource, Haupt, Bern.
- Fernandez, R. T., R. L. Perry und D. C. Ferree (1995). "Root distribution patterns of nine apple

rootstock in two contrasting soil types." Journal of the American Society for Horticultural Science **120**(1): 6-13.

Ferrier, R. C. und I. J. Alexander (1991). "Internal redistribution of N in Sitka spruce seedlings with partly droughted root systems." Forest science **37**(3): 860-870.

Gale, M. und D. Grigal (1987). "Vertical root distributions of northern tree species in relation to successional status." Canadian Journal of Forest Research **17**(8): 829-834.

Gandar, P. und K. Hughes (1988). "Kiwifruit root systems 1. Root-length densities." New Zealand journal of experimental agriculture **16**(1): 35-46.

Gilman, E. F. (1990). "Tree root growth and development. I. Form, spread, depth and periodicity." Journal of Environmental Horticulture **8**(4): 215-220.

Gisi, U. (1997). Bodenökologie, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 304 pp.

Graves, A., R. Matthews und K. Waldie (2004). "Low external input technologies for livelihood improvement in subsistence agriculture." Advances in Agronomy **82**: 473-555.

Green, S. und B. Clothier (1999). "The root zone dynamics of water uptake by a mature apple tree." Plant and Soil **206**(1): 61-77.

Grime, J. P. (1973). "Competitive exclusion in herbaceous vegetation." Nature, UK **242**(5396): 344-347.

Hall, B. E. (1999). "Competitive Exclusion." Animal Sciences: **9**: 175.

Herzog, F. (1998). "Streuobst: a traditional agroforestry system as a model for agroforestry development in temperate Europe." Agroforestry systems **42**(1): 61-80.

Hughes, K. und P. Gandar (1993). "Length densities, occupancies and weights of apple root systems." Plant and soil **148**(2): 211-221.

Hulugalle, N. und R. Lal (1986). "Root growth of maize in a compacted gravelly tropical alfisol as affected by rotation with a woody perennial." Field Crops Research **13**: 33-44.

Huxley, P. A. (1983). Some characteristics of trees to be considered in agroforestry. A Consultative Meeting on Plant Research and Agroforestry, Nairobi (Kenya), 8-15 Apr 1981, ICRAF.

Isaac, M. E., L. C. Anglaaere, K. Borden und S. Adu-Bredu (2014). "Intraspecific root plasticity in agroforestry systems across edaphic conditions." Agriculture, Ecosystems & Environment **185**: 16-23.

Jackson, R., J. Canadell, J. R. Ehleringer, H. Mooney, O. Sala und E. Schulze (1996). "A global analysis of root distributions for terrestrial biomes." Oecologia **108**(3): 389-411.

- Jobbágy, E. G. und R. B. Jackson (2000). "The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation." Ecological applications **10**(2): 423-436.
- Jobbágy, E. G. und R. B. Jackson (2001). "The distribution of soil nutrients with depth: global patterns and the imprint of plants." Biogeochemistry **53**(1): 51-77.
- Jose, S. (2009). "Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview." Agroforestry systems **76**(1): 1-10.
- Jose, S., A. Gillespie, J. Seifert und P. Pope (2001). "Comparison of minirhizotron and soil core methods for quantifying root biomass in a temperate alley cropping system." Agroforestry Systems **52**(2): 161-168.
- Kang, B., A. Van der Kruijs und D. Couper (1989). "Alley cropping for food crop production in the humid and subhumid tropics." Alley farming in the humid and subhumid tropics: 16-26.
- Kirby, K. R. und C. Potvin (2007). "Variation in carbon storage among tree species: implications for the management of a small-scale carbon sink project." Forest Ecology and Management **246**(2): 208-221.
- Kolesnikov, V. A. (1971). "The root system of fruit plants." MIR Publishers, Moscow.
- Körner, C. (2013). Basics of Plant Ecology. Strasburger's Plant Sciences, Springer: 1043-1064.
- Kreutz, W. (1961). "Die ertragssteigernde Wirkungen von Windschutzpflanzungen." AFZ Der Wald **31**: 458-459.
- Kristensen, H. L. und K. Thorup-Kristensen (2004). "Root growth and nitrate uptake of three different catch crops in deep soil layers." Soil Science Society of America Journal **68**(2): 529-537.
- Kumar, B. und P. Nair (2006). "Tropical Homegardens: A Time-Tested Example of Sustainable Agroforestry." Homegardens of Mesoamerica: biodiversity, food security, and nutrient management: 61-84.
- Küster, H. (1996). Geschichte der Landschaft in Mitteleuropa von der Eiszeit bis zur Gegenwart. München, C. H. Beck: 424.
- Lambrechts, T., G. Lequeue, G. Lobet, B. Godin, C. L. Biielders und S. Lutts (2014). "Comparative analysis of Cd and Zn impacts on root distribution and morphology of *Lolium perenne* and *Trifolium repens*: implications for phytostabilization." Plant and soil **376**(1-2): 229-244.
- Lehmann, J., I. Peter, C. Steglich, G. Gebauer, B. Huwe und W. Zech (1998). "Below-ground interactions in dryland agroforestry." Forest Ecology and Management **111**(2): 157-169.
- Lin, C., R. McGraw, M. George und H. Garrett (1998). "Shade effects on forage crops with potential in temperate agroforestry practices." Agroforestry systems **44**(2-3): 109-119.

- Lin, W., Y. Okon und R. W. Hardy (1983). "Enhanced mineral uptake by Zea mays and Sorghum bicolor roots inoculated with Azospirillum brasilense." Applied and Environmental Microbiology **45**(6): 1775-1779.
- Livesley, S., P. Gregory und R. Buresh (2000). "Competition in tree row agroforestry systems. 1. Distribution and dynamics of fine root length and biomass." Plant and Soil **227**(1-2): 149-161.
- Lott, J. E. (1998). Resource capture and use in semi-arid overstorey agroforestry systems, Diss. University of Nottingham, 1998.
- Luick, R. und W. Vonhoff (2009). "Wertholzpflanzungen - Das Thema Agroforstsysteme in moderner Inszenierung." Naturschutz und Landschaftsplanung **41**(2): 47-52.
- Lundgren, B. und J. Raintree (1982). Sustained Agroforestry. In Nestel, B. (ed) Agricultural Research for Development: Potentials and Challenges in Asia, pp 37-49. ISNAR, The Hague.
- Malik, R. und S. Sharma (1990). "Moisture extraction and crop yield as a function of distance from a row of Eucalyptus tereticornis." Agroforestry Systems **12**(2): 187-195.
- Mao, Z., L. Saint-André, F. Bourrier, A. Stokes und T. Cordonnier (2015). "Modelling and predicting the spatial distribution of tree root density in heterogeneous forest ecosystems." Annals of botany **116**(2): 261-277.
- Mary, F., C. Dupraz, E. Delannoy und F. Liagre (1998). "Incorporating agroforestry practices in the management of walnut plantations in Dauphiné, France: an analysis of farmers 'motivations." Agroforestry Systems **43**(1-3): 243-256.
- McAdam, J., P. Burgess, A. Graves, A. Rigueiro-Rodríguez und M. Mosquera-Losada (2009). Classifications and functions of agroforestry systems in Europe. Agroforestry in Europe, Springer: 21-41.
- McAdam, J. und P. McEvoy (2009). The potential for silvopastoralism to enhance biodiversity on grassland farms in Ireland. Agroforestry in Europe, Springer: 343-356.
- Mcadam, J., A. Sibbald, Z. Teklehaimanot und W. R. Eason (2007). "Developing silvopastoral systems and their effects on diversity of fauna." Agroforestry Systems **70**(1): 81-89.
- Mchowa, J. und D. Ngugi (1994). "Pest complex in agroforestry systems: the Malawi experience." Forest Ecology and Management **64**(2-3): 277-284.
- McKenzie, N., D. Jacquier, R. Isbell und K. Brown (2004). Australian Soils and Landscapes: An Illustrated Compendium, CSIRO publishing, Melbourne.
- Mermut, A. und H. Eswaran (2001). "Some major developments in soil science since the mid-1960s." Geoderma **100**(3): 403-426.

- Miah, M. G., D. P. Garrity und M. L. Aragon (1995). "Light availability to the understorey annual crops in an agroforestry system." Ecophysiology of tropical intercropping systems. INRA, Paris: 99-107.
- Mobbs, D., G. Lawson, A. Friend, N. Croust, J. Arah und M. Hodnett (1999). "HyPAR: Model for agroforestry systems." Technical manual. Model description for version 3: 44-45.
- Molyneux, D. und W. Davies (1983). "Rooting pattern and water relations of three pasture grasses growing in drying soil." Oecologia **58**(2): 220-224.
- Moreno, G., J. Obrador, E. Cubera und C. Dupraz (2005). "Fine root distribution in dehesas of central-western Spain." Plant and Soil **277**(1-2): 153-162.
- Mulia, R. und C. Dupraz (2006). "Unusual fine root distributions of two deciduous tree species in southern France: What consequences for modelling of tree root dynamics?" Plant and Soil **281**(1-2): 71-85.
- Nair, P. R. (1993). An introduction to agroforestry, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 499 pp.
- Nambiar, E. S. (1987). "Do nutrients retranslocate from fine roots?" Canadian Journal of Forest Research **17**(8): 913-918.
- Ong, C., J. Corlett, R. Singh und C. Black (1991). "Above and below ground interactions in agroforestry systems." Forest Ecology and Management **45**(1): 45-57.
- Ong, C., J. Deans, J. Wilson, J. Mutua, A. Khan und E. Lawson (1999). "Exploring below ground complementarity in agroforestry using sap flow and root fractal techniques." Agroforestry systems **44**(1): 89-106.
- Palang, H. und G. Fry (2013). Landscape interfaces: cultural heritage in changing landscapes, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 231 pp.
- Pallardy, S. G. (2010). Physiology of woody plants, Academic Press, San Diego, USA, 390 pp.
- Palma, J. H., A. R. Graves, R. Bunce, P. J. Burgess, R. De Filippi, K. Keesman, H. van Keulen, F. Liagre, M. Mayus und G. Moreno (2007). "Modeling environmental benefits of silvoarable agroforestry in Europe." Agriculture, ecosystems & environment **119**(3): 320-334.
- Pearson, C. und B. Jacobs (1985). "Root distribution in space and time in *Trifolium subterraneum*." Crop and Pasture Science **36**(4): 601-614.
- Peng, R., L. Incoll, S. Sutton, C. Wright und A. Chadwick (1993). "Diversity of airborne arthropods in a silvoarable agroforestry system." Journal of Applied Ecology: 551-562.
- Plieninger, T., F. J. Pulido und W. Konold (2003). "Effects of land-use history on size structure of holm oak stands in Spanish dehesas: implications for conservation and restoration." Environmental

Conservation **30**(01): 61-70.

Reeg, T., M. Oelke, W. Konold (2009). Moderne Agroforstsysteme in Deutschland: Naturschutzfachliche Bewertung, Akzeptanz, historische Hintergründe und Auswirkungen auf das Landschaftsbild. Schlussbericht des Projektes Agroforst – Neue Optionen für eine nachhaltige Landnutzung, Teilprojekt Landespflege. Institut für Landespflege der Universität Freiburg.

Rizvi, S., M. Tahir, V. Rizvi, R. Kohli und A. Ansari (1999). "Allelopathic interactions in agroforestry systems." Critical Reviews in Plant Sciences **18**(6): 773-796.

Rogers, W. (1933). "Root Studies: IE. Pear, Gooseberry and Black Currant Root Systems Under Different Soil Fertility Conditions, with Some Observations on Root Stock and Scion Effect in Pears." Journal of Pomology and Horticultural Science **11**(1): 1-18.

Rogers, W. und G. Booth (1960). "The roots of fruit trees." Scientific Horticulture **14**: 27-34.

Rogers, W. und M. Vyvyan (1934). "Root Studies: V. Rootstock and Soil Effect on Apple Root Systems." Journal of Pomology and Horticultural Science **12**(2): 110-150.

Schroth, G. (1995). Tree root characteristics as criteria for species selection and systems design in agroforestry. Agroforestry: Science, Policy and Practice, Springer: 125-143.

Schroth, G. (1998). "A review of belowground interactions in agroforestry, focussing on mechanisms and management options." Agroforestry systems **43**(1-3): 5-34.

Schroth, G. und W. Zech (1995). "Root length dynamics in agroforestry with *Gliricidia sepium* as compared to sole cropping in the semi-deciduous rainforest zone of West Africa." Plant and Soil **170**(2): 297-306.

Sereke, F., A. R. Graves, D. Dux, J. H. Palma und F. Herzog (2015). "Innovative agroecosystem goods and services: key profitability drivers in Swiss agroforestry." Agronomy for Sustainable Development **35**(2): 759-770.

Sharrow, S. und S. Ismail (2004). "Carbon and nitrogen storage in agroforests, tree plantations, and pastures in western Oregon, USA." Agroforestry Systems **60**(2): 123-130.

Smit, A. L., A. G. Bengough, C. Engels, M. van Noordwijk, S. Pellerin und S. van de Geijn (2013). Root methods: a handbook, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 211-233.

Smith, D., N. Jackson, J. Roberts und C. Ong (1999). "Root distributions in a *Grevillea robusta*-maize agroforestry system in semi-arid Kenya." Plant and Soil **211**(2): 191-205.

Söderström, B., B. Svensson, K. Vessby und A. Glimskär (2001). "Plants, insects and birds in semi-natural pastures in relation to local habitat and landscape factors." Biodiversity & Conservation **10**(11): 1839-1863.

- Sokal, R. und F. Rohlf (1995). "Biometry (3rd edn)." WH Freeman and company: New York.
- Sposito, G. (2008). The chemistry of soils, Oxford university press.
- Stone, E. L. und P. J. Kalisz (1991). "On the maximum extent of tree roots." Forest Ecology and Management **46**(1-2): 59-102.
- Sutton, R. und R. W. Tinus (1983). "Root and root system terminology." Forest Science **29**(24): 77-89.
- Thorup-Kristensen, K. (2001). "Are differences in root growth of nitrogen catch crops important for their ability to reduce soil nitrate-N content, and how can this be measured?" Plant and Soil **230**(2): 185-195.
- Tilman, D. (1985). "The resource-ratio hypothesis of plant succession." American Naturalist: 827-852.
- Tilman, D. und J. Grace (1990). "Mechanisms of plant competition for nutrients: the elements of a predictive theory of competition." Perspectives on plant competition: 117-141.
- Unsel, R., N. Reppin, K. Eckstein, W. Zehlius-Eckert, H. Hoffmann und T. Huber (2011). "Leitfaden Agroforstsysteme - Möglichkeiten zur naturschutzgerechten Etablierung von Agroforstsystemen." Bundesamt für Naturschutz, Munich, Germany.
- van der Werf, W., K. Keesman, P. Burgess, A. Graves, D. Pilbeam, L. Incoll, K. Metselaar, M. Mayus, R. Stappers und H. van Keulen (2007). "Yield-SAFE: a parameter-sparse, process-based dynamic model for predicting resource capture, growth, and production in agroforestry systems." Ecological engineering **29**(4): 419-433.
- van Noordwijk, M., G. Brouwer, F. Meijboom, M. d. R. G. Oliveira und A. Bengough (2001). Trench profile techniques and core break methods. Root methods, Springer: 211-233.
- van Noordwijk, M. und K. Hairiah (2000). "Tree-soil-crop interactions." International Centre for Research in Agroforestry (ICRAF), Bogor, Indonesia.
- van Noordwijk, M., K. Hairiah, S. Ms, E. Flach, B. McMichael und H. Persson (1991a). "Peltophorum pterocarpa (DC) Back (Caesalpiniaceae), a tree with a root distribution suitable for alley cropping on acid soils in the humid tropics." Plant roots and their environment.: 526-532.
- Van Noordwijk, M. und B. Lusiana (2000). "WaNuLCAS Version 2.0, Background on a Model of Water Nutrient and Light Capture in Agroforestry Systems." International Centre for Research in Agroforestry ICRAF, Bogor, Indonesia.
- Van Noordwijk, M., M. Heinen und K. Hairiah (1991b). "Old tree root channels in acid soils in the humid tropics: important for crop root penetration, water infiltration and nitrogen management." Plant and Soil **134**(1): 37-44.

- Van Noordwijk, M. und P. Purnomosidhi (1995). Root architecture in relation to tree-soil-crop interactions and shoot pruning in agroforestry. Agroforestry: Science, Policy and Practice, Springer: 161-173.
- Volaire, F. und H. Thomas (1995). "Effects of drought on water relations, mineral uptake, water-soluble carbohydrate accumulation and survival of two contrasting populations of cocksfoot (*Dactylis glomerata* L.)." Annals of Botany **75**(5): 513-524.
- Wanvestraut, R. H., S. Jose, P. R. Nair und B. J. Brecke (2004). "Competition for water in a pecan (*Carya illinoensis* K. Koch)–cotton (*Gossypium hirsutum* L.) alley cropping system in the southern United States." Agroforestry Systems **60**(2): 167-179.
- Ye, X., X. Wu, H. Zhao, M. Frehner, J. Nösberger, I. Potrykus und G. Spangenberg (2001). "Altered fructan accumulation in transgenic *Lolium multiflorum* plants expressing a *Bacillus subtilis* sacB gene." Plant Cell Reports **20**(3): 205-212.
- Yocum, W. W. (1937). "Root development of young delicious apple trees as affected by soils and by cultural treatments." Historical Materials from University of Nebraska-Lincoln Extension: 910.
- Yu, Y., W. Loiskandl, H.-P. Kaul, M. Himmelbauer, W. Wei, L. Chen und G. Bodner (2016). "Estimation of runoff mitigation by morphologically different cover crop root systems." Journal of Hydrology **538**: 667-676.
- Zhang, W., P. Ahanbieke, B. Wang, Y. Gan, L. Li, P. Christie und L. Li (2015). "Temporal and spatial distribution of roots as affected by interspecific interactions in a young walnut/wheat alley cropping system in northwest China." Agroforestry Systems **89**(2): 327-343.

6. Anhang

Zusammenfassung

Agroforstsysteme stellen eine traditionelle Bewirtschaftungsform dar, die landwirtschaftliche und forstlichen Elementen auf einer Fläche kombiniert. Momentan erhalten solche Systeme auch hierzulande aufgrund ihres hohen ökologischen und ökonomischen Potentials vermehrte Aufmerksamkeit. Da insbesondere unterirdische Interaktionen bzw. Konkurrenzen als wichtige Einflussfaktoren gelten, bis heute jedoch einem Mangel an Informationen unterliegen, wurde in dieser Studie ein 8-jähriges Alley Cropping Agroforstsystem in der Schweiz untersucht. Dieses System integriert Kernobstbäume in Baumreihen (*Malus domestica*, *Pyrus pyrastra*) mit dazwischenliegenden Ackerstreifen, auf denen zum Untersuchungszeitpunkt eine Futtermischung (*Lolium multiflorum*, *Trifolium alexandrinum*, *Trifolium resupinatum*) angebaut wurde. Beide Komponenten (Bäume, Futtermischung) wurden hinsichtlich ihrer Wurzelverteilung untersucht, um Wurzelkonkurrenz und Komplementarität in der Ressourcennutzung bewerten zu können. Dabei wurde auch erforscht, ob sich die Wurzelverteilung der Baumwurzeln innerhalb und außerhalb der Baumreihen unterscheidet. Um potentielle Einflüsse der jeweils assoziierten krautigen Komponente mitbewerten zu können, wurden auch die natürlich vorkommenden Gräser innerhalb der Baumreihe untersucht.

Methodisch wurden dazu 1 m tiefe Bodenproben entlang eines Transekts von der Baumreihe bis zu einem dreifachen Kronenradius in verschiedenen Orientierungen entnommen. Die Wurzellängendichten (WLD) der krautigen und holzigen Arten wurden mittels soil core-break Methode bestimmt. Weiterhin konnten Wassergehalte und Lagerungsdichten der Bodenproben bestimmt werden, um einen Einfluss auf die WLD zu untersuchen.

Sowohl die krautigen Pflanzen als auch die Bäume wurzelten in bis zu einem Meter Tiefe. Die höchsten WLD-Werte wurden in allen Fällen in oberflächennahen Bereichen gefunden, wobei die der Gräser mengenmäßig weit über denen der Bäume lagen. Es zeigte sich eine signifikant höhere WLD der Baumwurzeln innerhalb der Baumlinie, was einen engen Zusammenhang mit verringerten Wassergehalten und Bodenbearbeitung im Ackerstreifen aufwies. Die dadurch limitierte Überlappung der Wurzelzonen der Bäume und Kulturgräser weist auf eine geringe Konkurrenz um unterirdische Wachstumsfaktoren hin. Baumwurzeln zeigten außerdem signifikant verringerte WLD-Werte mit zunehmender Entfernung zum Baumstamm, die Kulturgräser aber keine gegenläufig signifikant erhöhten Werte. Dies zeigte an, dass die vorkommenden Baumwurzeln in der Kulturwiese keinen schwerwiegenden kompetitiven Einfluss auf die Kulturgräser ausübten. Des Weiteren konnten im Bereich des Ackerlandstreifens erste qualitative Anzeichen für die Ausbildung einer vertikal stratifizierten Trennung der Wurzelsysteme der Bäume und Kulturgräser gefunden werden. Hinweise auf eine Komplementarität in der unterirdischen Ressourcennutzung, die zu einer erhöhten Gesamtproduktivität des Systems führen könnte, wurden nicht gefunden.

Abstract

Agroforestry is a traditional land use management system that combines agricultural and forestal components. Nowadays such systems gain attention due to high ecological and economic capability (hierzulande). While belowground interactions represent important drivers there is still a lack of underlying information. To counter this, this study investigated an 8-year old alley cropping agroforestry system in Switzerland. This system integrates rows of pomaceous trees (*Malus domestica*, *Pyrus pyraeaster*) with alleys of arable land, which are cropped with herbaceous plants for fodder (*Lolium multiflorum*, *Trifolium alexandrinum*, *Trifolium resupinatum*). Root distribution of both elements was studied in order to evaluate root competition and complementary in the use of resources. Root distribution of trees was also investigated concerning differences within tree row and in the cropped alley. Investigating native herbaceous plants within tree row allowed assessing possible influence of different associated herbaceous plants.

For that purpose soil samples were obtained by soil-coring down to 1 m depth, along a transect up to a threefold canopy radius at several orientations to the tree trunk. Root length density (RLD) of herbaceous plants and trees was measured using the soil core-break method. Additionally, bulk density and soil water content were identified to investigate influence on RLD.

Herbaceous plants as well as trees rooted up to 1 m depth. RLD was highest in the upper soil areas for all plants, whereas trees showed a much lower RLD than herbaceous plants. Tree RLD was significantly higher within the tree row, what was attributed to lower soil water content and tillage in the cropped alleys. Tree RLD also decreased significantly with increasing distance to the tree trunk, however herbaceous plants RLD didn't show an opposing increase in RLD. This indicated that tree roots in the cropped alleys didn't have a severe competitive effect on crops. Furthermore, there were first signs for a development of a vertically stratified separation of tree's and crops' root systems. The limited overlap of root distribution for trees and crops suggests low competition for soil resources. However, signs for complementary use of resources that allows higher productivity of the system could not be found.