



lfz  
raumberg  
gumpenstein

Lehr- und Forschungszentrum  
Landwirtschaft  
[www.raumberg-gumpenstein.at](http://www.raumberg-gumpenstein.at)

# 1. Tagung der Österreichischen Gesellschaft für Wurzelforschung

Pflanzenwurzel im System Boden-  
Pflanze-Atmosphäre

Plant roots in the Soil-Plant-  
Atmosphere system

am 13. und 14. September 2011

Organisiert von:  
Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft  
Raumberg-Gumpenstein  
Österreichische Gesellschaft für Wurzelforschung



[lebensministerium.at](http://lebensministerium.at)

[www.raumberg-gumpenstein.at](http://www.raumberg-gumpenstein.at)

# **BERICHT**

## **1. Tagung der Österreichischen Gesellschaft für Wurzelforschung**

am 13. und 14. September 2011  
am LFZ Raumberg-Gumpenstein

### ***Organisation***

- Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein (LFZ)
- Österreichische Gesellschaft für Wurzelforschung

## **Impressum**

### *Herausgeber*

Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft  
Raumberg-Gumpenstein, A-8952 Irdning  
des Bundesministeriums für Land- und  
Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft

### *Direktor*

HR Mag. Dr. Albert Sonnleitner

### *Für den Inhalt verantwortlich*

die Autoren

### *Redaktion*

Brigitte Marold

### *Druck, Verlag und © 2011*

Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft  
Raumberg-Gumpenstein, A-8952 Irdning  
ISBN-13: 978-3-902559-63-0  
ISSN: 1818-7722

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorstellung - Österreichische Gesellschaft für Wurzelforschung Austrian Society Root Research (ASRR).</b> .....	5
W. LOISKANDL	
<b>Mögliche Beziehungen zwischen der P-Erschließung in der Rhizosphäre und der Pflanzenverfügbarkeit des Phosphats im Boden.</b> .....	9
W. MERBACH, A. DEUBEL und S. RUPPEL	
<b>Wurzelmethoden für die Pflanzenzüchtung.</b> .....	19
S. KUTSCHKA, D. SCHUHWERK, A. NAKHFOROOSH, H. GRAUSGRUBER, H.-P. KAUL, W. LOISKANDL und G. BODNER	
<b>Root architecture modelling in heterogeneous soils - Describing root responses using a dynamic root architecture model.</b> .....	25
D. LEITNER und A. SCHNEPF	
<b>Unterschiedliche Klimaeinflüsse auf das Wurzel/Sprossverhältnis, die Wurzelmorphologie und Anatomie einiger Apiaceen.</b> .....	29
M. SOBOTIK	
<b>Einfluss einer Nutzungsintensivierung auf Wurzelmasse und Wurzelverteilung im Grünlandboden.</b> .....	35
A. BOHNER und M. HERNDL	
<b>Wurzelparameter von Gräsern, Kräutern und Leguminosen als Grundlage zur Bewertung von Trockenheitstoleranz im Grünland.</b> .....	45
M. HERNDL, M. KANDOLF, A. BOHNER, B. KRAUTZER, W. GRAISS und M. SCHINK	
<b>Effects of pathogenic and symbiotic fungi on root exudation of tomato in intercropping systems.</b> .....	55
K. HAGE-AHMED, V. CHOBOT, A. VOGLGRUBER, F. HADACEK und S. STEINKELLNER	
<b>Application of DNA sequence based taxon identification to the study of root associated fungal communities.</b> ...	57
A. URBAN	
<b>Modelling the effect of arbuscular mycorrhizal fungi on plant phosphate uptake.</b> .....	61
A. SCHNEPF und D. LEITNER	
<b>Drought and root system size of barley and wheat.</b> .....	65
T. STREDA, V. DOSTÁL, V. HORÁKOVÁ und O. CHLOUPEK	
<b>Wurzeleigenschaften von Zwischenfrüchten und ihre agroökologische Funktion.</b> .....	67
G. BODNER, A. KASTELLIZ, P. LIEBHARD, W. LOISKANDL, M. HIMMELBAUER und H.-P. KAUL	
<b>Untersuchungen zum Bodenwasserhaushalt und zur Durchwurzelung unter einem Gehölzbestand (<i>Salix purpurea</i> L.) im Vergleich zu einer Gräser-Kräuter-Narbe.</b> .....	75
W. LAMMERANNER und M. OBRIEJETAN	
<b>A split-root system to study biochar effects on root growth, root distribution and assimilate translocation.</b> .....	83
G. SOJA und B. WIMMER	
<b><i>Thlaspi goesingense</i> Hálácsy root plasticity in serpentine soils contradicts the metal foraging behavior.</b> .....	85
I. LANGER, P. RIEDMANN, M. PUSCHENREITER und W.W. WENZEL	
<b>Wasseraufnahme im Wurzelbereich junger Weinreben.</b> .....	89
R. NOLZ und P. CEPUDER	
<b>Einfluss des Wurzelsystems auf den Bodenwasserhaushalt ackerbaulich genutzter Flächen.</b> .....	93
P. SCHOLL, G. BODNER, A. SCHWEN, W. LOISKANDL und H.-P. KAUL	

<b>Root growth of turfgrass grown on amended sand-based profiles. ....</b>	<b>97</b>
M. HIMMELBAUER, I. KOGELBAUER und W. LOISKANDL	
<b>Reaktionen des Wurzelsystems auf bodenphysikalische Bedingungen. ....</b>	<b>105</b>
M. HIMMELBAUER, M. SOBOTIK und W. LOISKANDL	
<b>Assessment of root interactions between linseeds and legumes in mixtures. ....</b>	<b>113</b>
A. KLIMEK-KOPYRA, B. KULIG, T. ZAJAC und A. OLEKSY	

# Vorwort

Die Forschung im Bereich Pflanzenwurzeln hat in Österreich, vor allem durch die Arbeiten von Frau Univ. Prof. Dr. Lore Kutschera und Frau Dr. Monika Sobotik, beide AbteilungsleiterInnen am LFZ Raumberg-Gumpenstein, lange Tradition. Die Beschäftigung mit Pflanzenwurzeln und dessen Einfluss auf Boden und Pflanze ist auch heute ein Forschungsgebiet, das einen entscheidenden Beitrag zur Bewältigung wichtiger ökologischer Probleme leisten kann. Zukünftige gesellschaftliche Herausforderungen wie Wassermangel, Bodendegradation etc. erfordern ein besseres Verständnis von Ökosystemprozessen als Grundlage für eine nachhaltige Ressourcennutzung. Der Wurzel als Schnittstelle zwischen Boden und Pflanze kommt dabei eine besondere Bedeutung zu.

Im Rahmen des 7. Symposiums der Internationalen Gesellschaft für Wurzelforschung (ISRR) entstand die Idee zur Bildung einer Österreichischen Gesellschaft für Wurzelforschung. Am 20. Mai 2010 fand an der Universität für Bodenkultur schließlich die offizielle Gründungsveranstaltung der Österreichischen Gesellschaft für Wurzelforschung (Austrian Society for Root Research, ASRR) statt. Ziele sollen die Stärkung aller Forschungsaktivitäten im Bereich Wurzel und die Entwicklung gemeinsamer, vernetzter Arbeitsschwerpunkte zwischen Fachdisziplinen und Arbeitsgruppen in der Grundlagen- und angewandten Forschung sein.

Die Österreichische Gesellschaft für Wurzelforschung hat sich als Ziel gesetzt, in periodischen Veranstaltungen wie Feldtagen und Tagungen über den Stand der Forschung und praktische Erfahrungen aus dem Tätigkeitsbereich zu informieren. Als erster Umsetzungsschritt aus dieser Vorgabe, findet vom 13. bis 14. September 2011 die 1. Tagung der Österreichischen Gesellschaft für Wurzelforschung am LFZ Raumberg-Gumpenstein statt. Das Generalthema lautet: "Die Pflanzenwurzel im System Boden-Pflanze-Atmosphäre" (Plant roots in the Soil-Plant-Atmosphere system). Entsprechend der interdisziplinären Ausrichtung, stellen Vortragende aus dem In- und Ausland aktuelle Ergebnisse zu den Themen Wurzelmodellierung, Wurzelökologie, -morphologie und Wurzel im Konnex mit Mykorrhiza und Bodenorganismen vor. Ein besonderer Dank gilt den Mitarbeitern des LFZ und im besonderen Frau Brigitte Marold für die Planung, Organisation der Tagung, sowie der redaktionellen Bearbeitung der Tagungsbeiträge.

Abschließend wünschen wir der Tagung ein gutes Gelingen und Ihnen einen angenehmen und interessanten Aufenthalt am LFZ Raumberg-Gumpenstein.

HR Prof. Mag. Dr. Albert Sonnleitner  
Direktor

HR Mag. Dr. Anton Hausleitner  
Leiter für Forschung und Innovation

des Lehr und Forschungszentrums für Landwirtschaft  
Raumberg-Gumpenstein (LFZ)

Dr. Markus Herndl  
Abteilung für Umweltökologie  
LFZ Raumberg-Gumpenstein

Univ. Prof. Dr. Willibald Loiskandl  
Obmann der Österreichischen Gesellschaft  
für Wurzelforschung

# Vorstellung - Österreichische Gesellschaft für Wurzelforschung Austrian Society Root Research (ASRR)

Willibald Loiskandl<sup>1\*</sup>

## Summary

The Austrian Society Root Research (ASRR) was officially launched in May 2011 and aims to contribute to the research of morphology, anatomy and ecology of plants and plant communities by studies of roots and root systems for the sake of soil use, land management and environmental protection. The ASSR is rooted in the work of Prof. Kutschera and her team on research of plant communities, documented in seven root atlases. Following the above mission statement the different research areas are covered in working groups: root modelling, plant production and breeding, methodology of root analyses, root and soil microbiology, plant physiology, molecular biology and genetics of roots, plant communities and systematic of roots, and finally root pedagogic is proposed for dissemination of the research findings to a broader audience. Past and future activities of the society are on one side scientific workshops and symposia, field days and excursions and on the other side the establishment of interdisciplinary joint research and projects.

*Keywords:* root research in Austria, methodology of root studies

## Einleitung

Die österreichische Gesellschaft für Wurzelforschung wurde im Mai 2010 gegründet und im Mai 2011 offiziell als Verein etabliert. Die Namensgebung erfolgte in Anlehnung an die internationale Gesellschaft für Wurzelforschung (International Root Research Society ISRR).

Als übergeordnetes Ziel wurde im Mission Statement formuliert: Die Gesellschaft hat das Ziel einen Beitrag zur Erforschung der Morphologie, Anatomie und Ökologie der Pflanzen und der Pflanzengesellschaften durch Wurzelstudien im Dienste der Bodennutzung, Landwirtschaftspflege und des Umweltschutzes zu leisten (Mission Statement 2010).

In den Statuten wurde der Vereinszweck durch die Förderung der reinen und angewandten Wurzelforschung durch:

- Die Positionierung der Pflanzenwurzel und der Wurzelforschung für die verschiedensten ökologischen, land- und forstwirtschaftlichen Fragen von gesellschaftlich hoher Relevanz sowie die Verbesserung öffentlichen Wissens und Bewusstseins;
- Übernahme von Forschungsvorhaben;

- Durchführung der organisatorischen und verwaltungstechnischen Arbeiten für die vom Verein betreuten Forschungsvorhaben und Anschaffung von Geräten und Hilfsmitteln für Forschungszwecke;
  - Interdisziplinäre Zusammenarbeit mit in- und ausländischen Einrichtungen und
  - Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses
- festgelegt (Auszug aus den Vereinsstatuten, 2011).

Die Gründung der österreichischen Gesellschaft für Wurzelforschung ist eng mit dem Pflanzensoziologischen Institut in Klagenfurt verbunden. Die Wurzelforschung hat in Österreich durch die Arbeiten von Prof. Dr. Lore Kutschera und ihren Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen im Pflanzensoziologischen Institut eine lange Tradition (IN-HETVEEN und SCHMITT 2000). Aus organisatorischen und logistischen Gründen wurde kein gemeinsamer Verein sondern eine eigene Gesellschaft gegründet. Die Verbindung beider Organisationen ist jedoch schon alleine durch die handelnden Personen weiterhin gegeben.

## Entstehung und Wurzel

Am 20. Mai 2010 fand an der Universität für Bodenkultur schließlich die offizielle Gründungsveranstaltung der "Österreichischen Gesellschaft für Wurzelforschung" (ASRR) statt. Österreichische Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen aus einem breiten Feld von Fachdisziplinen – Botanik, Pflanzenphysiologie, Genetik und Molekularbiologie, Agrarwissenschaften, Forstwirtschaft, Landschaftsbau, Wasserwirtschaft, Bodenforschung – sowie einige Gäste aus dem benachbarten Ausland versammelten sich mit dem Ziel, eine Dachorganisation für Forschungsarbeiten im Bereich Wurzel zu bilden. Beiträge zu den Forschungsaktivitäten im Bereich Wurzel sowie die Entwicklung gemeinsamer, vernetzter Arbeitsschwerpunkte zwischen Fachdisziplinen und Arbeitsgruppen in der Grundlagen- und angewandten Forschung wurden diskutiert. Gerade die Wurzel und Rhizosphäre erfordern ein vernetztes Denken und Arbeiten, um die komplexen Wechselwirkungen zwischen Boden, Wasser, Bodenorganismen und Pflanze zu verstehen.

Die Gründungsversammlung zeigte die Breite der Themenstellungen, in denen die Wurzelforschung wichtige Beiträge leisten kann, und die Komplexität des Systems Boden-Wurzel-Pflanze-Atmosphäre, die ohne Interdisziplinarität der Forschung nicht zu bewältigen ist. Die breite Beteiligung an der Gründungsversammlung sowie der von allen Seiten klar zum Ausdruck gebrachte Wunsch nach

<sup>1</sup> Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft, Universität für Bodenkultur Wien (BOKU), Muthgasse 18, A-1190 WIEN

\* Ansprechpartner: Univ. Prof. DI Dr. Willibald Loiskandl, willibald.loiskandl@boku.ac.at

Vernetzung und Zusammenarbeit waren ein gelungener Start für die neue Gesellschaft.

Die auf der Versammlung angeregten Arbeitsbereiche, die auch in weiterer Folge als Arbeitsgruppen vorgeschlagen wurden, wurden präsentiert. Die sieben Arbeitsgruppen spiegeln den komplexen Zusammenhang der Prozesse in der Rhizosphäre wieder und stellen die:

- Wurzelmodellierung
- Pflanzliche Produktionssysteme und Züchtung
- Methodik der Wurzelanalyse
- Wurzel und Bodenmikrobiologie
- Physiologie, Molekularbiologie und Genetik der Wurzel
- Pflanzensoziologie und Systematik der Wurzel
- "Wurzelpädagogik" wurde vorgeschlagen zur „Verbreitung der Arbeiten an eine breitere Öffentlichkeit und insbesondere mögliche Anwender (Landwirtschaft, Ökologie, Landschaftsbau) zu fördern,

dar.

Die ASRR baut auf Arbeiten aus der Vergangenheit auf und kann auf weit zurückliegende Wurzeln zurückgreifen. Eine dieser Wurzeln ist das 1953 gegründete Pflanzensoziologische Institut in Klagenfurt, seit 2008 unter der Leitung von Frau Dr. Monika Sobotik. In den ersten sieben Jahren des Instituts entstand in gemeinsamer Arbeit von Prof. Dr. Kutschera mit Prof. Dr. Erwin Lichtenegger der "Wurzelatlas mitteleuropäischer Ackerunkräuter und Kulturpflanzen", der bis heute als internationales Standardwerk auf dem Gebiet der Wurzelforschung gilt und den Beginn einer insgesamt sieben Bände umfassenden Reihe darstellt ([www.wurzelforschung.at](http://www.wurzelforschung.at)). Der 7. Band der Kulturpflanzen gemäßigter Gebiete mit Arten des Feldgemüsebaues (KUTSCHERA et al. 2009) wurde im Juli 2009 im Festsaal der Stadt Klagenfurt vorgestellt. Bei dieser Veranstaltung war bereits die ASRR eingebunden.

1982 wurde von Prof. Dr. Lore Kutschera und ihren Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen eine internationale Tagung in Österreich initiiert auf der die ISRR gegründet wurde. In die Analen der ISRR ging diese Veranstaltung als "First

symposium of the ISRR on "Root ecology and its practical application" ein. Diese Kontakte wurden systematisch in den letzten drei Dekaden fortgesetzt und so fanden sechs weitere Symposien statt bei denen Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen aus den unterschiedlichsten Bereichen der Wurzelforschung und Nationalitäten eine Plattform für den Austausch und Wissenstransfer fanden. Diese Veranstaltungen lieferten einen signifikanten Beitrag zum Verständnis der Funktion der gesamten Pflanze. Dies kann mit einem Zitat von Kutschera sehr anschaulich verdeutlicht werden: "Ich will nichts Halbes in meinem Leben haben und tun. Wir wollen doch alle nichts Halbes sein. Also müssen wir uns als Botaniker mit dem Ganzen befassen" (in KUTSCHERA et al. 2009).

Auch das 7. Symposium der ISRR an der Universität für Bodenkultur, Wien im September 2009 wurde von Prof. Kutschera angeregt und es kann festgehalten werden, dass es ohne diese Veranstaltung nicht zur Gründung der ASRR gekommen wäre. Leider konnte Lore Kutschera diese, ihr gewidmete, wissenschaftliche Zusammenkunft nicht mehr persönlich miterleben. Im Rahmen des 7. Symposiums erfolgte die Initialzündung zur Bildung einer Österreichischen Gesellschaft für Wurzelforschung. Ein vorbereitendes Treffen mit dem Thema: Wurzelstrategien – Möglichkeiten der Fortsetzung und Weiterentwicklung der Arbeiten von Prof. Lore Kutschera fand bereits im Juni 2009 statt. Nach dem erfolgreichen Kongress wurde der Schwung weitergetragen und ein weiteres Treffen "Wurzelforschung in Österreich- Möglichkeiten und Chancen der Koordination der Wurzelforschung" wurde an der Universität für Bodenkultur, Wien im November 2009 abgehalten. Bei diesem Treffen wurde der Same für weitere Aktivitäten gesät. Erwähnen möchte ich drei aufgegangene Ereignisse. Auf die zahlreichen Koordinierungstreffen soll hier nur pauschal hingewiesen werden.

## Erste Früchte

In der kurzen Vereinsgeschichte erfolgten bereits einige Aktivitäten entsprechend dem übergeordneten Ziel der Positionierung der Wurzelforschung und Wissensverbreitung. Das erste Ereignis war ein **Feldtag zu Wurzeln von Zwi-**



Abbildung 1: Wurzelfreilegung von Zwischenfruchtbegrünung (Hollabrunn, 2010) und von Mais (Andau, 2009).



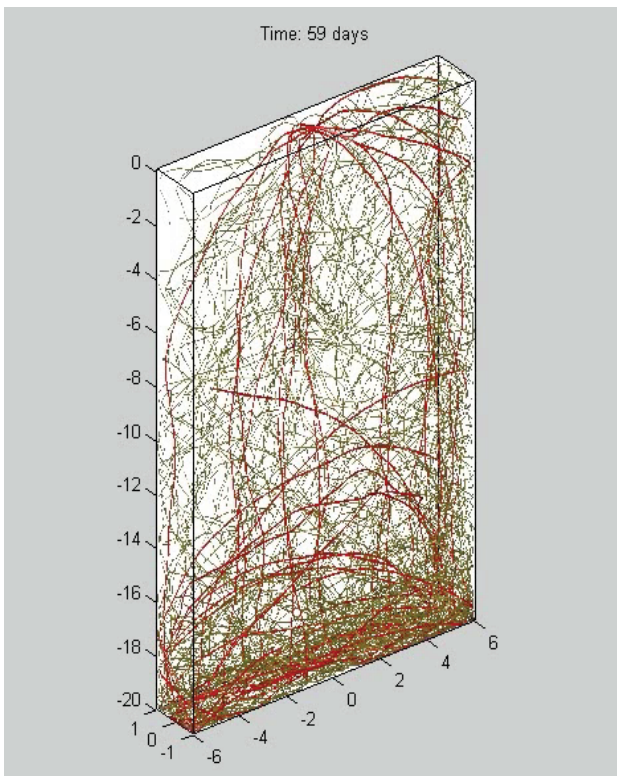


Abbildung 2: Root System Growth Model Leitner 2010; <http://www.boku.ac.at/marhizo/simulations.html>

**schenfrüchten** der an der Landwirtschaftlichen Fachschule Hollabrunn am 9. November 2010 abgehalten wurde.

Das Wurzelsystem von Zwischenfruchtbeständen ist für deren agro-ökologische Leistungen von entscheidender Bedeutung. Unter Leitung von Experten der Österreichischen Gesellschaft für Wurzelforschung (ASRR) sowie verschiedener landwirtschaftlicher Forschungs- und Bildungsinstitutionen konnten am Feldtag Zwischenfruchtbestände und deren Wurzelsystem besichtigt sowie Informationen zum Beitrag der verschiedenen Pflanzenarten für Bodenschutz und nachhaltige Fruchtfolgegestaltung erhalten werden (aus Einladung Feldtag, 2010).

Das Programm beinhaltete eine Einführung in den Zwischenfruchtbau in Österreich, eine Feldbegehung zu Wurzelfreilegungen (Abbildung 1) auf den Versuchsflächen der LFS Hollabrunn, die Vorstellung der Produktionstechnik für Zwischenfrüchte - Saattechnik und Begrünungswalze. Die Exkursionsleitung und Feldführungen wurden wesentlich von den Mitgliedern der ASRR getragen, wie aus der Namensliste der handelnden Personen, Dr. Monika Sobotik, Pflanzensoziologisches Institut Klagenfurt, Dr. Wilfried Hartl, Bioforschung Austria, Dr. Josef Rosner, Amt der NÖ Landesregierung, DI Harald Summerer und Franz Ecker, Landw. Fachschule Hollabrunn und Dr. Gernot Bodner, Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung ersichtlich ist.

Eingebettet in die Feldtage fand im Jänner 2011 auf Initiative des Instituts für Bodenforschung (IFB) der Universität für Bodenkultur, Wien ein Workshop zum Thema "Wurzelmodellierung" statt. Dr. Daniel Leitner präsentierte das von ihm im Rahmen eines WWTF - Projektes entwickelte Wur-

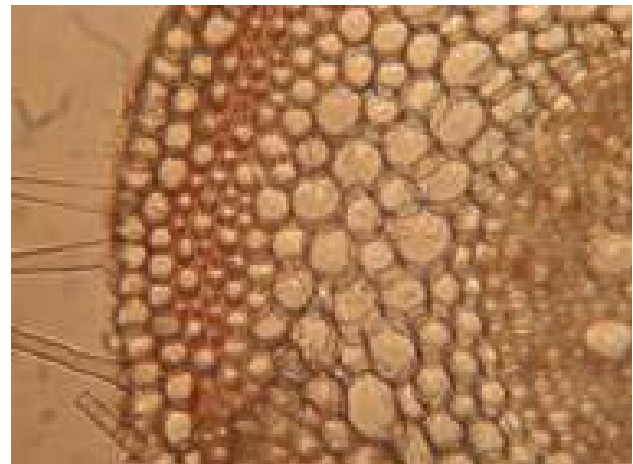


Abbildung 3: Anatomischer Querschnitt einer Gerstewurzel (*Hordeum vulgare*)

zelarchitekturmodell (Abbildung 2). Anschließend wurden praktische Übungen durchgeführt, um den Teilnehmern die Struktur des Modells näherzubringen und eine Anwendung für eigene Fragestellungen zu ermöglichen.

Die Arbeiten im Rahmen des WWTF - Projektes ergänzen die bereits geleisteten Beiträge der Simulationsgruppe zur Wurzelmodellierung (SCHNEPF et al. 2002).

Als dritte Frucht reifte im Juni 2011 wieder ein Workshop zur Wurzelfreilegung, diesmal an der Versuchswirtschaft Groß Enzersdorf der BOKU unter Anleitung von Dr. Monika Sobotik (Pflanzensoziologisches Institut Klagenfurt) und Dieter Haas (Bioforschung Austria) heran. Die Veranstaltung stand unter der Schirmherrschaft der Österreichischen Gesellschaft für Wurzelforschung und der Bioforschung Austria.

An drei Bodenprofilen mit unterschiedlicher Bodenbearbeitung wurden Wurzeln von Winterweizen freigelegt. Ziel war es, den Teilnehmern die Technik der Wurzelfreilegung, wie sie für die Wurzelatlas-Serie verwendet wurde, zu vermitteln.

Aufgrund des starken Regens mussten an einem Tag die Profilgruben verlassen werden und es wurden dafür anatomische Schnitte von Wurzeln (Abbildung 3) im Labor angefertigt und der unterschiedliche Aufbau verschiedener Wurzeln erläutert.

## Ausblick

Die Wurzelforschung ist auch heute ein Forschungsgebiet, das einen entscheidenden Beitrag zur Bewältigung wichtiger ökologischer Probleme des 21. Jahrhunderts leisten kann, wie Nahrungsmittelknappheit, Wassermangel und Bodendegradation. Eine bessere Kenntnis der „hidden half“ der Pflanze wie die Pflanzenwurzeln von WAISEL et al. (2002) in einem grundlegenden Werk bezeichnet wurden kann dazu beitragen, das ökologische und agronomische Potenzial der Wurzel für praktische Ziele wie Trockentoleranz von Pflanzen, Hangstabilisierung oder Verbesserung des Humushaushalts der Böden verstärkt zu nutzen. Diese gesellschaftlichen Herausforderungen erfordern ein besseres Verständnis von vernetzten Ökosystemprozessen als Grund-

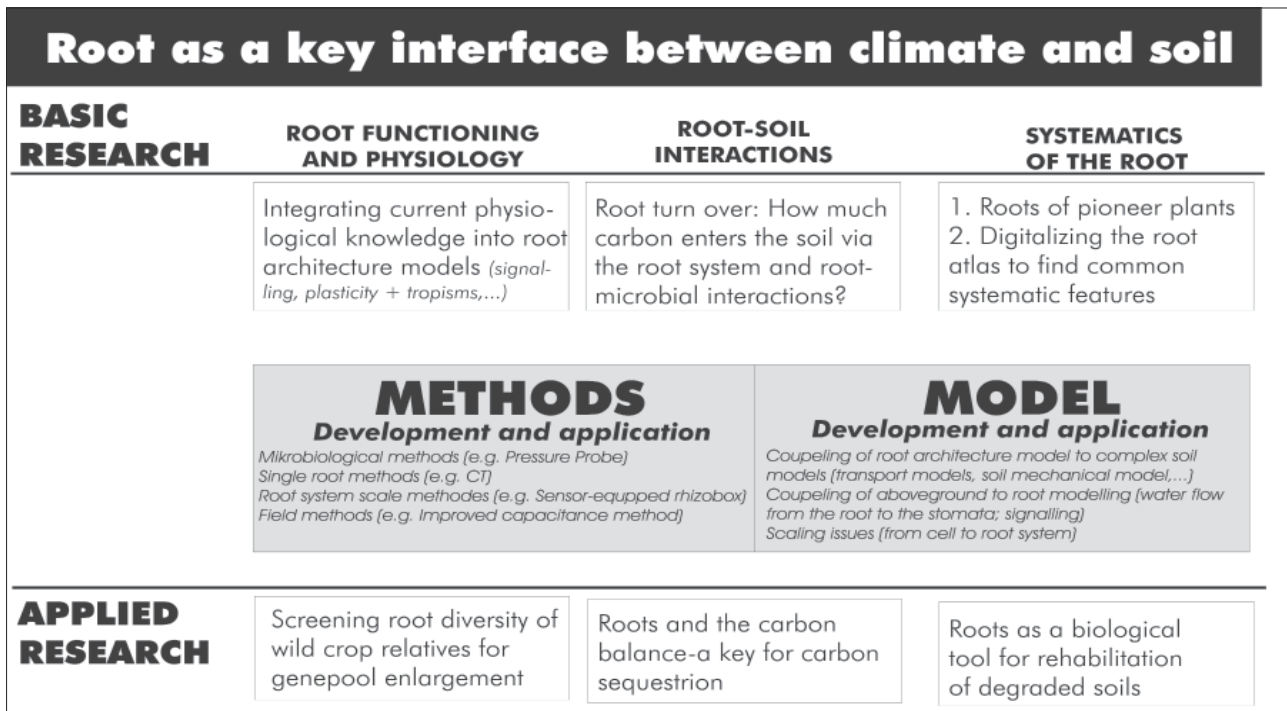


Abbildung 4: Projektentwurf Gernot Bodner

lage für eine nachhaltige Ressourcennutzung. Der Wurzel als Schnittstelle zwischen Boden und Pflanze kommt dabei eine besondere Bedeutung zu.

Die Veranstaltungsaktivitäten sollen wie im ersten Jahr weitergeführt werden, so soll die Kultur der wissenschaftlichen Exkursion wiederbelebt werden und es sind wieder Wurzelgrabungen geplant. Auf eine eigene österreichische Tagung wird 2012 verzichtet, da in diesem Jahr vom 26-29 Juni die 8. Tagung "ISRR 2012: Roots to the Future" der „International Root Research Society (IRRS) in Dundee in Schottland, organisiert von Prof. Peter Gregory, dem neuen Präsidenten der ISRR, und seinen Kollegen und Kolleginnen des „Scotish Crop Research Institute's (SCRI““, stattfindet. Die Themenwahl folgt der Tradition der Interdisziplinarität und der Komplexität des Themas. Eine Teilnahme von österreichischer Seite ist geplant.

Als ein identifiziertes Forschungsgebiet ist die Positionierung der Wurzelforschung im Kontext sich ändernder Umweltbedingungen anzuführen, wobei die Wurzel als Bindeglied zwischen Klima und Boden angesehen werden muss (Abbildung 4).

Die einzelnen Arbeitsgruppen sind zusätzlich aktiv alle Möglichkeiten für gemeinsame Projekte und vor allem die dafür notwendige Finanzierung auszuloten.

## Danksagung

Mein Dank gilt allen Vorstandsmitgliedern und Freunden der Wurzelforschung für alle Aktivitäten und Unterstützung

im ersten Vereinsjahr und besonders auch den beteiligten Personen des Lehr und Forschungszentrums Raumberg-Gumpenstein (LFZ) für die Ausrichtung der 1. Tagung der ASRR.

## Literatur

- INHETVEEN, H. und M. SCHMITT, 2000: Pionierinnen des Landbaus, angelas Schriftenreihe Band 1.
- KUTSCHERA, L., E. LICHTENEGGER und M. SOBOTIK, 2009: Wurzelatlas der Kulturpflanzen gemäßiger Gebiete mit Arten des Feldgemüsebaues. DLG, Frankfurt/Main.
- Statuten des Vereins Österreichische Gesellschaft für Wurzelforschung, Austrian Society of Root Research – ASRR, Angemeldet bei der Bundespolizeidirektion Wien 21. April, 2011.
- SCHNEPF, A., M.L. HIMMELBAUER, M. PUSCHENREITER, T. SCHREFL, E. LOMBI, W.J. FITZ, W. LOISKANDL and W.W. WENZEL, 2005: Model development for simulating the bioavailability of Ni to the hyperaccumulator *Thlaspi goesingense*. In: Huang, P.M., Gobran, G.R., Biogeochemistry of trace elements in the rhizosphere, 391-418; Elsevier, Amsterdam; ISBN 978-0-444-51997-9
- WASEL, Y., A. ESHEL and U. KAFKAFI, 2002: Plant Roots – The Hidden Half, 3rd ed. revised and expanded. Dekker.
- Internet links  
[http://asrr.boku.ac.at/Mission statement 2010](http://asrr.boku.ac.at/Mission%20statement%202010)  
[www.wurzelforschung.at](http://www.wurzelforschung.at), Das Pflanzensoziologische Institut in Klagenfurt  
<http://www.boku.ac.at/marhizo/simulations.html>  
<http://www.rootresearch.org/meetings/isrr2012>

# Mögliche Beziehungen zwischen der P-Erschließung in der Rhizosphäre und der Pflanzenverfügbarkeit des Phosphats im Boden

Wolfgang Merbach<sup>1\*</sup>, Annette Deubel<sup>1</sup> und Silke Ruppel<sup>1</sup>

## Zusammenfassung

Eine sparsame, an den Pflanzenbedarf angepasste P-Düngung ist von hoher ökonomischer und ökologischer Relevanz. Sie setzt eine zuverlässige Analyse des pflanzenverfügbaren Phosphors im Boden voraus. Oftmals sind jedoch die allgemein gebräuchlichen Laktatmethoden nicht ausreichend, um die pflanzliche Phosphoraufnahme verlässlich zu charakterisieren. Interessanterweise ließ sich zeigen, dass Wurzelexsudate den doppelaktatextrahierbaren Phosphoranteil im Boden erhöhen können. Mikrobielle Besiedlung der Wurzeln steigerte die Exsudatmengen und die spezifische Fähigkeit der Exsudate zur Phosphaterschließung, wodurch der DL-extrahierbare Phosphatanteil insgesamt anwuchs. Die Zuckerfraktion von P-Mangel-Pflanzen erhöhte die Phosphatlösungsfähigkeit des Bakterienstammes *Enterobacter radicincitans*, vielleicht durch Veränderung der Säureproduktion dieser Mikroben. Wurzelexsudate lösten mehr Phosphor aus dem Boden als die Laktatextrakte. Die Aufklärung der physiologischen Prozesse in der Rhizosphäre kann zur zutreffenderen Charakterisierung der Nährstofferschließungsfähigkeit der Pflanzen und zur Fortentwicklung von Bodenextraktionsverfahren beitragen, wodurch die Düngergaben dem Pflanzenbedarf und den lokalen Bedingungen noch besser angepasst werden könnten.

**Schlagwörter:** Phosphor, Rhizosphäre, Wurzelexsudate, mikrobielle Besiedlung, Dauerdüngungsversuche

## Summary

Fertilization adapted to plant demand is of high economical and ecological relevance. This requires a reliable analysis of plant available P. In many cases, the double-lactate (DL) phosphate extraction methods apparently do not adequately reflect the P uptake ability of plants. In this respect it is interesting that root exudates increased the double-lactate (DL) extractable P amount of soils in sterile and non sterile cultures. Microbial colonisation increased both the exudate amount and the specific ability of exudates to solubilize P. In spite of rapid exudate turnover, DL-P solubility was increased. Sugars released from P-deficient plants increased the P solubilizing ability of a bacterial strain (*Enterobacter radicincitans*), perhaps by changing bacterial acid production. Root exudates solubilized more P from soil than lactate extracts did. An investigation of physiological processes in the rhizosphere could contribute to a better understanding of nutrient availability and perhaps lead to the development of extraction methods that better reflect the availability of soil phosphorus to plants.

**Keywords:** phosphorus, rhizosphere, root exudates, microbial colonization, long-term fertilization trials

## Einführung

Bekanntlich sind die Phosphorvorräte der Erde begrenzt und werden in überschaubarer Zeit zur Neige gehen. In vielen tropischen und subtropischen Gebieten werden die landwirtschaftlichen Kulturpflanzenbestände wegen hoher Phosphorimmobilisation im Boden und der hohen Düngerkosten unzureichend mit dem Nährstoff Phosphor versorgt (z. B. FANKEM et al. 2006). Die gleiche Situation findet man in mittel- und osteuropäischen Transformationsländern (auch in den östlichen deutschen Bundesländern) vor, in denen seit Anfang 1990 wegen zu niedriger Phosphordüngung negative Phosphorbilanzen zu verzeichnen sind (z.B. KUBAT 2007, ZORN et al. 2007).

Andererseits haben viele Gebiete Mittel- und Westeuropas einschließlich des westlichen Deutschlands sehr hohe Boden-P-Gehalte, was besonders bei leichten sandigen Böden mit überhöhter organischer Düngung und mit hohem Vieh-

besatz zum Phosphoraustrag führen kann (RÖMER 1998). Auf diesen Standorten besteht die Gefahr der Gewässereutrophierung, da hier die Phosphorgrenzwerte oft überschritten werden (THEILEN 1992, MERBACH et al. 2010).

Die überschüssige Phosphorzufuhr ist nicht nur aus Gründen des Ressourcen- und Umweltschutzes, sondern auch aus ertragsphysiologischen Gründen zu vermeiden, da hohe P-Düngung vorwiegend die Reserve-P-Fractionen der Pflanze erhöht, also anorganischen Phosphor und Phytin (SCHILLING 2000, MERBACH et al. 2010), und daher einen Luxuskonsum der Pflanzen darstellt.

Daher muss das Ziel eine **am tatsächlichen Pflanzenbedarf orientierte** und gleichzeitig **ökonomisch optimale Phosphordüngung** sein. Der Verband der Deutschen Landwirtschaftlichen Untersuchungs- und Versuchsanstalten (VD-LUFA) hat aus diesem Grund Düngungsempfehlungen erarbeitet. Die Empfehlungen gehen vom P-Bedarf der Pflanze

<sup>1</sup> Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften, Julius-Kühn-Straße 25, D-06112 HALLE (SAALE)

\* Ansprechpartner: Prof. Dr. Wolfgang Merbach, merbach@landw.uni-halle.de

aus und werden durch den pflanzenverfügbaren P-Vorrat des Bodens modifiziert. Letzterer wird mit Doppellaktat (DAL) oder Calciumlaktat (CAL) bestimmt (HOFFMANN 2007), wobei die Böden in fünf Gehaltsklassen eingeteilt werden (A = sehr niedrig bis E = sehr hoch). Ziel der Düngungsbeurteilung ist die ausreichende P-Versorgung der Pflanzen, die auf die Erhaltung eines mittleren Boden-P-Vorrates (Gehaltsklasse C) ausgerichtet ist, welche eine nachhaltige Pflanzenproduktion sichert (RÖMER 1998, KERSCHBERGER et al. 1997, SCHILLING 2000). Die Voraussetzungen für eine bedarfsgerechte und nachhaltige P-Düngung sind in Deutschland gegeben. Trotzdem ist die Phosphorversorgungssituation mit einigen Unsicherheiten behaftet, die die Treffsicherheit der Phosphordüngung beeinträchtigen. Nachfolgend sollen die Ursachen hierfür näher betrachtet und mögliche Ansätze zur Fortentwicklung aufgezeigt werden.

### Die Aussagefähigkeit der Bodenbestimmungsmethoden für die Charakterisierung des pflanzenverfügbaren Boden-P

Aus vielen neueren Publikationen (z. B. SIBBESEN 1983, BUONDONNO et al. 1992, HOUBA et al. 1992, SIMS 1993, SHARLEY et al. 1994, CAMPELL 1994, NEYROUD und LISCHER 2003) geht hervor, dass verschiedene Extrakte zur P-Lösung aus dem Boden genutzt und in Beziehung zur Pflanzenverfügbarkeit dieses Nährelements gesetzt werden. Diese Extraktionsmittel wirken, mit Ausnahme von Wasser, destruktiv und erfassen unterschiedliche P-Mengen aus verschiedenen Bodenpools. Die meisten Extraktionsmethoden ergaben bei der Überprüfung in Feldversuchen jedoch nur bei P-armen Böden akzeptable Korrelationen zwischen den extrahierbaren P-Mengen einerseits und der pflanzlichen P-Aufnahme, dem Trockensubstanzertrag und der Pflanzenreaktion auf P-Düngung andererseits (TUNNEY et al. 1997). Vor allem in Böden mit mittlerem oder hohem Phosphorgehalt zeigen diese Methoden nicht immer einen klaren Bezug zur Pflanzenreaktion. Mögliche Ursachen dafür könnten unzureichende Kenntnis/Berücksichtigung der Langzeitprozesse der Boden-P-Dynamik und der Transformation zwischen unterschiedlichen Bodenphosphorfraktionen sein (GRANSEE und MERBACH 2000).

Darüber hinaus werden in unterschiedlichen Gebieten Deutschlands verschiedene Grenzwerte für die Gehaltsklassen des pflanzenverfügbaren Phosphors verwendet (siehe RÖMER 1998), obwohl in den letzten Dekaden eine Angleichung angestrebt wurde (KERSCHBERGER und HEGE 1996).

Die Zusammenhänge zwischen P-Versorgung und Ertrag wurden detaillierter im P-Dauerdüngungsversuch auf dem Julius-Kühn-Feld Halle untersucht (gegründet von K. Schmalfuß 1949, Einzelheiten siehe MERBACH und DEUBEL 2007).

Der Standort ist durch mittlere Jahresniederschläge von 465 mm und eine mittlere Lufttemperatur von 9°C geprägt. Der Boden ist eine degradierte Schwarzerde (Haplic Tschernosem nach FAO) auf Sandlöss der Weichseleiszeit, der durch Geschiebemergel unterlagert ist. Dieser Bodentyp ist am Rande des Löss-Schwarzerde-Gürtels des östlichen Vorhar-

zes gelegen und grenzt an die Schwarzerden des Thüringer Beckens und der Magdeburger Börde an. Die Bodenzahl liegt nach der Reichsbodenschätzung im Durchschnitt bei 55 Bodenpunkten (Bodenklassifikation in Deutschland: bester Boden = 100 in der Nähe von Calbe/Saale, siehe RÖTSCH und KURANDT 1941). Im Vergleich zu den typischen Schlufflössboden besitzt der Sandlöss einen niedrigeren Basenvorrat, eine geringere Bodenwasserreserve, und daher kann es im Winter zur Tiefenversickerung kommen.

Diese Standort- und Bodenverhältnisse repräsentieren die Sandlössgebiete zwischen Saale, Elbe und Mulde. Da jedoch die Abweichungen gegenüber anderen Trockengebieten Mitteldeutschlands und Osteuropas nur gering sind, lassen sich die Resultate der Hallenser Dauerversuche weitgehend auch auf diese Regionen übertragen und besitzen daher eine hohe Allgemeingültigkeit.

Der **P-Dauerdüngungsversuch in Halle** besteht als zweifaktorielles Experiment aus drei Phosphordüngungsstufen (0, 15, 45 kg P ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>) mit drei Phosphordüngern (Super-, Thomas- und Alkalisinterphosphat), welche in jährlichem oder dreijährlichem Abstand ausgebracht werden. Die Fruchtfolge lautet Luzerne–Luzerne–Kartoffel–Winterroggen–Zuckerrübe–Sommergerste. Dieser Versuch ermöglicht wesentliche Aussagen für eine nachhaltige Pflanzenproduktion wie zum Beispiel die Bilanzierung des Phosphates unter Berücksichtigung tieferer Bodenschichten (STUMPE et al. 1994, GARZ et al. 2000) das P-Retentionsvermögen des Bodens und die zeitliche Veränderung des P-Bindungszustandes (GRANSEE und MERBACH 2000), welche die Überprüfung neuer Untersuchungsverfahren zur Charakterisierung des P-Düngungsbedarfs erlauben (STUMPE et al. 1990, SCHLIEPHAKE et al. 1997, MERBACH und DEUBEL 2007).

Die Resultate dokumentieren zunächst den ausbleibenden Effekt der P-Düngung (*Tabelle 1*).

Im Vergleich zur Düngung mit 45 kg P ha<sup>-1</sup> wurde festgestellt, dass nach 35 Jahren unterlassener P-Düngung nur ein geringfügiger Ertragsabfall zu verzeichnen ist (*Tabelle 1*). Die Anwendung von 15 kg P ha<sup>-1</sup> reichte für einen hohen Ertrag und die Erhaltung eines akzeptablen P-Versorgungsgrades aus (42 mg/kg Boden DL-lösl. P in 0 - 20 cm Tiefe) (*Tabelle 1*). Darüber hinaus ergaben langjährige Phosphorbilanzen, dass in 0 - 40 cm Bodentiefe viel mehr Phosphor vorhanden war (*Tabelle 1*), als aus der Differenz zwischen Phosphorzufuhr und Phosphorentzug zu erwarten war (*Tabelle 1*, 3. Zeile). In der Null-Variante ergab sich in 0 - 40 cm Bodentiefe in den Jahren 1949 bis 1991 ein Phosphordefizit von 184 kg P/ha, obwohl 844 kg P/ha zu erwarten gewesen sind. Somit bestand ein **Bilanzüberschuss von 658 kg P/ha**. Offensichtlich existiert eine höhere P-Nachlieferung aus den tieferen Bodenschichten, welche sich aus den Gehalten an DL- oder wasserlöslichem Phosphor (*Tabelle 1*, unterer Teil), nicht ohne weiteres erklären lässt. Solche Größenordnungen der Phosphornachlieferung müssen aber in der P-Düngungsstrategie berücksichtigt werden. Es war deshalb nach den möglichen Ursachen als Grundvoraussetzung für zuverlässige Methoden und Prognosen zu suchen.

In diesem Zusammenhang stellte sich u. a. die Frage nach der Rolle der Pflanzenwurzeln bei der Erschließung des Phosphates aus tieferen Bodenschichten.

**Tabelle 1: Phosphordauerdüngungsversuch (Feld D) in Halle; P-Düngung, P-Aufnahme, Boden-P-Gehalte (modifiziert nach STUMPE et al. 1990, 1994; SCHLIEPHAKE et al. 1997) ( $P_0 = 0 \text{ kg P} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ,  $P_1 = 15 \text{ kg P} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ,  $P_3 = 45 \text{ kg P} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ )**

Parameter	Einheit	$P_0$	$P_1$	$P_3$
durchschnittlicher Trockenmasseertrag 1949 – 1991	tha <sup>-1</sup>	7,8	8,4	8,5
P-Lieferung	kg ha <sup>-1</sup>	0	546	1470
P-Aufnahme	kg ha <sup>-1</sup>	844	874	903
Differenz zwischen Lieferung und Aufnahme	kg ha <sup>-1</sup>	-844	-328	+567
Gesamt-P-Bodenänderung 0-40 cm	kg ha <sup>-1</sup>	-184	+21	+498
Bilanzüberschuss	kg ha <sup>-1</sup>	658	349	-69
DL-P-Bodengehalt				
<b>1949</b>				
0-20 cm	mg kg <sup>-1</sup>	85	85	85
<b>1995</b>				
0-20 cm	mg kg <sup>-1</sup>	32	42	77
20-40 cm	mg kg <sup>-1</sup>	32	42	63
40-60 cm	mg kg <sup>-1</sup>	26	31	34

**Tabelle 2: Abnahme des Gesamt-P-Gehaltes im Unterboden beim Langzeit-Phosphordüngungs-Versuch (Feld D) in Halle nach 40 Jahren unterschiedlicher P-Düngung ( $\text{mg P} \cdot (\text{kg Boden})^{-1}$ ,  $P_0=0 \text{ kg P} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ,  $P_1=15 \text{ kg P} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ,  $P_3=45 \text{ kg P} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ) (GARZ et al. 2000, modifiziert)**

Jahre	Bodenschicht	$P_0$	$P_1$	$P_3$
1949	0 - 40 cm	500	500	500
1991/93	0 - 20 cm	496	534	643
Durchschnitt	20 - 40 cm	477	488	521
	40 - 80 cm	358 <sup>x</sup>	379	396 <sup>x</sup>

x = signifikant unterschiedlich gegenüber der 0 – 40 cm – Bodenschicht

## Die Möglichkeit der Phosphoraufnahme durch die Wurzeln aus tieferen Bodenschichten

Zunächst war zu fragen, ob der Wurzeltiefgang bei Kulturpflanzen groß genug ist, um P-Reserven aus tieferen Bodenschichten erschließen zu können. Tatsächlich ließ sich zeigen, dass Gras- und Getreidewurzeln fähig sind, mehr als 2 Meter tief in dem Unterboden vorzudringen (SCHILLING 1997, MERBACH et al. 2010).

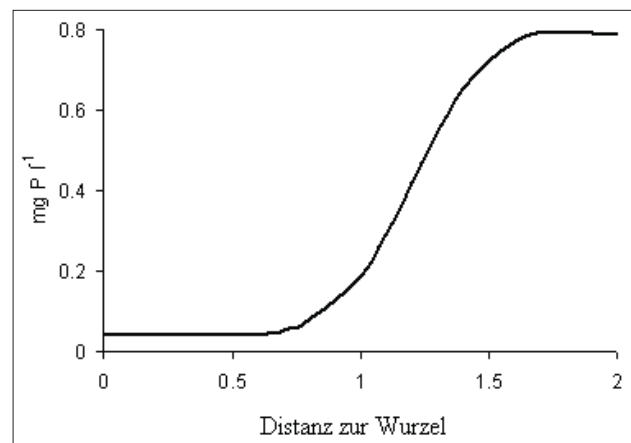
Dies steht in Übereinstimmung mit dem Befund, dass sich die Gesamt-P-Gehalte im Unterboden des P-Dauerdüngungsversuches nach 40 Jahren Versuchszeit deutlich verringert hatten (Tabelle 2, GARZ et al. 2000). Besonders die tief wurzelnde Luzerne war zur Erschließung des Unterboden-P befähigt (SCHLIEPHAKE et al. 1997).

Neben der Wurzeltiefe und – verteilung ist das **P – An eignungsvermögen der Wurzeln** entscheidend für die pflanzliche P- Ernährung. Deshalb waren die Prozesse in der Wurzelumgebung näher zu betrachten.

## Rhizosphärenprozesse und Phosphorerschließung von Pflanzenwurzeln

### Die Phosphorverarmung an der Wurzeloberfläche

Die Pflanzenwurzeln nehmen die Phosphate aus der Bodenlösung auf und verringern somit die Phosphorkonzentration

**Abbildung 1: Phosphatverarmungszone in der Umgebung der Wurzeloberfläche (Rhizosphäre) (HENDRIKS et al. 1981) (modifiziert)**

an der Wurzeloberfläche. Wie <sup>32</sup>P-Experimente (RÖMER, unveröffentlicht) zeigten, beläuft sich die Ausdehnung der <sup>32</sup>P-Verarmungszone innerhalb von vier Tagen auf 2 mm um die Pflanzenwurzeln (RÖMER, zit. bei SCHILLING et al. 1998).

Andere Autoren fanden einen Verarmungsradius von nur 1 mm (HENDRIKS et al. 1981, *Abbildung 1*).

Diese Ausdehnung entspricht derjenigen der Rhizosphäre. Es war daher nach der Rolle der Wurzelexsudate für Phosphormobilisation zu fragen.

### Quantifizierung und Charakterisierung von wurzelbürtigen Kohlenstoffverbindungen (Rhizodeposition)

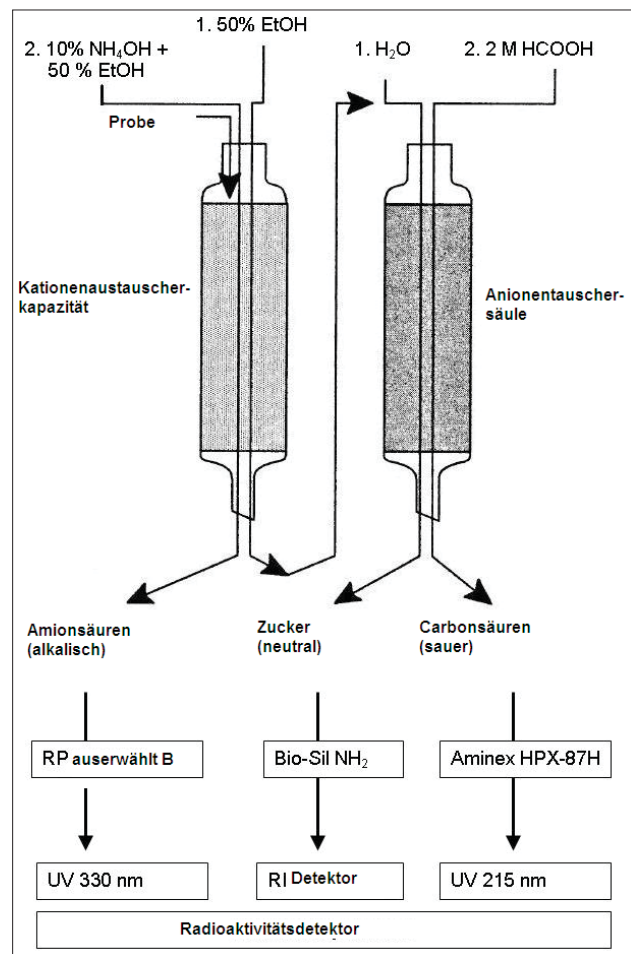
Für eine verlässliche Beurteilung der Rolle und des Verbleibs der Rhizodeposition im Boden sind detaillierte Kenntnisse über die Zusammensetzung, Verteilung, Menge und die Stoffwechselumwandlungen von pflanzenbürtigen Verbindungen erforderlich. In den letzten Jahren hat man auf diesem Gebiet durch die Einführung der <sup>14</sup>C-Markierung, die Nutzung steriler Kontrollen, die genaue Platzierung

von radioaktiven „Modellexsudaten“ und neue analytische Trennungs- und Quantifizierungsmethoden große Fortschritte erzielt (HELAL und SAUERBECK 1989, SWINNEN 1994, MERBACH et al. 1999b, MERBACH und WITTENMAYER 2004, GRANSEE und WITTENMAYER 2000, HÜTSCH et al. 2002, RENGEL 2002, WALKER et al. 2003).

Um die mögliche Bedeutung der Rhizodeposition für die P-Erschließung abzuschätzen, wurden zunächst die Menge und Zusammensetzung der durch die Wurzeln freigesetzten C-Verbindungen an verschiedenen Pflanzenarten untersucht (Details vgl. BARBER und MARTIN 1976, HELAL und SAUERBECK 1989, MERBACH et al. 1996, 1999b). Dabei wurde den Pflanzen in so genannten Doppelkompartimentgefäßen (luftdichte Trennung von Spross- und Wurzelraum), über die Sprosse  $^{14}\text{CO}_2$ -haltige Luft angeboten, um die (primär) wurzelbürtigen  $^{14}\text{C}$ -Verbindungen von den vorher im Boden befindlichen  $^{12}\text{C}$ -Substanzen unterscheiden zu können (MERBACH 1997, MERBACH et al. 1996, 2010). Zu Versuchsende erfolgte eine Bilanzierung der Verteilung des assimilierten  $^{14}\text{C}$  auf die Pflanzensubstanz (Spross, Wurzel), das durch die Wurzeln freigesetzte  $\text{CO}_2$  (periodisches „Ausblasen“ des  $^{14}\text{CO}_2$  aus dem Wurzelraum) und den Boden. Danach wurde die  $^{14}\text{C}$ -Bilanz berechnet. Um die eigentliche Wurzelatmung von der sekundären Wurzelexsudatveratmung durch Mikroben unterscheiden zu können, wurden sterile Vergleichsvarianten in die Untersuchungen mit einbezogen (MERBACH et al. 1999b, MERBACH und RUPPEL 1992). Der im Boden nachweisbare  $^{14}\text{C}$ -Anteil unterlag danach einer weiteren Fraktionierung, und zwar nach unterschiedlicher Wurzelnähe, nach unterschiedlicher Wasserlöslichkeit und in organische Säuren, Zucker und Aminosäuren (nur wasserlösliche Exsudate, Ionenaustauscherchromatographie, siehe MERBACH et al. 1998). Die letztgenannten Fraktionen wurden dann weiter in Einzelverbindungen aufgetrennt und quantifiziert (GRANSEE und WITTENMAYER 2000, *Abbildung 2*).

Nachfolgend werden die erhaltenen Resultate summarisch dargestellt:

- Rund 14 – 18% des durch die apparente  $\text{CO}_2$ -Assimilation fixierten  $^{14}\text{C}$  (was 23-26% des im Pflanzenmaterial eingebauten  $^{14}\text{C}$  entspricht), werden durch die Wurzeln im Boden während der Wachstumsphase durch die Rhizodeposition freigesetzt. Bei Feuchtländpflanzen (z.B. *Phragmites*) scheint die Rhizodeposition deutlich geringer zu sein (RICHERT et al. 2000). Die Besiedlung durch Mikroorganismen erhöhte die  $^{14}\text{C}$ -Freisetzung signifikant (MERBACH und RUPPEL 1992, SCHULZE und PÖSCHEL 2004). Wenn ein jährlicher Gesamtkohlenstoffinput von 5 – 6 t/ha angenommen wird, ist dieser Anteil äquivalent zu 1 t C/ha und Jahr.
- In unmittelbarer Wurzelnähe sind die primären wurzelbürtigen Verbindungen vorwiegend wasserlöslich. Sie bestehen aus Zuckern (40 – 75%), gefolgt von organischen Säuren (15 – 34%) und Aminosäuren bzw. Amidinen (6 – 18%) (vgl. GRANSEE und WITTENMAYER 2000, MERBACH et al. 1999b). Ähnliche Resultate finden sich bei KRAFFCZYK et al. (1984). Dabei bestehen deutliche Unterschiede zwischen verschiedenen Pflanzenarten.



*Abbildung 2: Schema zur Analyse der Wurzelexsudate (GRANSEE und WITTENMAYER 2000)*

Die Zuckerfraktion besteht hauptsächlich aus Glukose, Fruktose und Saccharose, die Aminosäurenfraktion aus Glutamat, Aspartat und Serin und die organische Säurenfraktionen aus Tartrat, Apfelsäure, Zitrat und Succinat (GRANSEE 2004). Hier wurden ebenfalls pflanzen- und sogar sortenspezifische Unterschiede beobachtet (HÜTSCH et al. 2002, GAUME et al. 2001, ISHIKAWA et al. 2002).

- Die Rhizodeposition stammt aus unterschiedlichen Quellen pflanzlichen und mikrobiellen Ursprungs (OADES 1978, TOAL et al. 2000, FOEREID und YEARSLEY 2004). Exsudate, Sekretionen, Lysate und verschiedene Schleimstoffe tragen zu ihrer Bildung bei. Wurzelbürtige Kohlenstoffverbindungen sind außerordentlich heterogen und können in Abhängigkeit von der Pflanzenart, mikrobiellen Besiedlung und Umweltbedingungen variieren. Die räumliche Verteilung kann ebenfalls unterschiedlich sein. Einige Pflanzenarten setzen die „Exsudate“ durch alle Wurzelteile (*Zea mays* L.) frei, andere nur um die Wurzelspitze herum (*Brassica napus* L.) (*Abbildung 3*).
- Die Menge der wurzelbürtigen Kohlenstoffverbindungen nimmt exponentiell mit der Entfernung zur Wurzeloberfläche ab (MERBACH et al. 1999b).
- Wurzelbürtige Kohlenstoffverbindungen werden im großen Ausmaß durch mikrobielle Veratmung metabolisiert



Abbildung 3: Scannogramm von Mais- und Rapswurzeln, angezogen in engem Kontakt mit Agrarplatten nach dreitägiger Verabreichung von  $^{14}\text{CO}_2$ . Die Linien zeigen die Position der Wurzeln (GRANSEE 2004)

(62 – 86% innerhalb von fünf Tagen), resultierend in einer  $\text{CO}_2$ -Bildung (HELAL und SAUERBECK 1989, MERBACH et al. 1999b, YEVDOKIMOV et al. 2007). Bei Feuchtpflanzen (RICHERT et al. 2000) und in Experimenten von SWINNEN (1994) war dieser Anteil deutlich geringer, aber immer noch relevant. Die mikrobielle Aktivität belastet die Wirtspflanze im Sinne eines zusätzlichen Sinks (MERBACH und RUPPEL 1992, SCHULZE und PÖSCHEL 2004) und resultiert in der Bildung von mikrobieller Biomasse und sekundären Veränderungen der wurzelbürtigen Kohlenstoffverbindungen, die die Nährstoffverfügbarkeit beeinflussen können.

- In größerer Entfernung von der Wurzeloberfläche (mehr als 10mm) werden wurzelbürtige Kohlenstoffverbindungen in schwer wasserlösliche Substanzen transformiert, vor allem durch Mikroben (LEZOVIC 1999).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Pflanzen mit ihrer **Rhizodeposition** über eine beachtliche **Energiequelle** und eine Vielzahl **reaktiver Verbindungen** verfügen, um Bodenprozesse und Nährstoffumsatz zu beeinflussen. Für die P-Verfügbarkeit dürften dabei vor allem wasserlösliche Verbindungen eine Rolle spielen.

### Der Einfluss von Phosphormangel auf den Gehalt und die Zusammensetzung von wasserlöslichen Wurzelexsudaten

Zur Betrachtung des Einflusses unterschiedlicher P-Versorgung auf die Exsudatzusammensetzung sollen nachfolgend Versuche mit jungen Erbsen- und Maispflanzen herangezogen werden (GRANSEE 1997). Dabei wurden die in Quarzsand wachsenden Pflanzen entweder mit 100mg P (als  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ ) versorgt, oder sie blieben ohne P-Düngung. Etwa 3 Wochen nach der Aussaat erfolgte eine  $^{14}\text{CO}_2$ -Begasung der Sprosse, der sich eine Analyse der  $^{14}\text{C}$ -markierten Wurzelabscheidungen anschloss. *Tabelle 3* zeigt, dass bei optimaler P-Ernährung die meiste  $^{14}\text{C}$ -Radioaktivität in der Zuckerfraktion und nur ein geringer Anteil in der Carbonsäurefraktion zu finden war.

Bei **P-Mangel ging der Zuckeranteil drastisch zurück**, während der **Carbonsäureanteil** bis auf etwa 30% der Gesamtradioaktivität **anstieg** (GRANSEE 2004, MERBACH et al. 1999a). Ähnliche Effekte wurden auch für andere Pflanzenarten gefunden (ZHANG et al. 1997, GAUME et al. 2001, SHEN et al. 2002). Gleichzeitig änderte sich auch die Zusammensetzung der Carbonsäuren (hier nicht zahlen-

*Tabelle 3: Einfluss verschiedener P-Versorgung auf die Zusammensetzung von kaltwasserlöslichen  $^{14}\text{C}$  markierten Wurzelexsudaten der Erbse (*Pisum sativum*, var. *Grapis*), 3 Wochen alte Pflanzen in Gefäßversuchen (aus MERBACH et al. 1999a)*

P-Versorgung mg P Gefäß <sup>-1</sup>	Zucker dpm (g TS) <sup>-1</sup>	Aminosäuren dpm (g TS) <sup>-1</sup>	Carbonsäuren dpm (g TS) <sup>-1</sup>
0	28,931	9,743	11,227
100	80,769	20,344	9,327
GD Tukey 0,05	4,328	2,773	894

*Tabelle 4: Zusammensetzung der Zuckerfraktion von wasserlöslichen  $^{14}\text{C}$ -markierten Wurzelexsudaten (Bq (g TS Wurzel)<sup>-1</sup>) von Mais (*Zea mays*, var. *Bermasil*) in Abhängigkeit von der P-Ernährung (in Klammern % von Gesamtzucker, 4 Wochen alte Pflanzen) (GRANSEE 1998)*

Verbindung	P-Versorgung, mg P Gefäß <sup>-1</sup>			
	0		100	
Glukose	153,0	(17,9)	671,6	(46,2)
Fruktose	50,8	(5,9)	410,4	(28,2)
Galaktose	107,6	(12,6)	0	(0,0)
Arabinose	125,4	(14,7)	0	(0,0)
Ribose	156,0	(18,2)	114,0	(7,8)
Xylose	71,5	(8,4)	0	(0,0)
Saccharose	158,8	(18,6)	257,5	(17,8)
Fucose	31,6	(3,7)	0	(0,0)

mäßig dargestellt). Zitronensäure und Bernsteinsäure (die besonders viel Bodenphosphat lösen) waren auf Kosten von Äpfel- und Milchsäure erhöht (vgl. RÖMER 2006, RYAN et al. 2001, WHITELAW 2000). Ähnliches wurde auch bei Mais-, Raps- und Weizenpflanzen gefunden (eigene, unveröffentlichte Resultate). Darüber hinaus ließ sich zeigen, dass sich auch die Zusammensetzung der Zuckerfraktion bei P-Mangel drastisch veränderte (GRANSEE 1998, 2004), wie in *Tabelle 4* am Beispiel von Mais ausgewiesen wird.

So fanden sich in der Zuckerfraktion bei ausreichender P-Versorgung Glukose, Fruktose, Saccharose und Ribose, wobei Glukose fast die Hälfte der gemessenen Radioaktivität ausmachte. Bei P-Mangelbedingungen konnten zusätzlich die Zucker Galaktose, Arabinose, Xylose und Fucose nachgewiesen werden, während der Anteil von Glukose und Fruktose deutlich zurückging (GRANSEE 2004). Es fällt auf, dass insbesondere der Anteil der Pentosen deutlich zunahm.

### Einfluss der P-Mangel-induzierten Veränderungen der Exsudatzusammensetzung auf die Phosphorlöslichkeit

Es war nun zu fragen, ob die im Abschnitt „Einfluss von Phosphormangel auf den Gehalt und die Zusammensetzung von wasserlöslichen Wurzelexsudaten“ beschriebene starke Veränderung der pflanzlichen Exsudatzusammensetzung bei P-Mangel eine phosphatmobilisierende Wirkung hat. Denkbar wären dabei direkte oder indirekte (d.h. unter Einfluss von Mikroben vonstatten gehende) Effekte. Zur Prüfung eines möglichen **Direkteffektes** wurde zunächst der Exsudateinfluss unter **sterilen Bedingungen** geprüft.

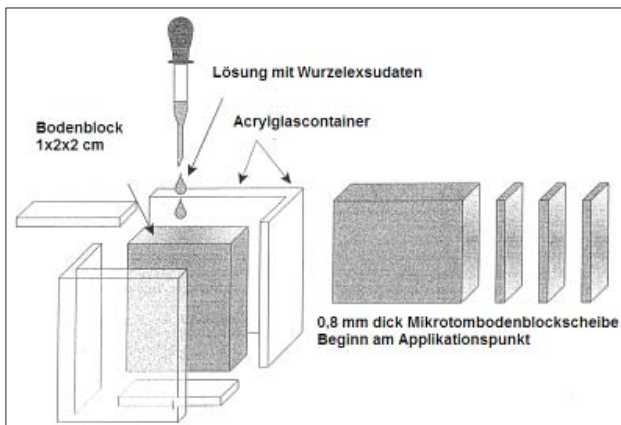


Abbildung 4: Bodenblockmethode zur Untersuchung des Einflusses von Wurzelexsudaten auf die P-Löslichkeit im Boden. Linke Seite: Auftropfen von wasserlöslichen Wurzelexsudaten auf die Stirnseite eines Bodenblocks in einem Acrylglascontainer. Rechte Seite: Schneiden von 0,4 mm starken Bodenplättchen auf einem Gefriermikrotom, von der Stirnseite beginnend (LEŽOVIČ 1999, GRANSEE 2004).

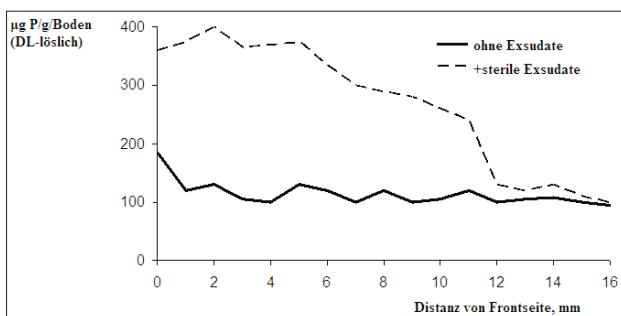


Abbildung 5: Doppellaktatlösliche Bodenphosphate im Bodenblock drei Tage nach der Applikation mit Wurzelexsudaten (für Einzelheiten siehe SCHILLING et al. 1998 und LEŽOVIČ 1999).

Zu diesem Zweck kam ein System mit Modellbodenblöcken zum Einsatz (Abbildung 4).

Dabei wurden die  $^{14}\text{C}$ -markierten Originalwurzelabscheidungen oder Standardverbindungen, die in ihrer Zusammensetzung den Wurzelabscheidungen entsprachen, auf die Frontseite von Bodenblöcken aufgetropft, die sich in Plexiglascontainern befanden und nach Versuche in 0,4 mm dicke Mikrotomabschnitte zerlegt wurden (Abbildung 4). Dieses Verfahren erlaubt es, die Wanderung der  $^{14}\text{C}$ -markierten Wurzelabscheidungen im Boden und gleichzeitig auch die P-Löslichkeit in Abhängigkeit von der Exsudatbewegung zu verfolgen. Dabei stellte sich heraus, dass bis etwa 10 mm von der Auftropfstelle entfernt  $^{14}\text{C}$ -Radioaktivität zu messen war. Bis zum gleichen Abstand war aber auch die mittels Doppellaktat (DL) extrahierbare P-Menge gegenüber einem unbehandelten Boden erhöht (Abbildung 5). In größerem Abstand war keine oder nur eine geringe Beeinflussung zu erkennen. Phosphat dürfte also nur im Einflussbereich der Wurzelexsudation mobilisiert werden.

Besonders deutlich wurde die P-mobilisierende Wirkung der Exsudate in einer Entfernung von 2 mm von der Auftropfstelle. 3 Tage nach der Zugabe von 200 mg unveränder-

tem (weil nahezu sterilem) Maisexsudat war die Menge des DL-löslichen Phosphates auf etwa das 3-fache der Kontrolle erhöht. Als Ursache dieser direkten Exsudatwirkung auf die P-Verfügbarkeit dürfte neben der erhöhten Gesamtmenge an Carbonsäuren (JONES et al. 2003, siehe auch Tabelle 3) wohl der in Abschnitt „Einfluss von Phosphormangel auf den Gehalt und die Zusammensetzung von wasserlöslichen Wurzelexsudaten“ beschriebene Anstieg an Zitronensäure und Bernsteinsäure in Frage kommen, da diese beiden Säuren besonders effektiv P lösen können (DEUBEL 1996, siehe auch Tabelle 7). Damit werden Vorstellungen bekräftigt, nach denen z.B. Zitrat ausschüttung bei Pflanzen (z.B. auch im Falle der Proteoidwurzeln bei Weißlupinen) eine verbreitete Strategie zur P-Mobilisierung darstellt (DINKELAKER et al. 1989, NEUMANN und RÖMHELD 1999, RÖMER 2006). Demgegenüber hat die veränderte Zuckerszusammensetzung bei P-Mangel (Tabelle 4) wahrscheinlich keinen direkten Einfluss auf die P-Erschließung. Deshalb sollten auch die möglichen, durch Mikroben beeinflussten indirekten Exsudatwirkungen Beachtung finden.

### Mikrobielle Sekundäreffekte auf die Phosphorlöslichkeit

Da unter normalen Bodenverhältnissen die Exsudate durch Mikroben verändert werden, wurde der Einfluss einer Exsudatgabe unter **nicht sterilen Bedingungen** geprüft. Wie Tabelle 5 zeigt, ergab sich dadurch zwar immer noch eine verdoppelte P-Löslichkeit (Zeile 3) im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle, aber gegenüber der Steril-Exsudatvariante (Zeile 2) war die P-Verfügbarkeit deutlich geringer.

Die Ursache dafür liegt auf der Hand: Die Exsudatmenge war während der Versuchszeit durch  $^{14}\text{CO}_2$ -Veratmung (siehe MERBACH und RUPPEL 1992, MERBACH et al. 1996, MERBACH 1997) auf etwa ein Viertel zurückgegangen (Tabelle 5, Fußnote 1), so dass nur noch ein Teil davon P-mobilisierend wirksam werden konnte. Der verbleibende Teil (25,8%) muss aber eine stark erhöhte spezifische Mobilisierung bewirkt haben, denn es wurden je mg Exsudat ca. 2,9 µg DL-löslicher P/g Boden im Vergleich zu 1,23 µg bei der Sterilvariante zusätzlich gelöst (Tabelle 5, Spalte 3). Hinzu kommt, dass Mikrobenbesiedlung die Menge der Wurzelabscheidungen im Vergleich zu keimarmen Varianten deutlich fördert (Tabelle 6). Zieht man dies in Betracht, so ergibt sich rechnerisch auch absolut eine Überlegenheit der Insterilvariante bei der P-Mobilisierung (Tabelle 5, Zeile 4), was aber experimentell noch zu beweisen bleibt.

### Mögliche Ursachen für den mikrobiellen Phosphormobilisationseffekt am Beispiel von *Enterobacter radicincitans*

Mikrobenbesiedlung kann also prinzipiell die Potenz von Wurzelexsudaten zur P-Erschließung in der Rhizosphäre erhöhen. Offen blieb zunächst, welche Ursachen dafür verantwortlich sind. Zur Beantwortung dieser Fragestellung wurde zunächst überprüft, inwieweit die Zuckerfraktion der Wurzelexsudate, die bei P-Mangel deutliche Veränderungen erfahren hatte (Tabelle 4), das Phosphatlösungsvermögen



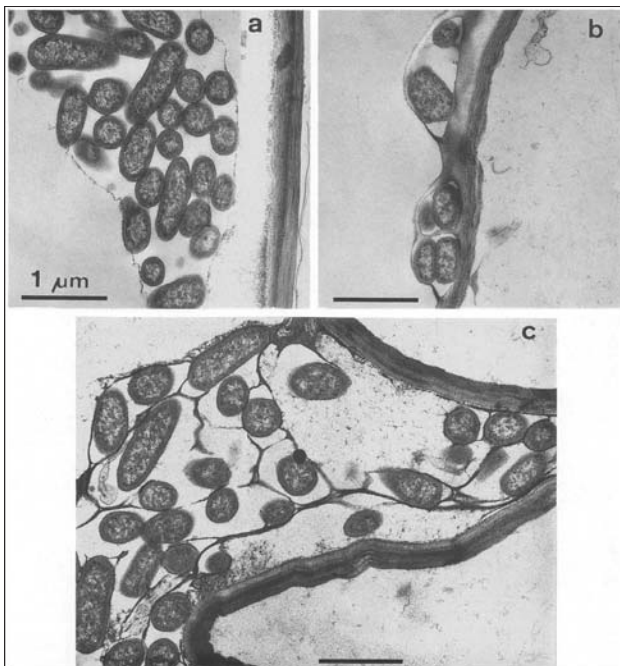
**Tabelle 5: Einfluss wasserlöslicher Wurzelexsudate von Mais auf die Menge von DL-löslichem P in 2 mm Entfernung vom Aufgabort (MERBACH et al. 1999a)**

Behandlung	µg DL löslicher P (g Boden) <sup>-1</sup> , Gesamt	Durch Exsudate zusätzlich mobilisierter P (µg P (g Boden) <sup>-1</sup> )	spezifische P Lösungsaktivität (µg DL lösliche P (mg Exsudat) <sup>-1</sup> )
1. ohne Exsudate	125	-	-
2. 200 mg Exsudate	370 <sup>x</sup>	245	1.23
3. 200 mg Exsudate, unsteril	270 <sup>x</sup>	145	2,90 <sup>1x</sup>
4. 320 mg Exsudate, unsteril <sup>2)</sup> Wiederfindungsrate 25,8%	432 <sup>3)</sup>	307 <sup>3)</sup>	3,83 <sup>3)</sup>

<sup>x</sup> signifikante Differenz zwischen Variante 1 und 2 mit 0,05; <sup>1)</sup> nach 3 Tagen Wiederfindungsrate 25,8%; <sup>2)</sup> im unsterilen Wurzelraum im Durchschnitt 60% mehr <sup>14</sup>C-Exsudate wiederzufinden als im sterilen Wurzelraum; <sup>3)</sup> errechnet nach Fußnoten 1 und 2

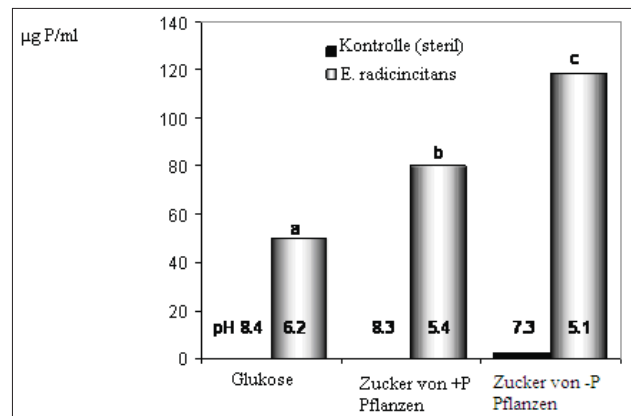
**Tabelle 6: Einfluss der Mikrobenbesiedlung auf die <sup>14</sup>C Menge in der Rhizosphäre nach <sup>14</sup>CO<sub>2</sub>- Aufnahme durch Pflanzensprosse (Gefäßversuche mit Boden nach MERBACH und RUPPEL 1992, Angaben in Bq (g TS)<sup>-1</sup>), x, xx = signifikant verschieden von steriler Variante bei 0,05 und 0.01**

Pflanzenart	steril	unsteril
Weizen ( <i>Triticum aestivum</i> )	9143 (100)	16357 (179) <sup>xx</sup>
Ölrettich ( <i>Raphanus sativus</i> )	6703 (100)	8222 (123) <sup>x</sup>
<i>Chenopodium album</i> L.	15474 (100)	24385 (158) <sup>xx</sup>



**Abbildung 6: Besiedlung von Weizenwurzeln mit *Enterobacter radicincitans*. Transmissions-Elektronenmikroskopie 22.000fache Vergrößerung. Anhäufung der Bakterien auf der Oberfläche von Seitenwurzel (a,b) und im Interzellularraum (c) (aus RUPPEL et al. 1992)**

von *Enterobacter radicincitans* (früher: *Pantoea agglomerans* D5/23) zu erhöhen vermag. Dieses in Gefäß- und Feldversuchen phytostimulative Bakterium (REMUS et al. 2000) kann sich in der Rhizosphäre von Kulturpflanzen



**Abbildung 7: Einfluss der Zuckerfraktion von Erbsenwurzelexsudaten (*Pisum sativum*, Sorte Grapis) auf das Phosphatlösungsvermögen von *Enterobacter radicincitans* (Substrat Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>; +P-Pflanzen = ausreichend mit P versorgte Pflanzen; -P-Pflanzen = nicht ausreichend mit P versorgte Pflanzen), unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Differenzen (Tukey-Test bei 0,05) (für Einzelheiten siehe DEUBEL 1996, DEUBEL et al. 2000).**

anreichern (Abbildung 6), wobei die Stärke der Besiedlung pflanzenspezifisch ist (RUPPEL et al. 1992, REMUS et al. 2000, RUPPEL et al. 2006).

In diesen Versuchen zeigte sich, dass das Lösungsvermögen dieses Mikroorganismus für P aus dem schwerlöslichen Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> in einer MUROMCEV-Nährlösung durch die Zuckerexsudate von P-Mangel-Erbse tatsächlich stark erhöht war (Abbildung 7).

Im Vergleich zu einem Glukosestandard konnten die Bakterien mit dieser Exsudatfraktion mehr als doppelt so viel P mobilisieren (DEUBEL et al. 2007, DEUBEL und MERBACH 2005). Über mögliche Ursachen hierfür gibt die Tabelle 7 Auskunft.

Sie zeigt, dass die bei P-Mangel im Exsudat auf Kosten von Glukose zunehmenden Pentosen (hier Ribose und Xylose, siehe oberer Teil der Tabelle 7) das Bakterium *Enterobacter radicincitans* zu höherer Extraktion an Bernsteinsäure und Zitronensäure veranlassen, deren P-Löslichkeitsvermögen besonders hoch ist (unterer Teil der Tabelle 7) (DEUBEL und MERBACH 2005, DEUBEL et al. 2007).

**Tabelle 7: Einfluss der C-Quelle auf die Carbonsäurefraktionen der Exsudate von *Enterobacter radicincitans* in Nährlösung (DEUBEL 1996, DEUBEL et al. 2007, modifiziert)**

Parameter	C-Quelle		
	Glukose	Ribose	Xylose
Veränderung der Wurzelexsudate bei Mais und Erbsen bei P-Mangel (%)	46,2 → 17,9 47,2 → 17,0	7,8 → 18,3 6,6 → 16,0	0 → 8,4 0 → 9,1
Milchsäure <sup>1)</sup>	19 (± 10)	19 (± 8)	2 (± 2)
Bernsteinsäure <sup>1)</sup>	249 (± 7)	318 (± 16)	293 (± 110)
Zitronensäure <sup>1)</sup> (in µg ml <sup>-1</sup> )	-	7 (± 1)	30 (± 15)

<sup>1)</sup> Lösungsfähigkeit mit Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> (µg P · ml<sup>-1</sup>); Milchsäure 12,6; Bernsteinsäure 17,8; (Basis: 100 µg Säure · ml<sup>-1</sup>); Zitronensäure 23,6

**Tabelle 8: Einfluss der Maiswurzelexsudate auf die Mengen an Doppellaktat (DL)-extrahierbarem P in drei Böden (Daten in mg P (kg Boden)<sup>-1</sup>, modifiziert nach GRANSEE 1998), (DL = Doppellaktat, WA = Wurzelexsudate)**

Extraktionsmittel	Boden 1 (pH 4,3)		Boden 2 (pH 6,2)		Boden 3 (pH 7,2)	
	P-Mengen	%	P-Mengen	%	P-Mengen	%
DL	36	100	97	100	72	100
WA	42	117	117	121	97	132
GD Tukey	2		7		5	
0.05						

### Zwischenfazit

Zusammenfassend ist festzustellen, dass Wurzelexsudate in Modellversuchen die DL-Löslichkeit des Boden-P erhöhten und Zuckerexsudate von P-Mangel-Pflanzen die Phosphorlösungs-fähigkeit von *Enterobacter radicincitans* verbesserten. **Wurzelbürtige organische Verbindungen vergrößern also direkt oder indirekt (durch Mikroben) die pflanzliche Phosphorverfügbarkeit**, besonders bei Phosphormangel.

### Mögliche Anwendungen der exsudatbedingten Boden -P- Mobilisation

Folgende potentielle Anwendungsmöglichkeiten wären denkbar:

- Durch **Impfung mit phosphatlösenden Mikroben** (so genannten Biofertilizern) könnte bei schlechter Phosphorverfügbarkeit insbesondere in den tropischen und subtropischen Entwicklungsländern die Phosphorernährung der Kulturpflanzen verbessert werden (NARULA et al. 2000, DEUBEL und MERBACH 2005, FANKEM et al. 2006).
- Die P-Erschließung durch Wurzelexsudate könnte zur **Weiterentwicklung von P-Extraktionsmethoden** dienen. In diesem Zusammenhang wurde geprüft, ob wasserlösliche Wurzelexsudate mehr P aus Böden zu lösen vermögen, als es mit der herkömmlichen Doppellaktatmethode der Fall ist (GRANSEE 2004). Ein entsprechender „Tastversuch“ zeigt, dass Wurzelabscheidungen von Mais tatsächlich dazu in der Lage sind (Tabelle 8). Wenn sich dieser Befund in weiteren Untersuchungen bestätigen sollte, könnte dies zu Bodenextraktionsmethoden führen, die den pflanzenverfügbaren Anteil des Bodenphosphats besser charakterisieren

als die herkömmlichen Laktatmethoden, weil sie die P-Umsatzprozesse in der Rhizosphäre mit einbeziehen (SCHILLING 1997).

- Der **Voraussagewert von Bodenanalysen** hängt schließlich entscheidend davon ab, ob sie den **Phosphorernährungsstatus** der Pflanzen mit ausreichender Sicherheit widerspiegeln. Dabei sind Schnelltests zur Charakterisierung des Ernährungszustandes der Pflanze erforderlich. Im Unterschied zum Stickstoff (Nitrat-Schnelltest) gibt es für den Phosphor bisher keine sichere Methode. Der Pflanzengehalt an anorganischem P wäre wahrscheinlich ein geeignetes Kriterium, doch gibt es bisher dafür keinen geeigneten Pflanzenschnelltest (SCHILLING 1997). Der Gesamt-P-Gehalt der Pflanze ist nicht geeignet, da es keine gesicherten Korrelationen zum Kornertrag gibt. Vielleicht zeichnet sich aber eine andere Lösung ab, da P-Mangelpflanzen zum mindesten bei Getreide und Mais eine **hohe Aktivität der sauren Phosphatasen** im Blattapparat besitzen. Das sind die Enzyme, die den Umsatz von Phosphorsäureestern katalysieren. Wie Versuche von GRANSEE (1988) zeigten, könnte deren Aktivität ein Indikator zur Charakterisierung des P-Ernährungszustandes sein, da sich in etlichen Fällen gesicherte negative Korrelationen zum Kornertrag ergaben (hier nicht zahlenmäßig aufgeführt). Obwohl die Resultate derzeit noch sehr unsicher sind, zeigen sie doch einen Ansatzpunkt, den Vorhersagewert von Bodenuntersuchungsergebnissen an Hand des aktuellen P-Ernährungszustandes der Pflanzen zu prüfen einschließlich der **möglichen Korrektur der Bodengrenzwerte**.
- Die Kenntnis der Mechanismen der pflanzlichen P – Mobilisierung könnte für die **Züchtung P – effizienter Pflanzensorten** genutzt werden (ISHIKAWA et al. 2002, WITTENMAYER und MERBACH 2005). Besonders sinnvoll wäre dies für Regionen mit hohen Gesamt- Boden – P – Gehalten, wie sie in tropischen und subtropischen Ländern weit verbreitet sind (RÖMER 2006). Eine Selektion von Genotypen mit hoher Exsudation wirksamer Karbonsäuren könnte unter solchen Bedingungen zur Verbesserung der Phosphatausnutzung beitragen. Schließlich wäre noch an den molekularbiologischen Transfer von Genen für die Zitratausscheidung (RENGEL 2002, SUZUKI et al. 2003) oder die Phytaseproduktion (GEORGE et al. 2005) zwischen verschiedenen Pflanzenarten oder von Mikroben zu Pflanzen zu denken.

## Literatur

- BARBER, D.A. and J.K. MARTIN, 1976: The release of organic substances by cereal roots into soil. *New. Phytol.* 76, 69-80.
- BUONDONNO, A., E. COPPOLA, D. FELLECA and P. VIOLANTE, 1992: Comparing tests for soil fertility: 1. Conversion equations between Olsen and Mehlich 3 as phosphorus extractant for 12 soils of South Italy. *Comm. Soil Plant Anal.* 23, 699-716.
- CAMPBELL, L.C., 1994: Plant and soil analysis: an Australian perspective. *Comm. Soil Plant Anal.* 25, 767-780.
- DEUBEL, A., 1996: Einfluß wurzelbürtiger organischer Kohlenstoffverbindungen auf Wachstum und Phosphatmobilisierungsleistung verschiedener Rhizosphärenbakterien. Diss. Univ. Halle, Shaker Verlag, Aachen.
- DEUBEL, A. and W. MERBACH, 2005: Influence of micro-organisms on phosphorus bio-availability in soils. In: BUSCOT, F. and A. VARMA, eds.: *Microorganisms in Soils: Roles in Genesis and Functions*, Springer, Berlin, Heidelberg, 177-191.
- DEUBEL, A., A. GRANSEE and W. MERBACH, 2000: Transformation of organic rhizodepositions by rhizosphere bacteria and its influence on the availability of tertiary calcium phosphate. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 163, 387-392.
- DEUBEL, A., A. GRANSEE and W. MERBACH, 2007: Tricalcium-phosphate solubilizing efficiency of rhizosphere bacteria depending on the P-nutritional status of the host plant. In: VELAZQUEZ, E. and C. RODRIGUEZ-BARRUECO, eds.: *First international meeting on microbial phosphate solubilization. Developments in Plant and Soil Sciences*, Springer, 257-260.
- DINKELAKER, B., V. RÖMHELD, V. and H. MARSCHNER, 1989: Citric acid excretion and precipitation of calcium citrate in the rhizosphere of white lupin (*Lupinus albus*). *Plant Cell Environ.* 12, 285-292.
- FANKEM, H., D. NWAGA, A. DEUBEL, L. DIENG, W. MERBACH and F.X. ETOA, 2006: Occurrence and functioning of phosphate solubilizing microorganisms from oil palm (*Elaeis guineensis*) rhizosphere in Cameroon. *Afr. J. Biotechnol.* 5, 2450-2460.
- FOEREID, B. and J.M. YEARSLEY, 2004: Modelling the impact of microbial grazers on soluble rhizodeposit turnover. *Plant Soil* 267, 329-342.
- GARZ, J., W. SCHLIEPHAKE and W. MERBACH, 2000: Changes in the subsoil of long-term trials in Halle (Saale), Germany, caused by mineral fertilization. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 163, 663-668.
- GAUME, A., F. MÄCHLER, C. DE LEON, L. NARRO and E. FROSARD, 2001: Low-P tolerance by maize (*Zea mays* L.) genotypes: Significance of root growth, and organic acids and acid phosphatase root exudation. *Plant Soil* 228, 253-264.
- GEORGE, T.S., R.J. SIMPSON, P.A. HADOBAS and A.E. RICHARDSON, 2005: Expression of a fungal phytase gene in *Nicotiana tabacum* improves phosphorus nutrition of plants grown in amended soils. *Plant Biotechnol J.* 3, 129-140.
- GRANSEE, A., 1988: Überwachung des P-Ernährungszustandes wachsender Getreidebestände unter Nutzung von P-Fractionen und Enzymaktivitäten der Pflanze. Diss., Univ. Halle.
- GRANSEE, A., 1997: Untersuchungen zum Einfluß von Wurzelabscheidungen auf den Gehalt an pflanzenverfügbarem Phosphat in der Rhizosphäre. VDLUFA-Schriftenreihe 46, 751-754.
- GRANSEE, A., 1998: Die Beeinflussung der Phosphatlöslichkeit in der Rhizosphäre durch direkte und indirekte Wirkungen von Wurzelabscheidungen höherer Pflanzen. In: MERBACH, W. und L. WITTENMAYER (Hrsg.): *Beiträge aus der Hallenser Pflanzenernährungsforschung*, MLU Halle-Wittenberg, 84-96.
- GRANSEE, A., 2004: Wechselwirkungen zwischen den Wurzelabscheidungen von Kulturpflanzen und der P-Dynamik in der Rhizosphäre - Ansätze zur Verbesserung der Nährstoffeffizienz. Habilitationsschrift, Univ. Halle, Verlagsgesellschaft für Ackerbau mbH, Kassel.
- GRANSEE, A. and W. MERBACH, 2000: Phosphorus dynamics in a long-term P fertilization trial on Luvic Phaeozem at Halle. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 163, 353-357.
- GRANSEE, A. and L. WITTENMAYER, 2000: Qualitative and quantitative analysis of water-soluble root exudates in relation to plant species and development. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 163, 381-385.
- HELAL, H.M. and D. SAUERBECK, 1989: Carbon turnover in the rhizosphere. *Z. Pflanzenern. Bodenk.* 152, 211-216.
- HENDRIKS, L., N. CLAASSEN and A. JUNGK, 1981: Phosphatverarmung des wurzelnahen Bodens und Phosphataufnahme von Mais und Raps. *Z. Pflanzenern. Bodenk.* 144, 486-499.
- HOFFMANN, G., 2007: VDLUFA-Methodenbuch Band I: Die Untersuchung von Böden. Darmstadt: VDLUFA - Verlag.
- HOUBA, V.J.G., I. NOVOZAMSKY and J.J. van der LEE, 1992: Soil testing and plant analysis in Western Europe. *Comm. Soil Plant Anal.* 23, 2029-2051.
- HÜTSCH, B.W., J. AUGUSTIN and W. MERBACH, 2002: Plant rhizodeposition - an important source for carbon turnover in soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 165, 397-407.
- ISHIKAWA, S., J.J. ADU-GYAMFI, T. NAKAMURA, T. YOSHIHARA, T. WATANABE and T. WAGATSUMA, 2002: Genotypic variability in phosphorus solubilizing activity of root exudates by pigeonpea grown in low-nutrient environments. *Plant Soil* 245, 71-81.
- JONES, D.L., P.G. DENNIS, A.G. OWEN and P. A.W. van HEES, 2003: Organic acid behaviour in soils - misconceptions and knowledge gaps. *Plant Soil* 248, 31-41.
- KERSCHBERGER, M. und U. HEGE, 1996: Fazit der Beiträge und Schlußfolgerungen. VDLUFA-Schriftenreihe 42, 123-129.
- KERSCHBERGER, M., U. HEGE und A. JUNGK 1997: VDLUFA-Standpunkt „Phosphordüngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf“, Darmstadt: Verband Deutscher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA).
- KRAFFCZYK, I., G. TROLLDENIER and H. BERINGER, 1984: Soluble root exudates of maize: Influence of potassium supply and microorganisms. *Soil Biol. Biochem.* 16, 315-322.
- KUBAT, J., 2007: Die agrarwirtschaftliche Situation in Tschechien, Abstracts IOSDV-Wintertagung, Rauischholzhausen.
- LEZOVIC, G., 1999: Wirkung von Maiswurzelabscheidungen auf die Phosphatmobilisierung im Boden. Diss., Univ. Halle, Grauer Beuren-Stuttgart.
- MERBACH, W., 1997: C-Freisetzung durch Pflanzenwurzeln. *Stapfia (Linz)* 50, 321-326.
- MERBACH, W. and A. DEUBEL, 2007: The Long-Term Fertilization Trials in Halle. Teubner Research, Deutscher Univ. Verlag / GWV-Fachverlage, Wiesbaden.
- MERBACH, W. and S. RUPPEL, 1992: Influence of microbial colonization on <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> assimilation and amounts of root-borne <sup>14</sup>C compounds in soil. *Photosynthetica (Praha)* 26, 551-554.
- MERBACH, W. and L. WITTENMAYER, 2004: Einfluss der pflanzlichen Rhizodeposition auf die C-Flüsse im Boden. *Arch. Agron. Soil Sci.* 50, 99-113.
- MERBACH, W., A. GRANSEE und L. SCHMIDT, 1998: Pflanzenernährungsforschung im Spannungsfeld von Prozeßaufklärung und Düngeberatung, Tagungsband Verband der Landwirtschaftskammern und des Bundesarbeitskreises Düngung (BAD), Würzburg, 19-35.
- MERBACH, W., G. KNOF, J. AUGUSTIN, H.J. JACOB, R. JÄGER und V. TOUSSANT, 1996: Ökophysiologische Wechselbeziehungen zwischen Pflanze und Boden. In: MÜHLE, H. und S. CLAUS (Hrsg.): *Reaktionsverhalten von agrarischen Ökosystemen homogener Areale*, B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Stuttgart, Leipzig, 195-207.

- MERBACH, W., A. DEUBEL, A. GRANSEE, G. LEZOVIC und R. REMUS, 1999a: Wurzelexsudation und mikrobielle Leistungen in der Rhizosphäre- ausgewählte Aspekte. In: KÖRSCHENS, M. (Hrsg): Beziehungen zwischen organischer Bodensubstanz und bodenmikrobiologischen Prozessen. Umweltforschungszentrum Halle-Leipzig GmbH, 15-38.
- MERBACH, W., E. MIRUS, G. KNOF, R. REMUS, S. RUPPEL, R. RUSSOW, A. GRANSEE and J. SCHULZE, 1999b: Release of carbon and nitrogen compounds by plant roots and their possible ecological importance. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 162, 373-383.
- MERBACH, W., A. DEUBEL, A. GRANSEE, S. RUPPEL and A.K. KLAMROTH, 2010: Phosphorus solubilization in the rhizosphere and its possible importance to determine phosphate plant availability in soil. A review with main emphasis on German results. *Arch. Agron. Soil Sci.* 56, 119-138.
- NARULA, N., V. KUMAR, R.K. BEHL, A. DEUBEL, A. GRANSEE and W. MERBACH, 2000: Effect of P-solubilizing *Azotobacter chroococcum* on N, P, K uptake in P-responsive wheat genotypes grown under greenhouse conditions. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 163, 393-398.
- NEUMANN, G. and V. RÖMHELD, 1999: Root excretion of carboxylic acids and protons in phosphorus-deficient plants. *Plant Soil* 211, 121-130.
- NEYROUD, J.P. and P. LISCHER, 2003: Do different methods used to estimate soil phosphorus availability across Europe give comparable results? *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 166, 422-431.
- OADES, J.M., 1978: Mucilages at the root surface. *J. Soil Sci.* 29, 1-16.
- REMUS, R., S. RUPPEL, H.J. JACOB, C. HECHT- BUCHHOLZ and W. MERBACH, 2000: Colonization behaviour of two enterobacterial strains on cereals. *Biol. Fertil. Soils* 30, 550-557.
- RENGEL, Z., 2002: Genetic control of root exudation. *Plant Soil* 245, 59-70.
- RICHERT, M., S. SAARNIO, S. JUUTINEN, J. SILVOLA, J. AUGUSTIN and W. MERBACH, 2000: Distribution of assimilated carbon in the system *Phragmites australis* - waterlogged peat soil after carbon-14-pulse labelling. *Biol. Fertil. Soils* 32, 1-7.
- RÖMER, W., 1998: Sind oberhalb von 50 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/100 g Boden schädliche Auswirkungen auf Gewässer zu erwarten? *Wasser und Boden* 50 (12), 58-62.
- RÖMER, W., 2006: Neuere Erkenntnisse zur Phosphataufnahme von Pflanzen – Literaturbefunde. *Arch. Agron. Soil Sci.* 52, 1-17.
- RÖTTSCH, A. und F. KURANDT, 1941: Reichsbodenschätzung und Reichskataster: Gesetz mit amtlicher Begründung. Durchführungsbestimmungen und Verwaltungsvorschriften nach dem neuesten Stand. Berlin: Heymann.
- RUPPEL, S., C. HECHT- BUCHHOLZ, R. REMUS, U. ORTMANN and R. SCHMELZER, 1992: Settlement of the diazotrophic, phytoeffective bacterial strain *Pantoea agglomerans* on and within winter wheat: An investigation using ELISA and transmission electron microscopy. *Plant Soil* 145, 261-273.
- RUPPEL, S., J. RÜHLMANN and W. MERBACH, 2006: Quantification and localization of bacteria in plant tissue using quantitative real-time PCR and online emission fingerprinting. *Plant Soil* 286, 21-35.
- RYAN, P.R., E. DELHAIZE and D.L. JONES, 2001: Function and mechanism of organic anion exudation from plant roots. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 52, 527-560.
- SCHILLING, G., 1997: Wissenschaftliche Grundlagen einer zeitgemäßen Düngungsberatung, Tagungsband Verband d. Landwirtschaftskammern u. d. Bundesarbeitskreises Düngung (BAD), Würzburg, 41-58.
- SCHILLING, G., 2000: Pflanzenernährung und Düngung. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- SCHILLING, G., A. GRANSEE, A. DEUBEL, G. LEZOVIC and S. RUPPEL, 1998: Phosphorus availability, root exudates, and microbial activity in the rhizosphere. *Z. Pflanzenern. Bodenk.* 161, 465-478.
- SCHLIEPHAKE, W., J. GARZ und H. STUMPE, 1997: Unverzichtbarkeit und Grenzen der Dauerdüngungsversuche - Ein Blick auf das Versuchsfeld Halle. *Arch. Acker-Pfl. Boden.* 42, 319-334.
- SCHULZE, J. and G. PÖSCHEL, 2004: Bacterial inoculation of maize affects carbon allocation to roots and carbon turnover in the rhizosphere. *Plant Soil* 267, 235-241.
- SHARLEY, A.N., J.T. SIMS and G.M. PIERZYNKI, 1994: Innovative soil phosphorus availability indices: assessing inorganic phosphorus. In: Soil testing: Prospects for improving nutrient recommendations. Special Publication 40, Soil Sci. Soc. Amer., Wisconsin, pp. 115-141.
- SHEN, H., X. YAN, M. ZHAO, S. ZHENG and X. WANG, 2002: Exudation of organic acids in common bean as related to mobilization of aluminium- and iron- bound phosphates. *Environ. Exp. Bot.* 48, 1-9.
- SIBBESEN, E., 1983: Phosphate soil tests and their suitability to assess the phosphate status of soil. *J. Sci. Food Agric.* 34, 1368-1374.
- SIMS, J.T., 1993: Environmental soil testing for phosphorus. *J. Prod. Agr.* 6, 501-507.
- STUMPE, H., J. GARZ und E. HAGEDORN, 1990: Die Dauerdüngungsversuche auf dem Versuchsfeld in Halle. In: KÖRSCHENS, M., ed.: Dauerdüngungsversuche: Übersicht, Entwicklung und Ergebnisse von Feldversuchen mit mehr als 20 Jahren Versuchsdauer, Berlin, 25-71.
- STUMPE, H., J. GARZ und H. SCHARF, 1994: Wirkung der Phosphatdüngung in einem 40jährigen Dauerversuch auf einer Sandlöß-Braunschwarzerde in Halle. *Z. Pflanzenern. Bodenk.* 157, 105-110.
- SUZUKI, Y., T. KAWAZU, T. WADA, T. HARA and H. KOYAMA, 2003: Characteristics of transgenic *Eucalyptus* hybrids with an over expression of a plant mitochondrial citrate synthase. In: Proc. 2<sup>nd</sup> International Symp. on Phosphorus Dynamics in the Soil- Plant Continuum, Perth, Australia, pp. 152-153.
- SWINNEN, J., 1994: Evaluation of the use of a model rhizodeposition technique to separate root and microbial respiration in soil. *Plant Soil* 165, 89-101.
- THEILEN, M., 1992: Einfluss langjähriger Düngung mit Schweinegülle bzw. Triplephosphat auf Bindungsformen und Verlagerung von Phosphat im Boden. Dipl.-Arb., FB Agrarwiss. Univ. Göttingen.
- TOAL, M.E., C. YEOMANS, K. KILLHAM and A.A. MEHARG, 2000: A review of rhizosphere carbon flow modelling. *Plant Soil* 222, 263-281.
- TUNNEY, H., A. BREEUWSMA, P.J.A. WITHERS and P.A.I. EHLERT, 1997: Phosphorus fertilizer strategies: Present and future. In: TUNNEY, H., O.T. CARTON, P.C. BROOKES and A.E. JOHNSTON (eds.): Phosphorus Loss from Soil to Water. CAB International, Wallingford, UK, 177-203.
- WALKER, T.S., H.P. BAIS, E. GROTEWOLD and J.M. VIVANCO, 2003: Root exudation and rhizosphere biology. *Plant Physiol.* 132, 44-51.
- WHITELAW, M.A., 2000: Growth promotion of plants inoculated with phosphate-solubilizing fungi. *Adv. Agron.* 69, 100-153.
- WITTENMAYER, L. and W. MERBACH, 2005: Plant responses to drought and phosphorus deficiency: contribution of phytohormones in root-related processes. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 168, 531-540.
- YEVDOKIMOV, I.V., R. RUSER, F. BUEGER, M. MARX and J.C. MUNCH, 2007: Interaction between rhizosphere microorganisms and plant root: 13C fluxes in the rhizosphere after pulse labeling. *Soil Sci.* 40, 766-774.
- ZHANG, F.S., J. MA and Y.P. CAO, 1997: Phosphorus deficiency enhances root exudation of low-molecular weight organic acids and utilization of sparingly soluble inorganic phosphates by radish (*Raphanus sativus* L.) and rape (*Brassica napus* L.) plants. *Plant Soil* 196, 261-264.
- ZORN, W., H. SCHRÖTER und S. WAGNER, 2007: Hohe Erträge im Pflanzenbau ohne Grunddüngung? Schriftenreihe Landwirtschaft und Landschaftspflege in Thüringen Heft 9, 49-59.

# Wurzelmethoden für die Pflanzenzüchtung

Stefan Kutschka<sup>1</sup>, Doris Schuhwerk<sup>1</sup>, Alireza Nakhforoosh<sup>1</sup>, Heinrich Grausgruber<sup>1</sup>,  
Hans-Peter Kaul<sup>1</sup>, Willibald Loiskandl<sup>2</sup> und Gernot Bodner<sup>1</sup>

## Zusammenfassung

Wurzeleigenschaften wurden in der Pflanzenzüchtung bisher kaum berücksichtigt. Die Züchtung auf Ertragspotential führte sogar zu einer tendenziellen Verringerung der Durchwurzelungsintensität. Für die Verbesserung der Toleranz gegenüber abiotischem Stress und für eine ressourceneffiziente Produktion ist die Wurzel jedoch ein zentrales Pflanzenorgan. Die Aufnahme von Wurzelparametern als Zuchtziel erfordert eine klare Definition des Zielmerkmals in Abhängigkeit des hydrologischen Regimes. Dies kann über Wurzel-Boden-Simulationsmodelle erreicht werden. Bisher existiert keine geeignete Methode zur Phänotypisierung von Wurzelsystemen unter Feldbedingungen, die ausreichende Genauigkeit mit hohem Probendurchsatz verbindet. Ausgehend von einer Übersicht über Labor- und Feldmethoden wird eine Kombination aus Modellierung, Screening-Methoden und Detailbeschreibung von vorselektierten Kandidaten vorgeschlagen, um Wurzeleigenschaften in der Züchtung zu berücksichtigen.

*Schlagwörter:* Wurzeleigenschaften, Stresstoleranz, Züchtung, Messmethoden

## Summary

Root traits are rarely considered as breeding target. Breeding for yield potential in the context of intensive agricultural management has even resulted in reduced rooting vigor of modern cultivars. However, the root is an essential plant organ to improve crop tolerance against abiotic stress as well as for a resource efficient cropping system. Consideration of root properties in breeding requires first an accurate definition of the target trait in relation to the hydrological site conditions which can be assisted by the use of root-soil simulation models. There is still no appropriate method for phenotyping root systems under field conditions that combine sufficient accuracy with the high throughput required in breeding experiments. Following a general overview of field and laboratory methods of root measurement, we propose a scheme integrating modeling, quick screening and detailed description of pre-selected candidates to include root traits in breeding programs.

*Keywords:* root traits, stress tolerance, breeding, measurement methods

## Einleitung

Die züchterische Verbesserung von Kulturpflanzen hat in Verbindung mit Veränderungen des landwirtschaftlichen Managements zu einem stetigen Ertragszuwachs im 20. Jahrhundert geführt. Seit den 1990er Jahren wurde jedoch ein Auseinanderfallen der Ertragssteigerungen und des Wachstums der Weltbevölkerung beobachtet. Die Erschließung neuen Ackerlandes ist begrenzt – Inkulturnahme marginaler Standorte würde nur wenig zu einem höheren Produktionsumfang beitragen, während gleichzeitig die Ausweitung der Anbaufläche auf Kosten schützenswerter natürlicher Ökosysteme geht. Auch die Ertragssteigerung durch Intensivierung der Produktion ist problematisch, da bereits heute intensive Produktionssysteme die Umwelt belasten, während die Verfügbarkeit der Produktionsfaktoren (Wasser, Phosphor) knapper wird und damit auch mit einer tendenziellen Steigerung der Produktionskosten einhergeht.

Demnach ist auf produktionstechnischer Seite vor allem die Steigerung der Ressourcen-Nutzungseffizienz ein wesentliches Ziel. Die Pflanzenzüchtung war über Jahrzehnte auf die Verbesserung des Ertragspotentials unter Bedingungen

optimaler Wasser- und Nährstoffversorgung konzentriert. Die künftigen Rahmenbedingungen erfordern verstärkt eine Konzentration auf Ertragsbildung und -stabilität in low-input Systemen. Im Zusammenhang mit der Verknappung von Wasserressourcen sprach LYNCH (2007) von der Notwendigkeit einer „blauen Revolution“, in der die verbesserte Wassernutzung in der Pflanzenproduktion im Zentrum steht. In diesem Zusammenhang wies er auf die Rolle des Wurzelsystems hin. WAINES und EHDAIE (2007) untersuchten züchterische Veränderungen des Wurzelsystems im 20. Jahrhundert bei Weizen. Sie konnten zeigen, dass das Zuchtziel Ertragspotential unter high-input Bedingungen indirekt zu einer Verringerung der Wurzelsystemgröße führte. Mit wenigen Ausnahmen (Reis, Kichererbse) findet sich bis heute keine systematische Züchtung auf Wurzeleigenschaften.

Die Bedeutung der Wurzel als Zuchtziel ergibt sich aus ihrer wesentlichen Rolle in der Stresstoleranz. LEVITT (1980) unterschied drei Mechanismen pflanzlicher Stresstoleranz: das zeitliche Ausweichen vor der Stressperiode, die physiologische Resistenz gegen Dehydratation der Gewebe, und die Vermeidung von Stress durch reduzierte Wasserabgabe

<sup>1</sup> Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Universität für Bodenkultur Wien, Gregor Mendel Straße 33, A-1180 WIEN

<sup>2</sup> Institut für Hydraulik und Landeskulturelle Wasserwirtschaft, Universität für Bodenkultur Wien, Muthgasse 18, A-1190 WIEN

\* Ansprechpartner: Dr. Gernot Bodner, gernot.bodner@boku.ac.at

oder verbesserte Aufnahme. Züchterisch wurde eine Anpassung der Kulturpflanzen an das Auftreten von Stress durch frühreife Sorten in Gebieten mit Sommertrockenheit erreicht. Auch Mechanismen der Stressvermeidung über physiologische Reaktionen am Blatt wurden bearbeitet, etwa die intrinsische Wassernutzungseffizienz über die Methode der Kohlenstoff-Isotop-Diskriminierung (CONDON et al. 2002). BLUM (2005) wies jedoch darauf hin, dass viele Mechanismen der Stresstoleranz zulasten der Ertragsbildung gehen. Statt der Wassernutzungseffizienz, die häufig durch einen hohen stomatären Widerstand erreicht wird (UDAYAKUMAR et al. 1998), solle daher eher die effiziente Wassernutzung im Mittelpunkt stehen (BLUM 2009). Dies wiederum rückt die Wurzel in den Mittelpunkt des Interesses.

Eine der wesentlichen Herausforderungen dabei ist jedoch die Methodik. Eine Vielzahl möglicher Parameter sowie die in der Züchtung übliche hohe Zahl an Genotypen stehen der Schwierigkeit der Beobachtung gegenüber. Im Folgenden wird eine Übersicht über Zielgrößen im Wurzelbereich gegeben sowie Methoden in Hinblick auf ihre züchterische Anwendbarkeit diskutiert. Daraus soll ein Schema für die Bearbeitung von Wurzelparametern im Kontext der Züchtung vorgeschlagen werden. Schwerpunkt für die vorliegende Arbeit bildet der Kontext Trockenstress.

## Material und Methoden

Neben einem Literaturüberblick über züchtungsrelevante Wurzelparameter und Methoden, werden ausgewählte Ansätze vorgestellt, die in Versuchen zum Vergleich von Wurzelparametern verschiedener Getreidesorten erhoben wurden. In Feldversuchen wurden dabei bildanalytische Messungen von Wurzeln aus Bodenzylindern mittels WinRhizo durchgeführt, sowie Messungen der Wurzelkapazität nach CHLOUPEK (1977). Als Labormethoden werden

Messsysteme und Auswertungsmethoden für Keimpflanzen sowie Rhizoboxsysteme für die Untersuchung ganzer Wurzelsysteme vorgestellt.

## Ergebnisse und Diskussion

### Wurzelparameter

*Tabelle 1* gibt einen Überblick über Wurzelparameter, die von züchterischer Relevanz im Zusammenhang mit verbesserter Trockentoleranz sein können.

CALDERINI et al. (1999) erwähnen, dass die züchterische Ertragssteigerung weniger von einer höheren Gesamtbio-massebildung kommt, denn von einer erhöhten Assimilatverlagerung ins Korn (Harvest Index). Demnach kann bei gleichem Assimilationspotential, die Ausbildung eines intensiven Wurzelsystems auch auf eine Assimilatkonkurrenz hinweisen, die bei wenig bearbeiteten Genotypen verstärkt jene Organe fördert, die das Überleben und Fortbestehen unter Mangelbedingungen sichern (SIDDIQUE und TENNANT 1990). *Tabelle 1* zeigt jedoch, dass zahlreiche Wurzelparameter keine negative Relation zum Ertrag erwarten lassen und sich daher als Zuchtziel für verbesserte Stresstoleranz ohne negative Ertragswirkung anbieten.

Züchterisch ergeben sich daraus mehrere Herausforderungen. Zum ersten gilt es, die genetische Variabilität eines Zielparameters festzustellen. Insofern die Wurzel bisher nur wenig in der Züchtung berücksichtigt wurde, kann erwartet werden, dass sowohl im vorhandenen Sortenspektrum als auch in genetischen Ressourcen ausreichend Variabilität vorliegt (BLUM 2010). Zum zweiten stellt sich angesichts der Vielfalt von Wurzelparametern die Frage, welcher in einer bestimmten Situation als Zuchtziel zu definieren ist, da die Effektivität eines Wurzelparameters für die Pflanzenwasserversorgung von der hydrologischen Standort-situation abhängt. Ergebnisse umfassender Wurzeluntersuchungen

**Tabelle 1: Wurzelparameter, Trockentoleranz und Ertrag\***

Parameter	Bedeutung	Referenz	Negative Ertragsbeziehung
Wurzeltiefe	Erhöhung des Bodenvolumens zur Wasseraufnahme	Kage und Ehlers (1996)	Möglich
Wurzellängen-/oberflächendichte	Wasseraufnahme aus trockenen Bodenschichten	Vamerali et al. (2003)	Möglich
Einschränkung der Seitenwurzelbildung	Vermehrte Assimilatallokation zu tiefen Wurzeln	Xiong et al. (2006)	Nein
Spezifische Wurzellänge/-oberfläche	Höhere Aufnahmefläche pro Einheit Wurzelbiomasse	Ryser (2006)	Nein
Zahl samenbürtiger Wurzeln	Assimilatinvestition in tiefgehende Wurzeln	Grando und Ceccarelli (1995)	Nein
Wurzelleitfähigkeit (radial und axial)	Zeitlicher Verlauf des Wasserentzugs	Richards und Passioura (1989)	Nein
Aquaporine	Regelung der radialen Leitfähigkeit	Javot und Maurel (2002)	Nein
Wurzelplastizität	Morphologische Stress-Anpassung	Bell und Sultan (1999)	Nein
Tiefenverteilung	Räumliche Aufteilung des Wasserentzugs	Bodner et al. (2008)	Nein
Eindringstärke	Durchwachsen von Verdichtungen	Zheng et al. (2000)	Möglich
Wurzelbiomasse	Assimilatallokation zum Wurzelsink	Siddique et al. (1990)	Ja
Wurzelkapazität	Durchwurzelungsintensität und -funktionalität	Chloupek (1977)	Möglich
Stresskompensation	Aufnahmekapazität einzelner tiefer Wurzeln	Šimunek und Hopmans (2008)	Nein
Membranstabilität	Physiologische Stabilität unter Trockenheit	Huang und Fry (1998)	Nein
Mykorrhizierungsgangrad	Erhöhung der Aufnahmefläche	Allen (2007)	Möglich
Trockenheitssignalisierung	Steuerung oberirdische Reaktionen (Stomata)	Hsiao et al. (2000)	Möglich

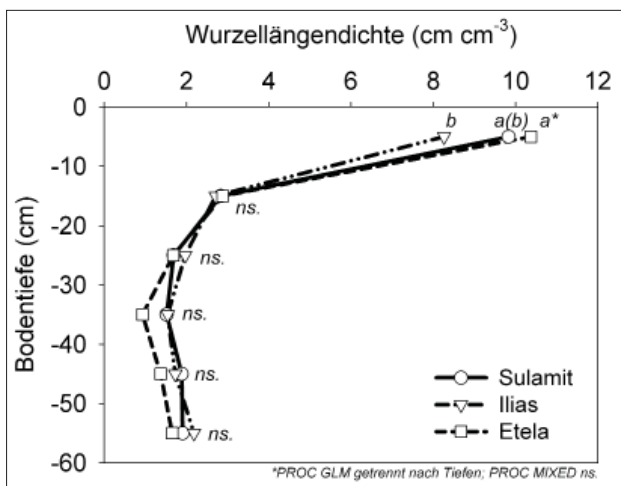
\*Die Literaturliste kann über den Autor bezogen werden.

und begleitender ökohydrologischer Modellierungsstudien zeigten, dass die natürliche Vegetation ihr Wurzelsystem auf die vorliegenden hydrologischen Bedingungen optimiert (z.B. VAN WIJK 2011, JACKSON et al. 2000). Die Nutzung ökohydrologischer Modellansätze und Optimierungshypothesen könnte zu einer standortangepassten Definition geeigneter Zielmerkmale im Wurzelsystem beitragen. Darauf folgt die wesentliche Herausforderung der Selektion aus einer potentiell hohen Vielfalt bei gleichzeitig starker Interaktion der Merkmalsausprägung mit den Umweltbedingungen (Tropismen). Die Plastizität des Wurzelsystems bedeutet hohe Genotyp-Umweltinteraktionen und damit eine besondere Bedeutung der Selektionsbedingungen. Gerade die hohe Variabilität von Niederschlägen als Merkmal eines Trockengebiets lässt die Anpassungsfähigkeit des Wurzelsystems an die aktuelle Wasserversorgung eher als gewünschte Eigenschaft erscheinen denn eine konstitutiv hohe Assimilatallokation in die Wurzel.

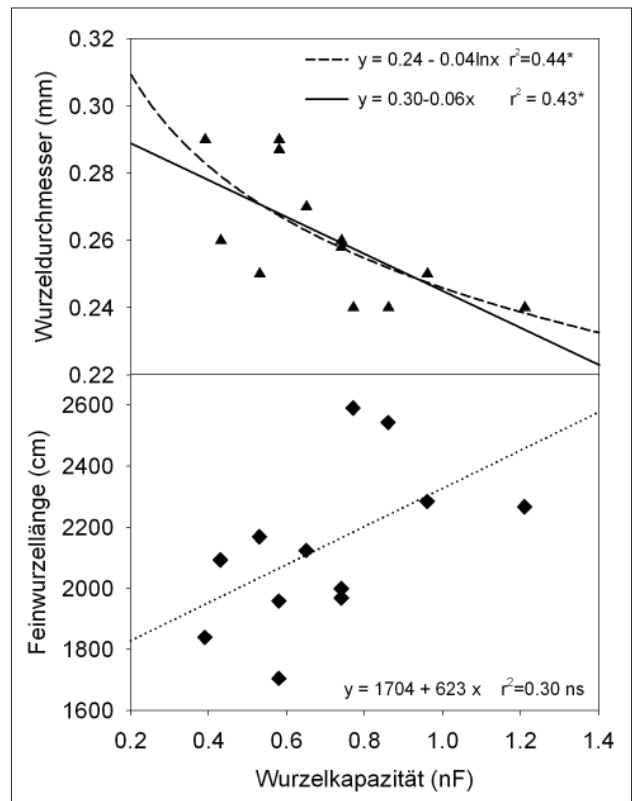
**Feldmessmethoden**

Klassische Feldmethoden der quantitativen Wurzelanalyse beruhen auf der Entnahme von Bodenproben und deren nachfolgender Bearbeitung (Auswaschung, Bildanalyse) im Labor (z.B. HIMMELBAUER et al. 2004). *Abbildung 1* zeigt ein typisches Ergebnis dieser Messmethode. Die arbeitsintensive Probenentnahme und -nachbearbeitung erfordert ein an die Kulturpflanze sowie den Standort angepasstes Beprobungsschema, um bei hoher natürlicher Boden- und Wurzelsystemheterogenität eine statistisch absicherbare Unterscheidbarkeit zu erlangen (BENGOUGHT et al. 2000).

Eine weitere Einschränkung dieser destruktiven Methode ist die Störung des Wurzelraumes und Wasserhaushaltes durch die Beprobung, was besonders auf züchterischen Kleinparzellen eine wichtige Einschränkung ist. Damit wird die Untersuchung von Wachstum und Entwicklung des Wurzelsystems weitestgehend verunmöglicht. Für dynamische Betrachtungen im Freiland bieten Minirhizotrone einen Ansatz, bei jedoch eingeschränktem Beobachtungsfeld,



**Abbildung 1: Tiefenverteilung der Wurzellängendichte von drei Winterweizen-Sorten mittels Bodenzylinderentnahme und anschließender Bildanalyse**



**Abbildung 2: Zusammenhang von Wurzelkapazität, Wurzelradius und Feinwurzellänge**

erhöhten Kosten für das Messsystem und Anfälligkeit auf Störeinflüsse durch die Zugangsrohre (z.B. JOSLIN und WOLFE 1999).

Zu den nicht-destruktiven Feldmethoden zählt die Messung der Wurzelkapazität (CHLOUPEK 1977), ein Ansatz, der spezifisch aus einem züchterischen Kontext entwickelt wurde. Sie beruht auf einer Messung der Kapazität des elektrischen Feldes zwischen einer Boden- und Pflanzenelektrode, das mit der Größe der, als zylindrischer Kondensator verstandenen, Wurzeloberfläche sowie auch mit dem Wurzelradius zusammenhängt (DALTON, 1995). Dieser Zusammenhang wird jedoch von zahlreichen anderen Faktoren beeinflusst und teilweise überlagert, die so die Korrelation des Messsignals mit direkt gemessenen Wurzelparametern erschweren (*Abbildung 2*).

Dennoch ist die Wurzelmessung auf Grundlage der elektrischen Eigenschaften im Boden-Wurzel-System ein Ansatz, an dem intensiv gearbeitet wird, um die physikalische Interpretation des Messsignals zu verbessern und mit bildgebenden Verfahren zu koppeln (z.B. AMATO et al. 2009, CAO et al. 2010). Für züchterische Ansätze im Feldversuch scheint die Weiterentwicklung dieses Ansatzes vielversprechend. Für prozessorientierte Wurzelforschung dürfte jedoch, auch bei wesentlicher Verbesserung der Signalauswertung, die erreichbare Auflösung beschränkend bleiben.

In Verbindung mit elektrischen Methoden kommt auch der Bewertung von Wassergehalts – bzw. Wasserpotentialprofilen mithilfe inverser Modellierung eine Bedeutung zu. Da sowohl elektrische Wurzel- als auch kapazitive Wassergehaltsmessung von den dielektrischen Eigenschaften des



Abbildung 3: Scan einer Rhizobox mit dem Wurzelbild von Sonnenblume

Systems ausgehen, scheint eine Verbindung dieser Ansätze über eine entsprechende Messsignalinterpretation möglich. Besonders die effektive Funktionalität der Wurzel kann über Wasserentzugsprofile bewertet werden und es könnten Ansätze aus der Geophysik (z.B. Bodenradar) Verwendung finden (ZENONE et al. 2008).

### Labormethoden

Es liegen zahlreiche Labormethoden zur Quantifizierung von stressrelevanten Wurzelparametern vor. Häufig werden Keimwurzeigenschaften bestimmt unter der Annahme, von der Ausprägung des primären Wurzelsystems auf das voll entwickelte Wurzelbild schließen zu können. Keimwurzelbildung sowie Wachstum und Architektur samenbürtiger Primärwurzeln von Jungpflanzen wurden für züchterische Fragestellungen verwendet, da sie einen hohen Probendurchsatz erlauben und die Merkmale (Zahl der samenbürtigen Wurzeln, primärer Verzweigungswinkel) eine hohe Heritabilität aufweisen (z.B. SANGUINETI et al. 2007). Verschiedene Substrate können verwendet werden, wie etwa Gel, Filterpapier oder andere poröse Materialien. Diese erlauben eine einfache und rasche Quantifizierung wichtiger primärer Wurzelparameter.

Die Untersuchung ausgewachsener Wurzelsysteme in Laborversuchen erfolgt häufig über transparente Boxen (Abbildung 3).

Diese erlauben die Messung der Wurzelarchitektur in einem zweidimensionalen System mit natürlichem Boden oder Sand als Substrat. Verschiedene Bauarten wurden publiziert, wobei das durchwurzelbare Bodenvolumen (Natürlichkeit des Systems) gegen die Sichtbarkeit an der Oberfläche (Vollständigkeit der Beobachtung) abgewogen werden muss (KUCHENBUCH und INGRAM 2002). Die Vermessung kann durch Übertragung der Wurzelbilder auf eine transparente Folie, über Scannen oder Fotografieren der Oberfläche mit anschließender Bildanalyse bis hin zur Nutzung unterschiedlicher Lichtspektren gehen (z.B. NAKAJI et al. 2008). Ein Überblick über vorhandene Software zur Quantifizierung der Wurzelparameter an transparenten Oberflächen findet sich bei LE BOT et al. (2010).

Moderne Methoden zur dreidimensionalen Abbildung von Wurzelsystemen (z.B. NMR-Imaging, Computertomographie) sind für die Untersuchung von Prozessen auf der Einzelwurzelkala sowie von Boden-Wurzelinteraktionen bedeutend, für züchterische Zwecke jedoch derzeit noch weniger zielführend, da die Detailinformation auf Kosten des möglichen Probendurchsatzes, der Größe der Versuchsgefäße als auch der Kosten geht.

Eine hauptsächliche Problematik von Labormethoden ist die Frage der Übertragbarkeit in die Feldsituation. Wenngleich manche Autoren einen Zusammenhang zwischen verbesserter Trockentoleranz im Feldversuch und Wurzeleigenschaften im Laborversuch fanden (z.B. INAGAKI et al. 2010), konnten WOJCIECHOWSKI et al. (2009) zeigen, dass das verwendete Substrat nicht nur die Ausprägung der Wurzel beeinflusste, sondern auch zu unterschiedlichen Schlussfolgerungen im Vergleich von Genotypen führen kann.

### Schlussfolgerungen

Bisher liegt keine befriedigende Methode zur Phänotypisierung von Wurzeleigenschaften im Kontext pflanzenzüchterischer Versuche vor. Insbesondere für die Feldanwendung ist ausschließlich die Verwendung indirekter Methoden möglich, wenn ein züchterisches Screening großer Populationen erforderlich ist. Damit ist eine Kombination von Ansätzen notwendig, ausgehend von Modellierung zur Bestimmung des Zielmerkmals in einer gegebenen hydrologischen Situation, über Laborscreening bzw. indirekte Feldscreening-Methoden mit hohem Durchsatz bis zur Selektion weniger Kandidaten, deren Wurzelsystem detailliert mit direkten Methoden auf Morphologie und Architektur beschrieben wird (Abbildung 4). Somit ist immer noch die Schlussfolgerung von BLUM (1988) gültig, dass Wurzelforschung in der Züchtung auf Stresstoleranz vor allem einen erklärenden Beitrag leistet, der zum Verständnis der Mechanismen beiträgt, die bekanntermaßen stresstoleranten Sorten zugrundeliegen. Dieser Einschränkung steht jedoch die potentielle Bedeutung der Wurzel für eine mit dem Ertragspotential kompatible Verbesserung der Ressourcennutzungseffizienz gegenüber. Eine Orientierung auf die Entwicklung von Messmethoden für die Pflanzenzüchtung ist daher eine zentrale Aufgabe der Wurzelforschung.



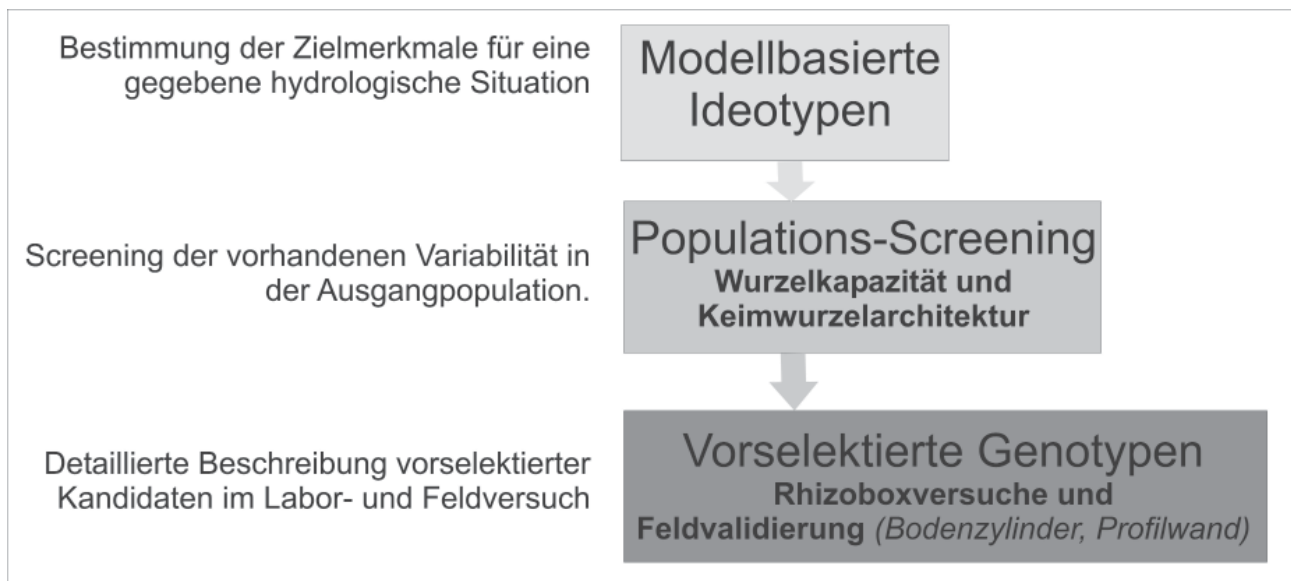


Abbildung 4: Schema für die Integration von Wurzelmerkmalen in ein Züchtungsprogramm

## Literatur

- AMATO, M., G. BITELLA, R. ROSSI, J.A. GOMEZ, S. LOVELLI and J.J. FERREIRA GOMES, 2009: Multi-electrode 3D resistivity imaging of alfalfa root zone. *Eur. J. Agron* 31, 213-222.
- BENGOUGH, A.G., A. CASTRIGNANO, L. PAGES and M. VAN NOORDWIJK, 2000: Sampling strategies, scaling and statistics. In A.L. SMIT, A.G. BENGOUGH, C. ENGELS, M. VAN NOORDWIJK, S. PELLERIN, S.C. VAN DE GEIJN (Hrsg.) *Root Methods: A Handbook*. Springer NY, 147-174.
- BLUM, A., 2005: Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential – are they compatible, dissonant, or mutually exclusive? *Aust. J. Agr. Res.* 56, 1159-1168.
- BLUM, A., 2009: Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. *Field Crops Research* 112, 119-123.
- BLUM, A., 2010: *Plant breeding for water-limited environments*. Springer NY.
- CALDERINI, D.F., M.P. REYNOLDS and G.A. SLAFER, 1999: Genetic gains in wheat yield and associated physiological changes during the twentieth century. In SATORRE E.H. und G.A. SLAFER (Hrsg.) *Wheat. Ecology and physiology of yield determination*. Haworth Press, NY., 351-378.
- CAO, Y., T. REPO, R. SILVENNOINEN, T. LETHO and P. PELKONEN, 2010: An appraisal of the electrical resistance method for assessing root surface area. *J. Exp. Bot.* 61, 2491-2497.
- CHLOUPEK, O., 1977: Evaluation of the size of a plant's root system using its electrical capacitance. *Plant Soil* 48, 525-532.
- CONDON, A.G., R.A. RICHARDS, G.J. REBETZKE and G.A. FARQUHAR, 2002: Improving intrinsic water-use efficiency. *Crop Sci.* 42, 122-131.
- DALTON, F.N., 1995: In-situ root extent measurement by electrical capacitance methods. *Plant Soil* 173, 157-165.
- HIMMELBAUER, M.L., W. LOISKANDL and F. KASTANEK, 2004: Estimating length, average diameter and surface area of roots using two different Image analyses systems. *Plant Soil* 260, 111-120.
- INAGAKI, M.N., M. MORI and M.M. NACHIT, 2010: Yield comparison for synthetic-derived bread wheat genotypes with different water uptake abilities under increasing soil water deficits. *Cereal Res. Comm.* 38, 497-505.
- JACKSON, R.B., J.S. SPERRY and T.E. DAWSON, 2000: Root water uptake and transport: using physiological processes in global predictions. *Trends Plant Sci.* 5, 482-488.
- JOSLIN, J. D. and M.H. WOLFE, 1999: Disturbances during minirhizotron installation can affect root observation data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 218-221.
- KUCHENBUCH, R.O. and K.T. INGRAM, 2002: Image analysis for non-destructive and non-invasive quantification of root growth and soil water content in rhizotrons. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 165, 573-581.
- LE BOT, J., V. SERRA, J. FABRE, X. DRAYE, S. ADAMOWICZ and L. PAGES, 2010: DART: a software to analyse root system architecture and development from captured images. *Plant soil* 326, 261-273.
- LEVITT, J. 1980: *Responses of plants to environmental stresses. V.2. Water, radiation, salt, and other stresses*. Academic Press, NY.
- LYNCH, J.P., 2007: Roots of the second green revolution. *Aust. J. Bot.* 55, 493-512.
- NAKAJI, T., K. NOGUCHI and H. OGUMA, 2008: Classification of rhizosphere components using visible-near infrared spectral images. *Plant Soil* 310, 245-261.
- SANGUINETI, M.C., S. LI, M. MACCAFERRI, S. CORNETI, F. RONDONO, T. CHIARI and R. TUBEROSA, 2007: Genetic dissection of seminal root architecture in elite durum wheat germplasm. *Ann. Appl. Biol.* 151, 291-305.
- SIDDIQUE, K.H.M. and D. TENNANT, 1990: Root:shoot ratios of old and modern, tall and semi-dwarf wheats in a Mediterranean environment. *Plant Soil* 121, 89-98.
- VAN WIJK, M.T., 2011: Understanding plant rooting patterns in semi-arid systems: an integrated model analysis of climate, soil type and plant biomass. *Global Ecol. Biogeogr.* 20, 331-342.
- WAINES, J.G. and B. EHDAIE, 2007: Domestication and crop physiology: roots of green-revolution wheat. *Ann. Bot.* 100, 991-998.
- WOJCIECHOWSKI, T., M.J. GOODING, L. RAMSAY and P.J. GREGORY, 2009: The effects of dwarfing genes on seedling root growth of wheat. *J. Exp. Bot.* 60, 2565-2573.
- ZENONE, T., G. MORELLI, M. TEOBALDELLI, F. FISCHANGER, M. MATTEUCCI, M. SORDINI, A. ARMANI, C. FERRE, T. CHITI and G. SEUFERT, 2008: Preliminary use of ground-penetrating radar and electrical resistivity tomography to study tree roots in pine forests and poplar plantations. *Funct. Plant Biol.* 35, 1047-1058.

# Root architecture modelling in heterogeneous soils - Describing root responses using a dynamic root architecture model

Daniel Leitner<sup>1\*</sup> and Andrea Schnepf<sup>1</sup>

## Zusammenfassung

Die Modellierung der Wurzelarchitektur ist wichtig um die Effizienz von Wurzelreaktionen in nährstoffarmen Szenarien zu untersuchen und Entscheidungen in der Pflanzenzucht sowie in der Bewirtschaftung zu leiten. Momentan werden Wurzelreaktionen empirisch beschrieben wobei die Wurzelarchitektur in Wasser- und Nährstofftransportmodellen eingeht. Unser Ziel eine genauere Beschreibung der Nährstoffaufnahme und der Wurzelreaktionen, was durch den Klimawandel und eine mögliche zukünftige Phosphatkrise an Bedeutung gewinnt.

In dieser Arbeit präsentieren wir eine Modellstudie, welche Konzepte der Wurzelreaktion auf heterogene Phosphatverteilung im Boden demonstriert. Wir verwenden dazu das dynamische Wurzelarchitekturmodell von LEITNER et al. (2010a). Das Wachstum des Wurzelsystems wird in einem virtuellen Topf simuliert und der Einfluss der Wurzeigenschaften auf die Gesamtaufnahme untersucht. Wurzeigenschaften sind dabei anatomische sowie morphologische Änderungen wie der Winkel zwischen Wurzeln, Gravitropismus, Chemotropismus, und die Ausbreitung der Wurzeln (z.B.: Anzahl der Seitenwurzeln, primäre Wachstumsrate). Die resultierende Phosphate (P) Konzentration wird untersucht und die kumulative Aufnahme des Wurzelsystems analysiert. Diese Daten werden mit gemessenen Werten und Literaturdaten verglichen.

Die Simulationen wurden in Matlab durchgeführt. Die partiellen Differentialgleichungen des Modells wurden in Comsol Multiphysics gelöst. Durch mathematische Modellierung hoffen wir, das Verständnis der zugrundeliegenden Prozesse zu fördern, und ein flexibles Tool für experimentelles Design zur Verfügung zu stellen.

## Introduction

Since the 1950s crops were improved by breeding for high-input agroecosystems. Extensive use of fertilizers lead to environmental problems and high production costs. Changed environmental conditions due to global warming as well as increased fertilizer costs threaten the global food supply. A further management intensification is not a sustainable option. LYNCH (2007) called for a 'Second Green Revolution' where crops are bred to improve the productivity

## Summary

Root architecture modelling is of prime importance to assess the efficiency of plant root responses under nutrient limited situations for crop growth and thereby guide breeding and management decisions. Currently, the representation of stress responses of root systems is largely empirical in macroscopic root models build into water and nutrient transport simulation tools. We aim for an accurate description of plant nutrient uptake and root system response, which is an important challenge in the light of upcoming shortages of mineral fertilizers and climate change.

In this work we will present a modelling study demonstrating concepts how plant response to heterogeneous phosphate distribution. We will use the dynamic root architecture model presented in LEITNER et al. (2010a). Root system growth is simulated in virtual pot and the impact of various root system traits to overall uptake is analysed. Root system traits will include anatomical and morphological changes such as changes in the angle between roots, gravitropism, chemotropism, and root proliferation (e.g. lateral root initiation frequency and elongation rate). The resulting phosphate (P) concentration will be investigated and the cumulative root system uptake over time will be analysed. The values are compared to measured data and literature values.

The simulations are performed using Matlab. The partial differential equations of the model are solved using Comsol Multiphysics. By mathematical modelling we hope to increase insight into underlying processes and to provide a flexible tool for experimental design.

*Keywords:* mathematical modelling, phosphate uptake, root response, root architecture

and sustainability of low-input agroecosystems. In such a breeding strategy the root architecture is crucial for the selection process. Architectural, morphological, anatomical and physiological root traits influence plant nutrient and water uptake (LYNCH 1995). However, it is difficult to quantify the effect of a specific root system trait, since plant nutrient and water uptake are influenced by complex rhizosphere processes. A deeper knowledge of the growing root system and its dynamic rhizosphere will enable us to determine suitable root system traits for management optimization.

<sup>1</sup> BOKU - University of Natural Resources and Applied Life Science, Department of Forest- and Soil Sciences, Institute of Soil Science, Peter Jordan Straße 82, A-1190 VIENNA

\* Ansprechpartner: Dr. Daniel Leitner, daniel.leitner@boku.ac.at

The root system architecture is a fundamental aspect for crop productivity. In this work we will focus on P efficiency of *B. napus*. P uptake efficiency is a current challenge due to upcoming phosphate crisis (VANACE 2003). For studying plant water and nutrient uptake, various dynamic 3-dimensional root system models were developed by DIGGLE (1988) (RootMap) and PAGES et al. (1989), which are based on a herringbone topology. LYNCH et al. (1997) (SimRoot) and SPEK (1997) (ArtRoot) extended these root growth models with focus on visualisation. PAGES et al. (2004) presented a root system model allowing different types of roots which are not strictly related to a topological order (Root Typ). The existing dynamic root growth models are mostly based on generic software, therefore it is often not apparent what the underlying equations and assumptions are. In contrast LEITNER et al. (2010a) developed a dynamic root architecture model based on L-Systems and demonstrated its use for modelling various kinds of root tropisms. In this work this approach is used to calculate root growth effected by gravitropism and restricted by the rhizotron geometry.

Root architecture models determine nutrient uptake using sink terms, which estimate the soil status, i.e. P depletion in a representative elementary volume. Sink terms are frequently based on mass flow and diffusion around a single root (BARBER 1995, TINKER and NYE 2000). Depending on the exact single root model under consideration the sink term is either solved by static approximations (YANAI 1994), analytically (DE WILLIGEN and VAN NOORDWIJK 1994a, 1994b), by asymptotic approximation (ROOSE et al. 2001, ROOSE and KIRK 2009) or by numerical methods (LEITNER et al. 2010c). More recently, multi-scale analysis and homogenisation helped to develop new sink terms (LEITNER et al. 2010b). In this work we solve the single root model numerically using Comsol Multiphysics.

We present a simulation case study where a maize root system is grown in a virtual pot. Root growth and P uptake is calculated simultaneously and spatial P distribution within the pot can be investigated. With this approach simulation results can be easily compared to experimental studies. Our simulation environment can be used to develop quantified hypothesis and aids in experimental design.

## Methods

Root system architecture was simulated using the model of LEITNER et al. (2010a). In the simulation study we will compare the efficiency of gravitropism and chemotropism in a virtual pot. Dynamic root and soil interaction is described by applying two models in turns, one for root growth and one for plant P uptake. In the following we describe the relevant part of the root architecture model and the P uptake model under consideration.

### *Root architecture modelling - Tropisms and foraging strategies*

In this work we only present the way in which tropisms are described. A complete description of the dynamic root growth model is given in LEITNER et al. (2010a).

We describe tropisms by randomly picking  $N$  different root head rotations  $(\alpha, \beta)$ , where  $\alpha$  describes a pitching rotation and  $\beta$  a rolling rotation. The angle  $\alpha$  is a normally distributed random number with mean 0 and standard deviation  $\sigma_{dx}$  which is dependent of the spatial resolution  $dx$ . The angle  $\beta$  is uniformly distributed from  $-\pi$  to  $\pi$ . From the  $N$  choices we pick the optimal pair  $(\alpha, \beta)$  regarding a specific objective functions. Therefore, in the model tropisms are characterized by the two parameters  $N$  and  $\sigma_{dx}$ . This approach has two advantages: The effect of tropisms is not depend on the spatial resolution along the root axis and the objective function can be freely chosen. In this way, different tropisms can be realised.

Gravitropism can be achieved by the objective function  $f=h_z$ , where  $h_z$  is the vertical  $z$ -component of the vector  $h$  pointing in the direction of the root tip.

Chemotropism is achieved by  $f=-s(x+dx h)$ , where  $s$  is a scalar field which contains the nutrient concentration,  $x$  is the position of the root head, and  $dx h$  is the change in root tip position. Other tropisms could be described by setting  $s(x)$  to scalar fields of water content, pressure head or temperature. Objective functions can be freely combined (e.g. by linear combination). In this way, various types of tropisms can be realised.

In many experiments like pot or rhizobox experiments, root growth is spatially bounded (DOUSSAN et al. 2006). We can bound our root growth simulations by an arbitrary geometry which is given implicitly by a signed distance function. The signed distance function determines how close a given point is to a boundary and returns a negative value if the point is outside the boundary (following PERSSON and STRANG 2004). Additionally, this provides a way to include obstacles in our model.

The following algorithm takes the spatial boundaries into account. In a first step, the rotation angles  $\alpha$  and  $\beta$  are chosen as described before. If the new root tip position does not lie within the geometric boundaries, then a new pair  $(\alpha, \beta)$  is chosen as follows: First, only  $\beta$  is chosen uniformly random between  $-\pi$  and  $\pi$  while  $\alpha$  is left unchanged. If, after a maximal number of trials  $n_\beta$ , no new valid pair  $\alpha$  and  $\beta$  has been found,  $\alpha$  is increased for a small fixed angle  $d\alpha$  and the procedure for finding an angle  $\beta$  is started again. This simple approach leads to a realistic root behaviour at the boundaries, where thigmotropism can be observed.

### *Nutrient uptake model*

We describe P uptake using Michaelis Menten kinetics. P transport around a single root is described by the axisymmetric impeded diffusion equation (BARBER 1995, TINKER and NYE 2000):

$$(\theta + b) \frac{\partial c}{\partial t} = \nabla \cdot (D_l f \theta \nabla c)$$

where  $c$  is the phosphate concentration in soil solution,  $t$  the time,  $\theta$  the constant volumetric water content,  $b$  the buffer power,  $D_l$  the diffusion coefficient in soil solution and  $f$  the impedance factor of diffusion in a porous medium. At the

root surface ( $r=a$ ), active nutrient uptake is described by Michaelis Menten kinetics

$$D_l f \theta \nabla c \cdot \mathbf{n} = -\frac{v_{max} c}{K_m + c},$$

where  $\mathbf{n}$  is the unit normal pointing away from the root surface,  $v_{max}$  is the maximal influx into the root and  $K_m$  is the Michaelis Menten constant. For P passive uptake due to water uptake can be neglected (ROOSE and KIRK 2009). At the outer boundary at the half mean inter-root distance ( $r=L/2$ ) we imply a no flux boundary condition

$$D_l f \theta \nabla c \cdot \mathbf{n} = 0.$$

Initially, we assume heterogeneous initial concentration,  $c=c_{L0}$  at the left half of the pot and  $c=c_{R0}$  at the right half at time  $t=0$ .

The partial differential equations are solved using Comsol Multiphysics. We calculate root uptake for each time ( $t$ ) and mean inter-root distance ( $L$ ) obtaining a two dimensional look up table for each class of root radii ( $a$ ).

## Results

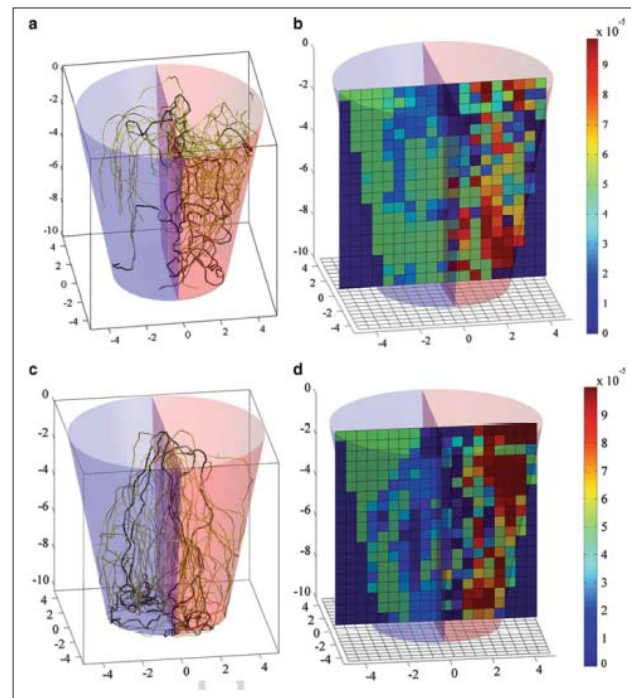
In the simulation case study we simulated two root system in virtual pots with a simulation time of 20 days. We compared the effect of gravitropism on P depletion. *Figure 1a* shows root system development due to chemotropism, while *Figure 1c* shows the development under gravitropism only. We can observe that using chemotropism the root system is much more dense in the right pot part and generally more evenly distributed. *Figure 1b,d* represents the corresponding P concentration in the virtual pots. We see that the right part of the pot with high initial P concentration is stronger depleted in the case using chemotropism (*Figure 1b*). This leads to a higher P uptake of the root system using chemotropism.

To quantify the difference between the two root system development strategies we calculated the cumulative root system P uptake over time (see *Figure 2*). After 20 days the root system with chemotropism showed an 1.5-fold increase of P-uptake.

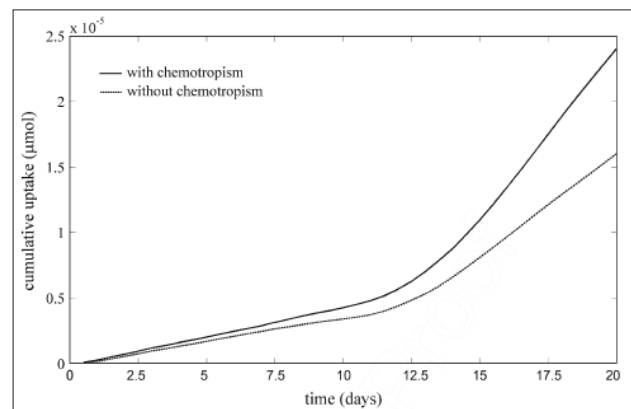
## Discussion

We presented a modelling approach to calculate P uptake of a growing root system in a virtual pot. The model is based on a simple mechanistic single root model (BARBER 1995) which is coupled to a growing root system. Because of the mechanistic nature of the model most parameters can be derived by direct measurements. The model takes the developing root system, emerging depletion zones as well as inter-root competition into account. By accurately describing these processes that hinder P uptake the model acts as lower bound for describing plant P uptake, i.e. modelled P uptake had the right magnitude but was clearly underestimated.

The reason for this is that important processes that enhance P uptake have not been included. On single root scale P



**Figure 1: Root architecture and P concentration after 20 days. The initial P concentration was  $1e-4 \mu\text{mol cm}^{-3}$  on the right half and  $5e-5 \mu\text{mol cm}^{-3}$  on the left half of the pot. (a) root system growth using chemotropism (b) soil depletion due to root system (a) (c) root system growth using gravitropism only (d) P depletion due to root system (c) (reproduced from SCHNEPF et al. 2010).**



**Figure 2: Cumulative P uptake by growing root systems, with and without chemotropism (reproduced from SCHNEPF et al. 2010).**

uptake is enhance by (a) root hairs (LEITNER et al. 2010b) (b) solubilisation due to organic acid anions (OBURGER 2011) (c) mycorrhizae and soil bacteria ALLEN (2007). The model approach can help to analyse complex biophysical systems by adding mechanisms step by step. Aim is to increase the fundamental understanding of plant nutrient uptake and root response. Analysis of root architecture traits will enable better plant breeding strategies.

In this work we presented a simulation case study where we compared different root foraging strategies (gravitropism and chemotropism). We showed that even in this simple

model settings cumulative uptake of the root systems were significantly different. In future work we plan a model validation using P rich patches in plant pots and analyse root systems in vitro using x-ray computer tomographic imaging (following TRACY et al. 2010).

The presented approach offers a framework for developing new quantified hypothesis and aids experimental design. By adding certain mechanisms we can quantify the influence of a specific root system trait on P uptake. Such a clear mechanistic description will facilitate experimental design for validation of the hypothesis.

## Acknowledgements

This work was supported by the Vienna Science and Technology Fund (WWTF, Grant No.: MA07-008).

## References

- ALLEN, M., 2007: Mycorrhizal fungi: Highways for water and nutrients in arid soils. *Vadose Zone Journal*, 6(2):291-297.
- BARBER, S.A., 1995: *Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach*. Wiley, New York.
- DE WILLIGEN, P. and M. van NOORDWIJK, 1994a: Mass flow and diffusion of nutrients to a root with constant or zero-sink uptake I. Constant uptake. *Soil Science*, 157(3):162-170.
- DE WILLIGEN, P. and M. van NOORDWIJK, 1994b: Mass flow and diffusion of nutrients to a root with constant or zero-sink uptake II. Zero-sink uptake. *Soil Science*, 157(3):171-175.
- DIGGLE, A.J., 1988: ROOTMAP - A model in three-dimensional coordinates of the growth and structure of fibrous root systems. *Plant and Soil*, 105(2):169-178.
- DOUSSAN, C., A. PIERRET, E. GARRIGUES and L. PAGES, 2006: Water uptake by plant roots: II - Modelling of water transfer in the soil root-system with explicit account of flow within the root system - comparison with experiments. *Plant and Soil*, 283(1-2):99-117.
- LEITNER, D., S. KLEPSCH, G. BODNER and A. SCHNEPF, 2010a: A dynamic root system growth model based on L-Systems. *Plant and Soil*, 332(1-2):177-192.
- LEITNER, D., S. KLEPSCH, M. PTASHNYK, A. MARCHANT, G. KIRK, A. SCHNEPF and T. ROOSE, 2010b: A dynamic model of nutrient uptake by root hairs. *New Phytologist*, 185(3):792-802.
- LEITNER, D., A. SCHNEPF, S. KLEPSCH and T. ROOSE, 2010c: Comparison of nutrient uptake between three-dimensional simulation and an averaged root system model. *Plant Biosystems*, 144(2):443-447.
- LYNCH, J., 1995: Root architecture and plant productivity. *Plant Physiology*, 109(1):7-13.
- LYNCH, J.P., 2007: Turner review no. 14. Roots of the second green revolution. *Australian Journal of Botany*, 55(5):493-512.
- LYNCH, J.P., K.L. NIELSEN, R.D. DAVIS and A.G. JABLOKOW, 1997: SimRoot: Modelling and visualization of root systems. *Plant and Soil*, 188(1):139-151.
- OBURGER, E., J. D. W. W., 2011: Phosphorus saturation and pH differentially regulate the efficiency of organic acid anion-mediated p solubilization mechanisms in soil. *Plant and Soil*, 341(1-2):363-382.
- PAGES, L., M.O. JORDAN and D. PICARD, 1989: A simulation-model of the 3-dimensional architecture of the maize root-system. *Plant and Soil*, 119(1):147-154.
- PAGES, L., G. VERCAMBRE, J.L. DROUET, F. LECOMPTE, C. COLLET and J. LE BOT, 2004: Root Typ: A generic model to depict and analyse the root system architecture. *Plant and Soil*, 258(1-2):103-119.
- PERRSON, P. and G. STRANG, 2004: A simple mesh generator in matlab. *SIAM Review*, 46(2):329-345.
- ROOSE, T., A.C. FOWLER and P.R. DARRAH, 2001: A mathematical model of plant nutrient uptake. *Journal of Mathematical Biology*, 42(4):347-360.
- ROOSE, T. and G.J.D. KIRK, 2009: The solution of convection-diffusion equations for solute transport to plant roots. *Plant and Soil*, 316(1-2):257-264.
- SCHNEPF, A., D. LEITNER, S. KLEPSCH, S. PELLERIN and A. MOLLIER, 2010: *Modelling P dynamics in the soil-plant system*. Soil Biology. Springer.
- SPEK, L.Y., 1997: Generation and visualization of root-like structures in a three-dimensional space. *Plant and Soil*, 197(1):9-18.
- TINKER, P.B. and P.H. NYE, 2000: *Solute movement in the rhizosphere*. Oxford University Press, New York.
- TRACY, S.R., J.A. ROBERTS, C.R. BLACK, A. McNEILL, R. DAVIDSON and S.J. MOONEY, 2010: The X-factor: Visualizing undisturbed root architecture in soils using X-ray computed tomography. *Journal of experimental botany*, 61(2).
- VANCE, C., 2003: Symbiotic nitrogen fixation and phosphorus acquisition. plant nutrition in a world of declining renewable resources. *Plant Physiology*, 127:390-397.
- YANAI, R.D., 1994: A steady-state model of nutrient uptake accounting for newly grown roots. *Soil Science Society of America Journal*, 58(5):1562-1571.

# Unterschiedliche Klimaeinflüsse auf das Wurzel/Sprossverhältnis, die Wurzelmorphologie und Anatomie einiger Apiaceen

Monika Sobotik<sup>1\*</sup>

## Zusammenfassung

Die Wirkung unterschiedlicher Klimaeinflüsse auf die Wurzelentwicklung wurde an einigen Apiaceen (*Daucus carota*, *Anthriscus sylvestris*, *Seseli libanotis*, *Ligusticum mutellina*, *Carum carvi* und *Peucedanum oreoselinum*) in im Boden versenkten Blechröhren untersucht. Die Versuchsstandorte erstreckten sich von der planaren (Obersiebenbrunn) über die colline (Klagenfurt), montane (Irdning) bis in die subalpine Stufe (Patscherkofel).

Das Wurzel/Spross-Verhältnis verändert sich sowohl bei Trockenheit wie auch bei Kältestress zugunsten der Wurzel. Die größten Unterschiede zeigten sich bei *Anthriscus sylvestris*. Der höchste Wert mit 13,7 wurde in Obersiebenbrunn und der niedrigste in Irdning mit 1,9 erreicht. Sehr empfindlich auf die unterschiedlichen klimatischen Bedingungen reagierte das Xylem. Dies betrifft vor allem den Anteil an großlumigen Elementen sowohl an den verschiedenen Standorten wie auch in den unterschiedlichen Bodentiefen. Am kühlest Standort am Patscherkofel war besonders auffallend, dass bereits in 2 cm Bodentiefe zahlreiche weiltumige Xylem-Leitelemente auftraten.

## Summary

The influence of different climatic conditions on root development was investigated on examples of a few Apiaceae (*Daucus carota*, *Anthriscus sylvestris*, *Seseli libanotis*, *Ligusticum mutellina*, *Carum carvi* and *Peucedanum oreoselinum*). For this reason the plants were grown in tubes of sheet. The demonstration sites ranged from the planar (Obersiebenbrunn) to the colline (Klagenfurt), from the montane (Irdning) up to the subalpine region (Patscherkofel). The root/shoot ratio changed in drought as well in cold stress in favour of the root. The biggest differences showed *Anthriscus sylvestris*. The highest value 13.7 was reached at Obersiebenbrunn and the lowest at Irdning with 1.9. The width of the xylem element reacts very sensitive on different climatic conditions. It concerns especially the part of xylem elements with great width on different sites as well as in different soil depths. At the coolest habitat on Patscherkofel it was remarkable that there were many xylem elements with great width in already 2 cm soil depth.

## Einleitung

Ziel der Untersuchungen war es, den Einfluss sehr unterschiedlicher Klimaeinflüsse auf Spross- und Wurzelentwicklung von genetisch weitgehend gleichen Pflanzen verschiedener Arten zu erfassen. Dafür wurden Standorte unterschiedlicher Höhenstufen und Arten ausgewählter Apiaceen wie *Ligusticum mutellina* und *Anthriscus sylvestris* als Beispiele kühlerer und *Daucus carota*, *Seseli libanotis* und *Peucedanum oreoselinum* als solcher wärmerer Wachstumsbedingungen gewählt.

Erste umfangreiche experimentelle Untersuchungen zur Klärung der Frage inwieweit sich genetisch einheitliches Pflanzenmaterial durch unterschiedliche Klimaeinflüsse verändert wurden bereits 1891 von KERNER v. MARILAUN angelegt. Er beobachtete folgende Veränderungen: die Tieflandformen blieben auf der Alm kleiner, bildeten weniger und schmalere Blätter, aber stärker gefärbte Blüten. Sie unterschieden sich aber deutlich von den dortigen Gebirgsformen. Ähnliche Versuche stellten BONNIER (1920) und TURESSON (1922-1931) an. BONNIER kam zu dem Schluss, dass sich der klimatische Einfluss besonders stark verändernd auswirkt. TURESSON hingegen

bewertete den Einfluss der Standortunterschiede auf die Gestalt der Pflanzen nur modifizierend. Die Versuche von CLAUSEN, KECK und HIESEY (1932) in Kalifornien konnten den Einfluss der erblichen Komponenten von jenen der Umwelt deutlich unterscheiden. Dies traf besonders auf die Ruhezeiten zu, weil sie teils erblich fixiert, teils ökologisch verursacht wurden. So konnte den Küstenformen in 1.400 m zwar eine Winterruhe aufgezwungen werden, doch behielten sie ihre ursprüngliche Sommerruhe bei. Dadurch gingen die Arten nach längstens zwei Jahren aus Mangel an Speicherstoffen zu Grunde.

## Material und Methoden

Für die vorliegende Arbeit wurden besonders die Ergebnisse herausgegriffen, die bei künftigen Untersuchungen zur Erfassung der Auswirkung des Klimawandels interessant sein könnten.

Für die Auswahl der Standorte waren die Höhenstufen und das Vorhandensein einer Wetterstation mit Bodentemperaturmessungen bis in 1 m Tiefe entscheidend. Für den Standort der subalpinen Stufe waren allerdings nur Einzelmessungen möglich. Mit den Standorten Obersiebenbrunn,

<sup>1</sup> Pflanzensoziologisches Institut, Kempfstraße 12, A-9020 KLAGENFURT

\* Ansprechpartner: Dr. Monika Sobotik, monika.sobotik@aon.at

**Tabelle 1: Seehöhe, Neigung und Klimadaten der vier Versuchsstandorte im Versuchsjahr (Sept. 80 bis Aug. 81) VJM = Versuchsjahresmittel, VJN = Versuchsjahresniederschlag**

Standorte		Obersiebenbrunn	Klagenfurt	Irdning	Patscherkofel
Lage	Seehöhe in m ü.A. Neigung in °	150 0	448 0	710 18 S	1964 0
VJM in °C	Sept. 80 – Aug. 81	8,7	8,1	6,4	2,3
VJN in mm	Sept. 80 – Aug. 81	519,4	941	1088,9	1023
Schneebedeckung Beginn Ende	9/1980–8/1981	5.11. 24.2.	3.11. 14.3.	9.10. 31.3.	8.10. 29.5.
heitere Tage	1960/61–1969/70	42,1 24	31,6 45	59,8 19	47,7 39
Tage mit Spätf.	9/1980–8/1981	15.3.–30.4. 5	15.3.–30.4. 11	31.3.–30.4. 5	schneebed.
Eistage	9/1980–8/1981	24	42	42	103
Bodentemp. 10 cm Tiefe	Messwerte Aug. 1981	Max. 26,1 Min. 14,1	Max. 29,4 Min. 11,9	Max. 26,9 Min. 13,0	Max. 12,8 Min. 5,3

**Tabelle 2: Zeit der Aussaat und der Beobachtungen während des Wachstums. ABb = Anfangsbeobachtung, ZwBd. = Zwischenbeobachtung**

Standort	Aussaat	ABb	1. ZwBd	2. ZwBd
Obersiebenbrunn	24.09.1980	26.04.1981	16.07.1981	
Klagenfurt	20.09.1980	05.05.1981	07.07.1981	30.07.1981
Irdning	25.09.1980	09.05.1981	22.07.1981	
Patscherkofel	04.09.1981	07.06.1981	12.08.1981	

Klagenfurt, Irdning und Patscherkofel erstreckten sich die vier Versuchsstandorte von der planaren über die colline und montane bis in die subalpine Stufe.

### Anlage der Versuche und Beobachtungstermine

Als Versuchspflanzen wurden einige Apiaceen verschiedener Wärmeansprüche ausgewählt (s. oben). In der vorliegenden Arbeit werden nur *Daucus carota* als wärmeliebende Art und *Anthriscus sylvestris* für etwas kühlere Ansprüche besprochen.

*Daucus carota* wurde am 28.05.1980 in Töpfen ausgesät, die Keimung erfolgte am 13.06.1980. Für die Kultur von *Anthriscus sylvestris* wurden „Kindl“ von Mutterpflanzen abgenommen und am 07.05.1980 in Töpfe gepflanzt. Bis zur Aussaat standen die *Daucus* Pflanzen im gut belüfteten Kalthaus und die *Anthriscus* Jungpflanzen im Feldbeet. Zwischen 4.9. und 25.9. erfolgte die Aussaat an den Versuchsstandorten. Es wurden jeweils 5 Pflanzen je Art und Standort gesetzt. Die Beobachtung der Pflanzen erfolgte im Frühling und Sommer und die Ausgrabung im September. Die Aussaat erfolgte in verzinkte Eisenblechrohre mit einem Durchmesser von 20 cm und einer Länge von 50 cm. Diese wurden im Boden versenkt (Abbildung 1). Die Versuchsröhren wurden je Art mit der Erde der gleichen Herkunft befüllt. Die Erde stammte jeweils von Standorten, an denen die betreffende Art an natürlichen Standorten gut gedieh. Für *Daucus carota* war es ein Braunlehm von Pürgg und für *Anthriscus sylvestris* eine Braunerde aus Irdning.

Die Blechrohre wurden je Versuchsstandort soweit es der teils felsige Untergrund des Bodens erlaubte im Abstand von 25 cm eingesenkt. Aufgrund der nach unten offenen Versuchsgefäße wurden die Pflanzen den natürlichen Witterungsbedingungen ausgesetzt. Eine Bewässerung fand nirgends statt.

### Morphologische und anatomische Untersuchungsmethoden

Das Ausgraben der Pflanzen geschah in der Weise, dass man die Rohre freilegte, durch Drehen anhob, sodass die in dem Rohr enthaltene Erdsäule mit den Wurzeln frei stehen blieb.

Aus der so freistehenden Erdsäule konnte man die Wurzeln mit einer Reißnadel durch trockene Präparation freilegen (vgl. Arbeitsverfahren bei KUTSCHERA 1960). Die räumliche Verteilung der Wurzeln in den Erdsäulen wurde durch Fotografie und Skizzen festgehalten.

Der Transport der freigelegten Pflanzen geschah in dicht verschlossenen Plastiksäcken, sodass auch nachher das Gewicht von Spross und Wurzel bestimmbar war. Anschließend konnte der oberirdische Teil gepresst und der unterirdische nach Aufquellen in 25–30 ° warmem Wasser für 2 Tage in eine Fixierlösung gelegt werden, bestehend aus 4%igem Formaldehyd, Glycerin und Wasser im Verhältnis 2:1:1 + 6 ml Eisessig je Liter Fixierflüssigkeit. Die fixierten Wurzelsysteme wurden in weitestmöglicher Annäherung an ihre ursprüngliche Lage anhand der vorher angefertigten Skizzen und Lichtbilder auf nassem schwarzem Stoff aufgelegt und aufgenäht. In diesem Zustand konnten die



Abbildung 1: Im Boden versenkte Versuchsröhren, die Leerräume zwischen den Röhren wurden wieder mit der ausgehobenen Erde ausgefüllt und über die Vegetationszeit von Unkraut freigehalten.



Abbildung 2: Freigelegtes Wurzelsystem, an Ort und Stelle. *Seseli libanotis*, einzelne unter die Röhre gewachsene Wurzeln wuchsen in Richtung der Oberfläche.

Tabelle 3: Mittelwerte der Zahl und Länge der Grundblattrosetten von *Daucus carota* und *Anthriscus sylvestris* nach der Überwinterung

Ort	Art	Zahl der Pfl.	Tag der Beobachtung	Zahl der Rosettenblätter MW	Länge der Rosettenblätter in cm MW
Obersiebenbrunn	<i>Daucus carota</i>	3	26.04.1981	6,3	12,6
Obersiebenbrunn	<i>Anthriscus sylvestris</i>	3	26.04.1981	6,4	14,2
Klagenfurt	<i>Daucus carota</i>	5	05.05.1981	6,0	7,8
Irdning	<i>Daucus carota</i>	5	09.05.1981	5,8	15,2
Irdning	<i>Anthriscus sylvestris</i>	3	09.05.1981	5,4	20,6
Patscherkofel	<i>Daucus carota</i>	5	07.06.1981	4,0	5,8
Patscherkofel	<i>Anthriscus sylvestris</i>	5	07.06.1981	3,0	13,4

Tabelle 4: Wuchshöhen zum Zeitpunkt der Wurzelfreilegung von *Daucus carota* und *Anthriscus sylvestris*

Ort	Art	Zahl der Pfl.	Tag der Freilegung	Wuchshöhe			Wurzeltiefe in cm MW
				MW	Min.	Max.	
Obersiebenbrunn	<i>Daucus carota</i>	3	24.08.1981	92,0	77	105	55
Klagenfurt	<i>Daucus carota</i>	5	06.09.1981	104,6	75	130	55
Irdning	<i>Daucus carota</i>	5	23.09.1981	143,0	112	160	70
Patscherkofel	<i>Daucus carota</i>	5	07.10.1981	36,0	24	44	35

präparierten Wurzeln gut fotografiert werden und bildeten so die Grundlage für die Auswertung in Bildtafeln. Für die anatomischen Untersuchungen konnten die auf Stoff angehängten Wurzeln an den vorgesehenen Stellen abgeschnitten und in Extrafläschchen in Fixierflüssigkeit gegeben werden. Die anatomischen Untersuchungen erfolgten einerseits jeweils von der dicksten Seitenwurzel 1. Ordnung nahe Basis in 2, 20 und 30 cm von der Basis und andererseits wurden jeweils aus den gleichen Bodentiefen ähnlich dicke Wurzeln von verschiedenen Wurzeln ausgewählt. Als Beispiel für die anatomischen Untersuchungen wurde nur *Daucus carota* ausgewählt. Die anatomische Untersuchung der Versuchspflanzen erfolgte anhand von 15–20 µm dicken Mikrotomschnitten von fixiertem Material.

## Ergebnisse

### Beobachtung der Versuchspflanzen nach der Überwinterung

Von *Daucus carota* überwinterten von fünf je Standort ausgesetzten Pflanzen mit Ausnahme von zwei Pflanzen in

Obersiebenbrunn alle. Mehr Ausfälle gab es bei *Anthriscus sylvestris* und zwar überwinterten nur am Patscherkofel alle. Auf den anderen Standorten überwinterten überall nur drei Pflanzen. Bei der Grundblattrosette von *Daucus carota* und *Anthriscus sylvestris* war deutlich, dass mit zunehmendem Jahresmittel die Zahl der entfalten Blätter deutlich zunahm. Hinsichtlich der Länge der Blätter waren die vom Patscherkofel am kürzesten, die längsten Blätter waren bei beiden Arten in Irdning zu finden.

Die höhere Oberbodenfeuchte und die geringe Zahl der Tage mit Spätfrösten sowie das höhere Temperaturminimum zur Zeit der Entwicklung der Blätter im Vergleich zu Klagenfurt förderte in Irdning das Längenwachstum. In Obersiebenbrunn waren zwar gleich viele Tage mit Spätfrösten, aber die zeitweise höhere Oberbodentrockenheit, die z.T. auch durch häufigen Wind bedingt ist, dürfte sich auf eine Hemmung des Längenwachstums ausgewirkt haben.

Bei der Wuchshöhe von *Daucus carota* liegen die niedrigsten Werte am Patscherkofel, gefolgt von Obersiebenbrunn, Klagenfurt und Irdning. Die Höchstwerte in Irdning fallen zusammen mit den größten Blattlängen.





Abbildung 3: *Daucus carota*

Zur Wurzeltiefe kann nur so viel gesagt werden, dass sie mit Ausnahme am Patscherkofel noch in den Untergrund unter den Versuchsröhren reichte. Am Patscherkofel erreichte keine Pflanze die Versuchsröhrentiefe von 30–40 cm.

### *Morphologie Wurzel*

#### *Räumliche Anordnung*

Die räumliche Anordnung der Wurzelsysteme bei Gefäßversuchen verwischt die sonst bei großen Standortsunter-

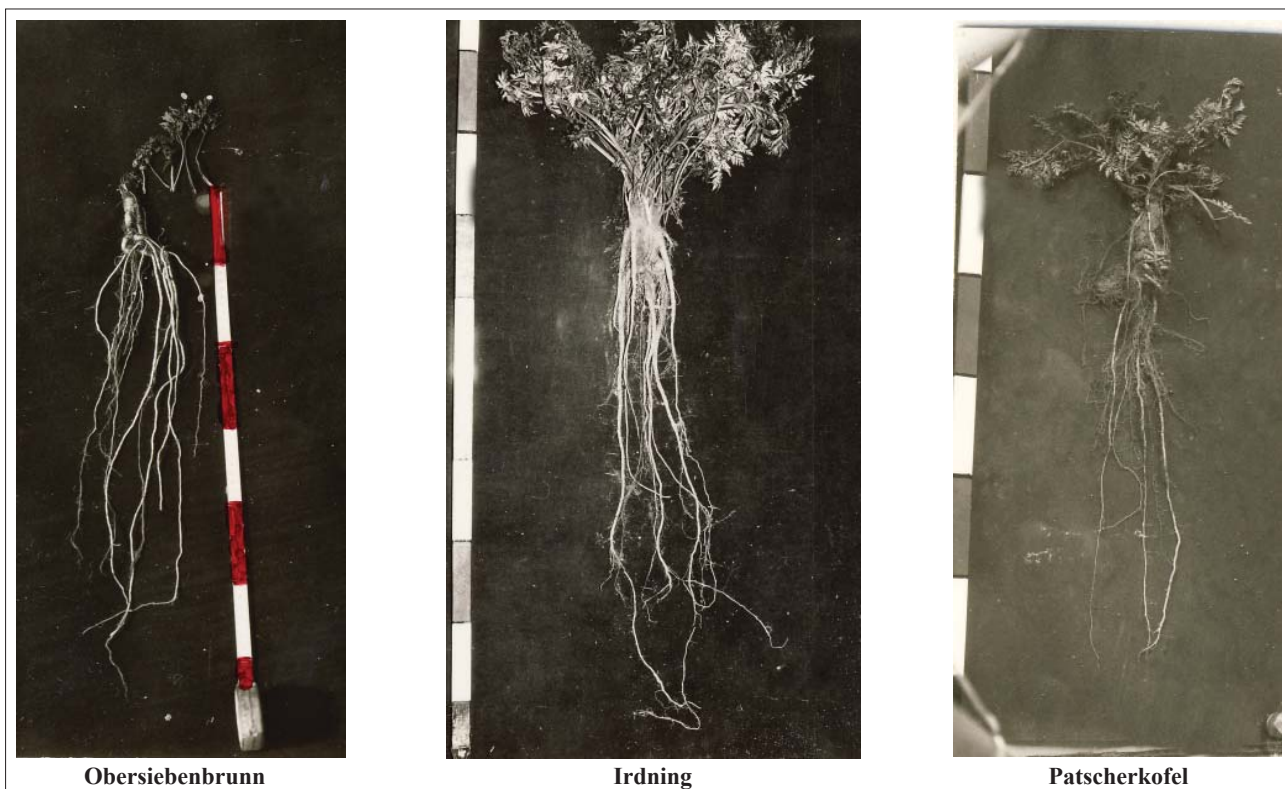


Abbildung 4: *Anthriscus sylvestris*

schieden feststellbaren Verschiedenheiten der räumlichen Wurzelverteilung auf natürlich gewachsenem Boden. Daher können auch bei diesem Versuch keine ökologisch gesicherten Aussagen über Unterschiede in der räumlichen Wurzelverteilung gemacht werden.

Einige Merkmale sind trotzdem erkennbar. So ist die zylindrische Anordnung der Wurzeln in Obersiebenbrunn am deutlichsten erkennbar. Auffallend ist auch, dass der Unterschied zwischen der Dicke der Polwurzel und der stärksten Seitenwurzel verhältnismäßig gering ist. Der auffallendste Unterschied der räumlichen Anordnung der Wurzelsysteme am Patscherkofel gegenüber jener auf wärmeren Standorten liegt in der starken Verkürzung der Wurzelsysteme, obwohl der Boden in den Röhren ein weiteres Tiefenstreben ermöglicht hätte. Andererseits konnten sich die Seitenwurzeln infolge des geringen Durchmessers der Versuchsröhren nicht wie es im subalpinen Raum an natürlich gewachsenen Böden zumeist der Fall ist, weiter ausdehnen.

#### *Dicke von Wurzelhals, Polwurzel und Seitenwurzel*

Die Dicke des Wurzelhalses ist infolge des durch Wassermangel oder durch Kälte gehemmten Wachstums der Pflanzen in Obersiebenbrunn und am Patscherkofel im Durchschnitt geringer als in Klagenfurt und Irdning. In Obersiebenbrunn und Irdning hat jedoch der größte Teil der Seitenwurzeln eine Dicke von 2,1–5,0 mm bzw. 2,1–6,5 mm. Am Patscherkofel hingegen die zahlreichen Seitenwurzeln nur eine Stärke von 0,1–2,0 mm. In dem kühlen Gebiet vertrocknen auch die feinen Seitenwurzeln nahe der Oberfläche nicht.

#### *Frischgewichte von Wurzel und Spross von Daucus carota und Anthriscus sylvestris*

Die beiden Arten unterscheiden sich schon dadurch sehr, dass bei *Daucus* alle Pflanzen im Jahr der Freilegung der Wurzeln zur Blüte kamen und bei *Anthriscus sylvestris* keine. Dadurch weist das Verhältnis von Wurzel und Spross bereits extreme Unterschiede auf. Das niedrigste Verhältnis von Wurzel und Spross wird bei den Arten in Irdning erreicht. Die für beide Arten ungünstigeren Klimabedingungen zeigen sich in einer Zunahme der Wurzelmasse. WERGER (1982) weist auf diese Strategie zur Überdauerung ungünstiger Wuchsbedingungen hin. In Obersiebenbrunn litt *Anthriscus* unter der Trockenheit am meisten. Am Patscherkofel hingegen litt *Daucus carota* deutlich mehr aufgrund der kühleren Witterungsbedingungen.

#### *Wurzelanatomische Untersuchungen am Beispiel von Daucus carota*

Deutlich unterscheidet sich die Größe der leitenden Xylem-Leitelemente so wie ihre Anordnung. Die anhaltende Kühle am Patscherkofel führte zur Bildung weitlumiger Elemente von nahezu gleicher Größe im gesamten Holzteil sowie zu einem geringen Anteil an Parenchymgewebe. In 2 cm Tiefe nimmt die Größe der Elemente des Xylems nur geringfügig ab. In 20 und 30 cm Tiefe unterbleibt diese Abnahme. Auf den übrigen drei Standorten kommt es hingegen zu einer weitgehenden Abnahme der größeren Elemente im äußersten Teil des Xylems, der zudem eine große Breite erreicht. Die Wurzeln von Irdning und Klagenfurt unterscheiden sich von denen in Obersiebenbrunn durch eine allmähliche Abnahme der Größe der Xylem-Leitelemente von innen nach außen.

Tabelle 5: Frischgewicht von Wurzel und Spross von *Daucus carota* und *Anthriscus sylvestris*

Ort	Art	Zahl d. Pfl.	Tag d. Freilegung	F-Gewicht in g Wurzel			Spross			WG SpG MW
				MW	Min.	Max	MW	Min.	Max	
Obersiebenbrunn	<i>Daucus carota</i>	3	24.08.	7,6	+7,4	-6,8	45,4	+59,7	-32,2	0,16
Obersiebenbrunn	<i>Anthriscus sylvestris</i>	3	24.08.	42,6	+60,6	-21,6	4,0	+6,1	-2,5	10,70
Irdning	<i>Daucus carota</i>	5	23.09.	23,3	+40,8	-12,5	243,2	+385,7	-160,4	0,10
Irdning	<i>Anthriscus sylvestris</i>	4	23.09.	112,0	+233,1	-50,7	58,0	+87,8	-14,5	1,90
Patscherkofel	<i>Daucus carota</i>	5	7.10.	3,0	+4,4	-1,3	17,4	+25,9	-5,7	0,20
Patscherkofel	<i>Anthriscus sylvestris</i>	4	7.10.	21,9	+38,0	-9,3	3,7	+6,1	-1,7	6,00

Tabelle 6: Durchschnittliche Fläche der leitenden Xylemelemente von Seitenwurzeln 1. Ordnung in den Bodentiefen 2, 20 und 30 cm, angegeben in  $\mu\text{m}^2$  je Einheitsquadrat und Berechnung des T-Testes. XE = Xylemelemente.

Bodentiefe in cm	Ø Fläche der XE in $\mu\text{m}^2$	T-Wert Unterschiedswahrscheinlichkeit in %		
		2 cm	20 cm Tiefe	32 cm
2	1.165,4		-4,66 -99,9%	-4,97 99,9%
20	2.783,9			-1,88 94,0%
32	3.995,4			

Im trockenen Gebiet von Obersiebenbrunn verursacht hingegen die Zunahme der Trockenheit eine sprunghafte Abnahme der Weite der Xylem-Leitelemente. Auffallend war die Zunahme der Weite der Xylem-Leitelemente mit der Tiefe. Die durchschnittliche Fläche sowie die Anzahl der leitenden Xylem-Leitelemente je Flächeneinheit wurde mit Hilfe der Bildanalyse bestimmt.

## Diskussion der Ergebnisse

Die vorliegenden Untersuchungen zeigen, dass folgende Parameter witterungsabhängig sind: Zahl und Länge der Rosettenblätter, Wuchshöhe, Dicke des Wurzelhalses, der Pol- und Seitenwurzeln, Frischgewicht von Wurzel und Spross, Größe und Verteilung der Xylem-Leitelemente. Weitere Parameter sind: Verzweigungsgrad des Sprosses, Zahl der Blütendolden, Verzweigungswinkel der Seitenzweige, Reife der Samen, Größe und Zahl der Sekretgänge an vergleichbaren Wurzelquerschnitten. Für die Artenauswahl zur Anreicherung von C im Boden könnten Arten mit einem hohen Wurzel-Spross-Verhältnis hilfreich sein. Dieses könnte anhand ähnlicher Versuche ermittelt werden.

Eine wichtige Ergänzung wäre die Bestimmung der Wurzeltiefen zu den verschiedenen Beobachtungsterminen. Die Zahl der Versuchspflanzen müsste sich allerdings verdreifachen. Die Bestimmung des Tiefenwachstums zu diesen

Zeitpunkten wäre sehr aufschlussreich. Auch könnte in Versuchsröhren mit einer Länge von 1 m das Tiefenwachstum besser verfolgt werden. Der Gefäßdurchmesser muss den zu untersuchenden Arten angepasst werden. Inwieweit Parameter des oberirdischen Wachstums oder auch bestimmte anatomische Merkmale der Seitenwurzeln aus dem oberen Bereich korrelieren, damit sie für die Berechnungen der wahrscheinlichen Wurzeltiefen eingesetzt werden können, müssten weitere Versuche klären.

## Literatur

- BONNIER, G., 1920: Nouvelles observations sur les cultures experimentales a diverses altitudes. Rev. Gén. Bot. 32: 305-326.
- CLAUSEN, J., D.D. KECK and W.M. HIESEY, 1941: Regional differences in plant species. The Amer. Naturalist 75/231-250.
- KERNER von MARILAUN, A., 1891: Pflanzenleben. – Bibliographisches Institut, Leipzig und Wien, Bd. II, 896 S.
- KUTSCHERA, L., 1960: Wurzelatlas mitteleuropäischer Ackerunkräuter und Kulturpflanzen. DLG-Verlag, Frankfurt/Main, 574 S.
- SOBOTIK, M., 1982: Ökologische, morphologische, anatomische Untersuchungen am Beispiel einiger Apiaceen. Diss. Univ. Salzburg, 1-105.
- TURESSON, G., 1922-1931: Arbeiten in Hereditas 3, 4, 6, 7, 14, 15.
- WERGER, M.J.A., 1982: Wurzel/Spross-Verhältnis als Merkmal der Pflanzenstrategie. In: Böhm, W., Kutschera, L., Lichtenegger, E. (eds.) Wurzelökologie und ihre Nutzenanwendung: 323-334. BVA Gumpenstein, Irdning.

# Einfluss einer Nutzungsintensivierung auf Wurzelmasse und Wurzelverteilung im Grünlandboden

Andreas Böhner<sup>1\*</sup> und Markus Herndl<sup>1</sup>

## Zusammenfassung

Um die Auswirkungen einer Nutzungsintensivierung auf die Wurzelmasse und räumliche Wurzelverteilung im Grünlandboden unter praxisnahen Verhältnissen feststellen und bewerten zu können, wurden innerhalb einer relativ intensiv genutzten Kulturweide eine Trittgemeinschaft, eine Weidemeinschaft und eine Weidezaunemeinschaft im Hinblick auf ihre chemischen und physikalischen Bodeneigenschaften, Pflanzenartenzusammensetzung und unterirdische Phytomasse vergleichend untersucht.

Die Wurzelmasse und die räumliche Wurzelverteilung im Grünlandboden sind Bioindikatoren für die Nutzungsintensität. Ein verdichteter, nährstoffreicher Boden fördert flachwurzelnde Pflanzenarten mit geringerer Wurzelmasse. Eine Intensivierung der Grünlandbewirtschaftung bewirkt somit vor allem durch Änderungen in der Artenzusammensetzung des Pflanzenbestandes eine Verminderung der unterirdischen Phytomasse und gleichzeitig auch eine relativ stärkere Anreicherung in der Tiefenstufe 0-5 cm. Daraus resultiert eine ungleichmäßige Wurzelverteilung im Boden. Die möglichen ökologischen Konsequenzen für den Standort und das Pflanzenwachstum werden diskutiert. Über die Bedeutung von Weidezäunen für die Vegetationsstypenvielfalt und Phytodiversität in der Kulturlandschaft wird ausführlich berichtet.

*Schlagwörter:* Trittgemeinschaft, Weidemeinschaft, Weidezaunemeinschaft, Pflanzenartenzusammensetzung, chemische und physikalische Bodeneigenschaften, unterirdische Phytomasse

## Summary

The aim of this study was to examine the effects of an intensification of grassland management on the below-ground phytomass and the distribution of roots in the soil profile. Therefore, within a permanent pasture we investigated three different vegetation types, representing different levels of disturbance and nutrients in the soil: (1) a plant community of an intensively trampled habitat which has been developed near the entry of the pasture on a compacted, nutrient-rich soil, (2) a plant community of a grazed habitat in the middle of the pasture on a compacted, nutrient-rich soil and (3) a plant community on an uncompacted, nutrient-poor soil located under the fence. This habitat is characterized by grazing without cattle trampling.

The below-ground phytomass and the distribution of roots in the soil profile are bioindicators for the intensity of grassland management. A compacted, nutrient-rich soil favors shallow-rooted plant species with a smaller below-ground phytomass. An intensification of grassland management cause a change in the plant species composition of the vegetation, leading to a decrease in below-ground phytomass, to a marked accumulation in the uppermost 5 cm of the grassland soil and to a less uniform root distribution in the soil profile. The possible ecological consequences both for the site and the plant growth will be discussed. Furthermore, we report on the importance of fences for the diversity of vegetation types and plant species richness in the cultural landscape.

*Keywords:* trampled habitat, grazed habitat, untrampled habitat under the fence, plant species composition, soil chemical and physical properties, below-ground phytomass

## Einleitung

Auf Grund geänderter sozioökonomischer Rahmenbedingungen sind im österreichischen Berggebiet zurzeit zwei gegenläufige Trends zu beobachten: Intensivierung der Grünlandbewirtschaftung einerseits und Bewirtschaftungsaufgabe andererseits. Vor allem Grünlandflächen mit höherem Ertragspotenzial, günstigen Geländebedingungen und guter Erreichbarkeit werden in Zukunft vermutlich intensiver genutzt. Hofferne, schwer erreichbare oder auf Grund der Hangneigung und Geländebedingungen schwer zu bewirtschaftende Flächen hingegen werden möglicherweise bald nicht mehr gemäht oder beweidet und vor allem mit Fichten aufgeforstet. In jenen Regionen, wo für

die Vegetation die Temperatur und die Länge der Vegetationsperiode die begrenzenden klimatischen Faktoren sind, dürfte auch der Klimawandel allmählich zu einer Nutzungsintensivierung führen. Eine Intensivierung der Grünlandbewirtschaftung bewirkt eine Verminderung der Pflanzenartenvielfalt (Phytodiversität), einen Verlust an Rote Liste-Arten (seltene bzw. gefährdete Pflanzenarten), eine Uniformierung der Phytozönose, einen Rückgang von Pflanzengesellschaften des Extensivgrünlandes und letztendlich einen Attraktivitätsverlust der Kulturlandschaft (BOHNER 2007). Insbesondere durch die Arbeiten von KLAPP (1943, 1971) und KMOCH (1952) ist nachgewiesen, dass eine Nutzungsintensivierung auch Auswirkungen auf die unterirdische Phytomasse hat.

<sup>1</sup> Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein (LFZ), Abt. Umweltökologie, Raumberg 38, A-8952 IRDNING

\* Ansprechpartner: Dr. Andreas Böhner, andreas.boehner@raumberg-gumpenstein.at

Die Pflanzenarten unterscheiden sich sowohl in der Wurzelmasse als auch im Wurzeltiefgang (KLAPP 1943). Gräser haben im Allgemeinen eine größere Wurzelmasse als Leguminosen und die Mehrzahl der Kräuter; sie durchwurzeln daher den Boden intensiver (KMOCH 1952, KULLMANN 1957). Die Wurzelmasse und der Wurzeltiefgang sind bei Untergräsern in der Regel geringer als bei Obergräsern (KMOCH 1952, KLAPP 1971). Auf Grund dieser artspezifischen Unterschiede weisen die einzelnen Vegetationstypen grundsätzlich verschiedene Wurzelmassen und Tiefen der Durchwurzelung auf (KLAPP 1943). Neben der Pflanzenartenzusammensetzung, den Bodeneigenschaften und Klimaverhältnissen (LICHTENEGGER 1983, 1997) werden die Wurzelmasse und die räumliche Wurzelverteilung im Boden entscheidend von der Intensität der Grünlandbewirtschaftung beeinflusst. Je häufiger eine Nutzung durch Mahd oder Beweidung erfolgt, desto geringer werden Wurzelmasse und Wurzeltiefgang (KLAPP 1943, 1971, KMOCH 1952, SCHULZE und MUES 1961, SOBOTIK 1989). Die unterirdische Phytomasse nimmt dabei nicht gleichmäßig in allen Tiefen ab, sondern besonders stark in tieferen Bodenschichten. Vor allem bei intensiver Beweidung verringert sich die Wurzelmasse und sie verlagert sich noch stärker in die oberste Bodenschicht (KMOCH 1952, KLAPP 1971). Daher weisen intensiv genutzte Weidelgras-Weiden eine geringere Wurzelmasse auf als extensiv genutzte Rotschwingel-Straußgras-Weiden (KMOCH 1952). Die Verminderung der Wurzelmasse und Durchwurzelungstiefe infolge intensiver Nutzung erfolgt primär durch Änderungen in der Pflanzenartenzusammensetzung im Grünlandbestand; flachwurzelnde Arten mit geringerer Wurzelmasse werden durch Nutzungsintensivierung in der Regel gefördert (KLAPP 1951, SOBOTIK 1989). Die Verminderung des Wurzelwachstums durch intensive Nutzung tritt aber auch bei Einzelpflanzen einer Art in Erscheinung (KLAPP 1951).

Auch die Düngung vermindert die Wurzelmasse in erster Linie durch Änderungen in der Pflanzenartenzusammensetzung im Grünlandbestand (SCHULZE und MUES 1961, SPEIDEL 1986, BOHNER 1998). Die Düngung fördert insbesondere das Sprosswachstum. Daher können in nährstoffreichen Böden weniger Assimilate an die Wurzeln abgegeben werden als in nährstoffarmen Böden (KLAPP 1971). Arten, die auf nährstoffarmen Böden wachsen (Margerkeitszeiger) investieren stärker in das Wurzelwachstum als Arten von nährstoffreichen Böden (MARSCHNER 1998), folglich sind nährstoffreiche Ökosysteme in der Regel durch eine geringere Wurzelmasse und ein höheres Spross-Wurzel-Verhältnis als nährstoffarme Ökosysteme charakterisiert (WERGER 1983). Hinzu kommt, dass in nährstoffreichen Böden die Zersetzung der abgestorbenen Wurzeln rascher erfolgt als in nährstoffarmen Böden (KMOCH 1952). Dies führt ebenfalls zu niedrigeren Wurzelmassen in nährstoffreichen Böden.

Die Lagerungsdichte eines Bodens beeinflusst maßgeblich seine Durchlüftung und seinen mechanischen Eindringwiderstand. Die Wurzeln bevorzugen für ihr Wachstum einen lockeren Boden, weil für ein ungehindertes Wurzelwachstum ein ausreichender Gasaustausch erforderlich ist (MOHR 1980). Die Wurzelmasse, Wurzellänge und Wurzeloberflä-

che werden in der Regel durch Bodenverdichtung reduziert (BERGMANN 1954, KEITA und STEFFENS 1989). Die Verminderung des Wurzelwachstums in verdichteten Böden wird auf den erhöhten mechanischen Eindringwiderstand und auf den gehemmten Gasaustausch zurückgeführt (MOHR 1980, HELAL 1991).

Inwieweit diese Forschungsergebnisse auch für das Grünland im österreichischen Berggebiet Gültigkeit haben, ist vorerst schwer zu beurteilen, da die Auswirkungen einer Nutzungsintensivierung auf die Wurzelmasse und räumliche Wurzelverteilung im Grünlandboden bisher noch unzureichend mit Daten aus diesem Landschaftsraum dokumentiert sind. In der vorliegenden Arbeit soll auf Grund der Literatur und einer eigenen Untersuchung diese Thematik behandelt werden. Dazu wurde allerdings kein Versuch angelegt. Es werden im Rahmen dieser Arbeit vielmehr Daten ausgewertet, die für eine ganz andere Fragestellung erhoben wurden. Die Untersuchung war ursprünglich für Biodiversitätsfragen in der Kulturlandschaft konzipiert. Das Ziel war die Erfassung und Analyse der Pflanzenartenvielfalt in Abhängigkeit von den aktuellen Umweltbedingungen. Dabei wurden auch eine Trittpflanzengesellschaft, eine Weidegesellschaft und eine Weidezaungesellschaft im Sinne von VOLLRATH 1970 vergleichend untersucht. Ihre Standorte wurden mittels detaillierter Standortuntersuchungen vegetationsökologisch charakterisiert; außerdem wurde die ober- und unterirdische Phytomasse bestimmt. Die Ergebnisse eines Teiles dieser Biodiversitätsstudie erscheinen uns bedeutsam genug, um hier mitgeteilt zu werden.

## Material und Methoden

### *Untersuchungsmethoden*

Um die Auswirkungen einer Nutzungsintensivierung auf die Wurzelmasse und räumliche Wurzelverteilung im Grünlandboden unter praxisnahen Verhältnissen feststellen und bewerten zu können, wurden innerhalb einer relativ intensiv genutzten Kulturweide eine Trittgengesellschaft, eine Weidegesellschaft und eine Weidezaungesellschaft im Hinblick auf chemische und physikalische Bodeneigenschaften, Pflanzenartenzusammensetzung und unterirdische Phytomasse vergleichend untersucht. Die räumlich eng beinander liegenden Vegetationstypen unterschieden sich nur in der Häufigkeit der Störung durch Tritt und Verbiss sowie in der Nährstoffzufuhr durch Düngung und Exkremate der Weidetiere. Der klimatische, orographische, lithologische und pedologische Ausgangszustand war weitgehend identisch. Differenzen hinsichtlich Pflanzenartenzusammensetzung, unterirdischer Phytomasse sowie physikalischer und chemischer Bodeneigenschaften können bei diesem Biotopvergleich in erster Linie auf die unterschiedliche Düngungszufuhr und Häufigkeit der Störung zurückgeführt werden. Methodisch handelte es sich bei dieser Untersuchung um eine Direkte Gradientenanalyse im Sinne von GLAVAC (1996). Innerhalb der Kulturweide wurden insgesamt fünf Untersuchungsflächen räumlich getrennt in Form eines Profils angeordnet. Die Untersuchungsfläche der Trittgengesellschaft befand sich beim Weideeingang. Sie repräsentiert ein häufig betretenes und stark mit Harn und

Kot der Weidetiere gedüngtes Ökosystem. Die drei Untersuchungsflächen der Weidegesellschaft waren repräsentativ für die eigentliche Weidefläche. Die Kulturweide grenzt im Süden an eine extensiv genutzte Mähwiese. Die Abgrenzung erfolgt durch einen fixen Elektrozaun mit Stahldraht. Daher wird der Aufwuchs unterhalb des Weidezaunes nur von einer Seite her abgeweidet, und zwar in jener Zeit, während der sich die Rinder auf der Weide befinden. Die Untersuchungsfläche der Weidezaungesellschaft repräsentiert somit ein nicht betretenes, ungedüngtes oder nur sehr schwach gedüngtes aber regelmäßig abgeweidetes Ökosystem. Sie dient als Referenzfläche für die Beurteilung des Einflusses der Düngung und Trittwirkung der Weidetiere auf ein Grünland-Ökosystem. Die Weidezaungesellschaft hat eine Breite von etwa 50 cm. Die Untersuchungsfläche befand sich in der Mitte des Weidezaunes; sie war repräsentativ für den Weidezaunbereich.

Die Vegetationsaufnahmen wurden nach der Methode Braun-Blanquet (BRAUN-BLANQUET 1964) durchgeführt. Die Artmächtigkeit wurde allerdings nach einer modifizierten Skala geschätzt. Die Braun-Blanquet-Klassen 1-5 wurden jeweils in drei Subklassen unterteilt (z.B. 1a = 1.0-1.9 % Deckung; 1 = 2.0-3.9 % Deckung; 1b = 4.0-5.0 % Deckung). Die drei Aufnahmeflächen der Weidegesellschaft hatten jeweils eine Größe von 50 m<sup>2</sup> (5 x 10 m), die Aufnahmefläche der Trittgemeinschaft betrug 24 m<sup>2</sup> (3 x 8 m) und jene der Weidezaungesellschaft musste auf 10 m<sup>2</sup> (0,5 x 20 m) beschränkt werden. Alle Vegetationsaufnahmeflächen waren nach feldbodenkundlichen Kriterien weitgehend homogen. Es wurden nur Farn- und Blütenpflanzen erhoben. Die Taxonomie und Nomenklatur richtete sich nach FISCHER et al. (2008). Die syntaxonomische Einordnung der Vegetationsaufnahmen orientierte sich an MARSCHALL und DIETL (1976), MUCINA (1993) sowie ELLMAUER und MUCINA (1993).

Die Bodenansprache erfolgte aus dem Bohrstock (1 m) und durch Spatendiagnose. Um das Nährstoffangebot an den einzelnen Standorten abschätzen zu können, wurden auch Bodenanalysen durchgeführt. Da für die Pflanzen die Nährstoffgehalte in der obersten, am stärksten durchwurzelten Bodenschicht entscheidend sind (MARSCHNER 1998), wurden die Bodenproben für die chemischen Analysen von den Aufnahmeflächen an jeweils fünf Terminen aus der Tiefenstufe 0-10 cm (A-Horizont) in Form einer repräsentativen Mischprobe gezogen. Die Bodenproben wurden luftgetrocknet, homogenisiert und bei 2 mm Maschenweite gesiebt. Die Analysemethoden richteten sich nach der jeweiligen ÖNORM (pH-Wert in einer 0,01 M CaCl<sub>2</sub>-Lösung mittels pH-Meter; elektrische Leitfähigkeit konduktometrisch; organischer Kohlenstoff und Gesamt-Stickstoff durch trockene Verbrennung mittels Elementaranalyse; nachlieferbarer Stickstoff mit Hilfe der Bebrütungsmethode; Phosphor und Kalium mit der Calcium-Acetat-Lactat [CAL]-Methode mittels SFAS Autoanalyser; austauschbare mineralische Kationenbasen, Kationensäuren und effektive Kationenaustauschkapazität im 0,1 M BaCl<sub>2</sub>-Extrakt mittels ICP-OES und AAS; Korngrößenverteilung des Feinbodens nach KÖHN). Lagerungsdichte und Porenvolumen wurden an den Aufnahmeflächen in achtfacher Wiederholung für die Bodentiefen 0-5, 5-10 und 10-15 cm nach HARTGE und HORN (1989) analysiert.

Die landwirtschaftlich nutzbare oberirdische Phytomasse wurde durch Mahd der einzelnen Aufwüchse unmittelbar vor den ersten Eintrieben bestimmt. Dazu wurde die Vegetation etwa 3 bis 4 cm über der Bodenoberfläche abgeschnitten, bei 105 °C 4 Stunden lang im Trockenschrank getrocknet und anschließend gewogen. Die Bodenproben für die unterirdische Phytomassebestimmung wurden an den Vegetationsaufnahmeflächen mit einem Probenbohrer (Ø 7,5 cm) in 5-cm-Tiefenstufen-Intervallen entnommen. Die Probenahme erfolgte im Oktober in sechsfacher Wiederholung. Die Untersuchungstiefe betrug 30 cm. Die Bodenproben wurden unmittelbar nach der Entnahme tiefgefroren. Die unterirdische Phytomasse wurde mit Hilfe einer Wurzelwaschmaschine (SMUCKER et al. 1982) vom Boden getrennt, danach 12 Stunden bei 70° C im Trockenschrank getrocknet und anschließend gewogen. Die unterirdische Phytomasse wurde wegen des hohen Arbeits- und Zeitaufwandes nicht in Wurzeln, Wurzelstöcke und Rhizome getrennt; auch zwischen lebenden und abgestorbenen Wurzeln wurde nicht unterschieden. Aus den sechs Daten pro Tiefenstufe wurde für jeden Pflanzenbestand der arithmetische Mittelwert errechnet und dieser auf die Einheit „dt ha<sup>-1</sup> Trockenmasse“ bezogen. Die unterirdische Phytomasse ist ohne Abzug des Aschengehaltes angegeben.

### *Methodische Probleme*

Die exakte Bestimmung der unterirdischen Phytomasse ist methodisch schwierig sowie mit einem sehr hohen Arbeits- und Zeitaufwand verbunden. Aus der Literatur ist bekannt, dass der überwiegende Teil der unterirdischen Phytomasse im Oberboden anzutreffen ist. SPEIDEL und WEISS (1972) beispielsweise fanden in einer Goldhaferwiese in 460 m Seehöhe bei einer Untersuchungstiefe von 60 cm 96 % der unveraschenen Wurzelmasse in 0 bis 20 cm Bodentiefe. Nach KMOCH (1952) entfallen im Grünland 80 bis 90 % der gesamten Wurzelmasse auf die Tiefenstufe 0 bis 10 cm. Auch die Untersuchungen von KLAPP (1943, 1971) ergaben, dass im Grünland unterhalb von 30 bis 40 cm Bodentiefe nur mehr wenige Prozent der gesamten Wurzelmasse vorkommen. Diese Tatsachen gaben Veranlassung, die Untersuchungstiefe auf 30 cm zu beschränken. Genauso wie die oberirdische Phytomasse ist auch die unterirdische Phytomasse jahreszeitlichen und jährlichen Schwankungen unterworfen (KMOCH et al. 1958, SCHULZE und MUES 1961, KLAPP 1971). Auf Grund des hohen Arbeits- und Zeitaufwandes konnte die unterirdische Phytomasse nur für einen Zeitpunkt bestimmt werden. Die Daten stellen somit lediglich eine Momentaufnahme zum Zeitpunkt der Probenahme dar. Die zeitliche Dynamik der Wurzelmasse resultierend aus der Bilanz zwischen Zersetzung abgestorbener Wurzeln und Neubildung wurde nicht untersucht. Selbst bei sorgfältigster Arbeitsweise gehen beim Auswaschen Feinwurzeln und Wurzelteile verloren. Die Verluste können erheblich sein (SAUERBECK und JOHNEN 1976, SAUERBECK 1978). Auch kleine Verunreinigungen mit Bodenmaterial können das Ergebnis beeinträchtigen. Allerdings war das Ziel dieser Untersuchung nicht die exakte Bestimmung der unterirdischen Phytomasse, sondern ihr Vergleich zwischen den einzelnen Vegetationstypen stand im Vordergrund. Daher können die angeführten methodischen Probleme toleriert werden.

### Untersuchungsgebiet: Lage, Geologie, Boden, Klima, Vegetation

Die vorliegende Untersuchung wurde in Aiglern in der Gemeinde Aigen im Ennstal im Bezirk Liezen (Steiermark, Österreich) durchgeführt. Dieser Landschaftsraum ist repräsentativ für das Grünland im Berggebiet Österreichs. Das Untersuchungsgebiet gehört tektonisch zur Grauwackenzone. Neben altpaläozoischen Phylliten kommen auch altpaläozoische Bänderkalke vor (FLÜGEL und NEUBAUER 1984). Die Braunerde ist der häufigste und flächenmäßig bedeutendste Bodentyp auf frischen (ausgeglichenen) bis krumenwechselfeuchten Standorten (BOHNER und SOBOTIK 2000a). Das Untersuchungsgebiet weist im langjährigen Mittel (1971-2000) eine Juli-Temperatur von 16,5 °C, eine Jänner-Temperatur von -3,9 °C und eine Jahresmittel-Temperatur von 6,7 °C auf. Der Jahres-Niederschlag macht im Durchschnitt 970 mm aus. Die Niederschläge sind relativ gleichmäßig über das Jahr verteilt. In der Vegetationsperiode (April bis September) fallen etwa 60 % des Jahres-Niederschlags. Der Juli ist im langjährigen Mittel der niederschlagreichste Monat gefolgt vom Juni und August. Im Februar fallen die geringsten Niederschlagsmengen. Die Schneedeckenperiode beträgt im langjährigen Mittel 82 Tage im Jahr (ZAMG 2002). Das Untersuchungsgebiet weist somit ein winterkaltes, sommerkühles, relativ niederschlag- und schneereiches, kontinental beeinflusstes Talbeckenklima auf. Für die Vegetation sind vor allem die Temperatur und die Länge der Vegetationsperiode die begrenzenden klimatischen Faktoren. Das Klima begünstigt die Grünlandwirtschaft und Viehzucht, der Ackerbau hingegen hat flächenmäßig eine geringe Bedeutung. Die wichtigste Pflanzengesellschaft der relativ intensiv genutzten Kulturweiden auf frischen bis krumenwechselfeuchten Standorten ist die Frauenmantel-Weißklee-Weide (*Alchemillo monticolae-Cynosuretum cris-tati*). Sie wird regelmäßig mit Wirtschaftsdünger gedüngt und meist vier- bis fünfmal pro Jahr beweidet. Die häufigste und flächenmäßig bedeutendste Wiesengesellschaft auf frischen bis mäßig feuchten Standorten ist die Frauenmantel-Glatthaferwiese (*Alchemillo monticolae-Arrhenatherum elatioris*). Sie wird meist dreimal pro Jahr gemäht und im Herbst häufig nachbeweidet; gedüngt wird regelmäßig mit Wirtschaftsdünger (BOHNER und SOBOTIK 2000b).

### Nutzung

Die untersuchte Weide hat eine Gesamtfläche von etwa 2 Hektar. Sie wird seit mehr als 10 Jahren im Zeitraum Anfang Mai bis Ende Oktober fünfmal pro Jahr in Form einer Portionsweide mit Milchkühen (Braunvieh) beweidet. Die Besatzstärke beträgt etwa 4 Kühe pro Hektar während 180 Weidetagen bei täglich 8stündiger Beweidung. Die Weide wird regelmäßig mit Wirtschaftsdünger (überwiegend Rindergülle) gedüngt. Die Fläche unterhalb des Weidezaunes erhält weder Harn und Kot der Weidetiere noch nennenswerte Mengen an Wirtschaftsdünger. Es gibt keine mechanische Belastung durch den Tritt der Weidetiere oder das Befahren mit landwirtschaftlichen Maschinen. Allerdings wird der Aufwuchs regelmäßig abgeweidet.

### Ergebnisse und Diskussion

Die Pflanzenbestände und ihre unterirdische Phytomasse wurden zwischen 670 und 681 m Seehöhe auf ebenen Flächen und auf schwach geneigten Hanglagen (2-6 °) in nordnordöstlicher Exposition untersucht (Tabelle 1).

Die Böden sind tiefgründige, carbonatfreie Braunerden. Die Verbraunung ist allerdings lithologisch bedingt nur sehr schwach ausgeprägt. Das Ausgangsgestein für die Bodenbildung ist altpaläozoischer Bänderkalk (FLÜGEL und NEUBAUER 1984). Die Bodengründigkeit beträgt mehr als 100 cm. Die Bodenart ist im stark humosen A-Horizont lehmiger Sand (Trittgesellschaft) bzw. sandiger Schluff (Weidegesellschaft, Weidezaungesellschaft). Beim Weideeingang und in der eigentlichen Weide sind die Böden infolge hoher Trittbelastung deutlich krumenpseudovergleyt. Auf Grund der zeitweiligen Staunässe (Sauerstoffmangel) sind zahlreiche Roströhren im Humushorizont vorhanden. Die Oberböden in der Tritt- und Weidegesellschaft sind sehr dicht gelagert. Die Struktur ist deutlich plattig und die Humusform repräsentiert einen Feuchtmull. Unterhalb des Weidezaunes ist der Boden eine Braunerde mit der Humusform Mull. Der A-Horizont weist eine krümelige Struktur auf und ist infolge fehlender Fahr- und Trittbelastung durch einen hohen Lockerheitsgrad gekennzeichnet. Der Bodenwasserhaushalt muss beim Weideeingang und in der eigentlichen Weide mit krumenwechselfeucht eingestuft werden im Gegensatz zu frisch (ausgeglichen) unterhalb des Weidezaunes.

In den Tabellen 2 bis 4 sind ökologisch relevante chemische und physikalische Bodenkennwerte vom A-Horizont (0-10 cm) der Braunerden angeführt. Die Böden befinden sich lithologisch bedingt im Carbonat-Pufferbereich (pH CaCl<sub>2</sub>: > 6.2). Daher beträgt die Basensättigung nahezu 100 %. Dies bewirkt eine hohe Säureneutralisationskapazität zumindest im Oberboden. Die Gefahr einer Säuretoxizität für Pflanzenwurzeln kann somit ausgeschlossen werden. Die Oberböden der drei untersuchten Vegetationstypen weisen – im Vergleich zu den Böden des Dauergrünlandes in der Obersteiermark (BOHNER et al. 2007) – einen eher niedrigen Humus- und folglich auch einen relativ geringen Gesamt-Stickstoffgehalt auf. Der Humusgehalt ist im Oberboden der Weidezaungesellschaft trotz einer 4-6fach größeren unterirdischen Phytomasse (siehe unten) am geringsten. Die ständige Abfuhr von organischer Substanz durch das regelmäßige Abweiden der Aufwüchse ohne nennenswerte Rücklieferung über Wirtschaftsdünger und Kot der Weidetiere dürfte dafür verantwortlich sein. Die drei untersuchten Vegetationstypen unterscheiden sich deutlich hinsichtlich ihres Nährstoffgehaltes im Oberboden (BOHNER und TOMANOVA 2006). Die vergleichsweise hohe elektrische Leitfähigkeit, vor allem aber die sehr hohen Gehalte an CAL-löslichem Phosphor und Kalium sind Hinweise für nährstoffreiche Bodenverhältnisse in der Trittgesellschaft. Die Nährstoffanreicherung im Oberboden resultiert aus der regelmäßigen Düngung mit Wirtschaftsdünger und der Nährstoffzufuhr durch Kot und Harn der Weidetiere. Der Oberboden unterhalb des Weidezaunes hingegen ist durch Nährstoffarmut charakterisiert. Vor allem der Gehalt an nachlieferbarem Stickstoff (potenziell

**Tabelle 1: Allgemeine Standortangaben und Vegetation; Tritt = Trittgemeinschaft; Weide = Weidengemeinschaft; Zaun = Weidengemeinschaft; kpB = krumenpseudovergleyte Braunerde; B = Braunerde; kw = krumenwechselfeucht; fr = frisch**

Biotoptyp	Stetigkeit	Tritt	Weide I	Weide II	Weide III	Zaun
Seehöhe in m		670	671	680	681	681
Hangneigung in °		5	6	2	0	0
Exposition		NNO	NNO	NNO		
Bodentyp		kpB	kpB	kpB	kpB	B
Bodenwasserhaushalt		kw	kw	kw	kw	fr
pH-Wert in CaCl <sub>2</sub> (0-10 cm)		7,2	6,5	6,4	6,2	6,4
Aufnahmefläche in m <sup>2</sup>		24	50	50	50	10
Artenzahl Gefäßpflanzen		25	27	31	25	59
Gräser (%) 1. Aufwuchs		63	30	30	45	45
Kräuter (%) 1. Aufwuchs		35	40	35	20	45
Leguminosen (%) 1. Aufwuchs		2	30	35	35	10
<i>Acer pseudoplatanus</i>	1					+
<i>Achillea millefolium</i>	4		1	1b	1a	+
<i>Aegopodium podagraria</i>	1			1b		
<i>Agrostis capillaris</i>	1					1a
<i>Agrostis stolonifera</i>	2	1b	1			
<i>Ajuga reptans</i>	1					1a
<i>Alchemilla monticola</i>	2		+			1a
<i>Anemone nemorosa</i>	1					+
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	1					2a
<i>Anthriscus sylvestris</i>	1			r		
<i>Arabidopsis thaliana</i>	1					+
<i>Bellis perennis</i>	5	+	1a	1	+	1a
<i>Briza media</i>	1					1a
<i>Bromus hordeaceus</i>	2	+		r		
<i>Campanula patula</i>	1					1a
<i>Campanula rapunculoides</i>	1					+
<i>Campanula rotundifolia</i>	1					1a
<i>Capsella bursa-pastoris</i>	4	1	1a	1	+	
<i>Carex caryophylla</i>	1					+
<i>Carex pallescens</i>	1					+
<i>Cerastium holosteoides</i>	5	1a	+	+	1a	+
<i>Chaerophyllum hirsutum</i>	1			r		
<i>Corydalis solida</i>	2			r		+
<i>Crepis biennis</i>	1					r
<i>Cruciata laevipes</i>	1					1a
<i>Cynosurus cristatus</i>	1					1b
<i>Dactylis glomerata ssp. glomerata</i>	5	+	1a	1	1	1a
<i>Deschampsia cespitosa</i>	4		r	+	r	+
<i>Elymus repens</i>	4	1	2	1b	2a	
<i>Festuca pratensis</i>	5	+	1	+	1a	+
<i>Festuca rubra ssp. rubra</i>	1					2
<i>Ficinia verna</i>	3		1a	1	1	
<i>Fragaria vesca</i>	1					+
<i>Fraxinus excelsior</i>	3	1a	r		+	
<i>Gagea lutea</i>	2		r	+		
<i>Galium album</i>	1					1a
<i>Galium anisophyllum</i>	1					+
<i>Glechoma hederacea</i>	1					+
<i>Homalotrichon pubescens ssp. pubescens</i>	1					1a
<i>Lathyrus pratensis</i>	1					1a
<i>Leontodon autumnalis</i>	1					+
<i>Leontodon hispidus ssp. hispidus</i>	1					2
<i>Leucanthemum ircutianum</i>	1					1
<i>Lolium perenne</i>	4	1	1a	1a	+	
<i>Lotus corniculatus</i>	1					+
<i>Luzula campestris</i>	1					1
<i>Matricaria discoidea</i>	1	2a				
<i>Medicago lupulina</i>	1					+
<i>Myosotis sylvatica</i>	1					+
<i>Phleum pratense</i>	1				+	
<i>Plantago lanceolata</i>	4	+		+	+	1a
<i>Plantago major ssp. major</i>	4	2	1	1a	1a	
<i>Plantago media</i>	1					1
<i>Poa angustifolia</i>	1					1a



Biootyp	Stetigkeit	Tritt	Weide I	Weide II	Weide III	Zaun
Poa annua	1	2				
Poa pratensis	4	2a	2	2	3a	
Poa supina	5	2	1a	+	+	+
Poa trivialis	5	1b	1	1	1	r
Polygonum arenastrum	1	1a				
Primula elatior	1					+
Prunella vulgaris	1					+
Ranunculus acris ssp.acris	5	r	+	+	1a	1a
Ranunculus repens	5	1a	2a	2	1	+
Rumex acetosa	1					1a
Rumex crispus	4	+	r	+	r	
Rumex obtusifolius	4	1a	2	1a	1a	
Sagina procumbens	1					+
Silene nutans ssp.nutans	1					+
Stellaria graminea	1					+
Stellaria media	4	1	1a	1a	1a	
Taraxacum officinale agg.	5	1	3a	2	2	1a
Thymus pulegioides ssp.pulegioides	1					+
Trifolium aureum	1					+
Trifolium pratense ssp.pratense	1					1a
Trifolium repens	5	1a	2b	3a	3a	1a
Trisetum flavescens	1					+
Urtica dioica	1			r		
Veronica chamaedrys ssp.chamaedrys	3		+	+		1a
Veronica serpyllifolia ssp.serpyllifolia	4		1a	+	+	+
Vicia cracca	1					+

**Tabelle 2: Ausgewählte chemische Bodenkennwerte (A-Horizont, 0-10 cm Bodentiefe, arithmetischer Mittelwert aus jeweils fünf Probenentnahmetermen)**

	CaCl <sub>2</sub> pH	μS cm <sup>-1</sup> eL	% C <sub>org</sub>	% N <sub>tot</sub>	C <sub>org</sub> :N <sub>tot</sub>	mg kg <sup>-1</sup> 7d <sup>-1</sup> nachl. N
Trittges.	7,2	214	4,79	0,52	9,2	246
Weideges. I	6,5	97	4,53	0,50	9,1	265
Weideges. II	6,4	97	5,01	0,56	9,0	200
Weideges. III	6,2	95	4,48	0,50	9,0	294
Weidezaunges.	6,4	84	4,04	0,40	10,1	120

eL = elektrische Leitfähigkeit; nachl. N = nachlieferbarer Stickstoff

**Tabelle 3: Ausgewählte chemische und physikalische Bodenkennwerte (A-Horizont, 0-10 cm Bodentiefe, arithmetischer Mittelwert aus jeweils fünf Probenentnahmetermen)**

	mg kg <sup>-1</sup>		mval 100 g <sup>-1</sup>	%		%	
	P-CAL	K-CAL	KAK <sub>eff</sub>	BS	S	Z	T
Trittges.	235	761	27	100	45	48	8
Weideges. I	89	216	19	100	33	58	8
Weideges. II	126	124	22	100	33	58	9
Weideges. III	116	153	18	99,7	32	60	8
Weidezaunges.	15	45	17	100	35	58	7

P-CAL und K-CAL = CAL-löslicher Phosphor- und Kalium-Gehalt; KAK<sub>eff</sub> = effektive Kationenaustauschkapazität (BaCl<sub>2</sub>-Extrakt); BS = Basensättigung; S = Sand; Z = Schluff; T = Ton

mineralisierbarer Stickstoff) sowie der CAL-lösliche Phosphor- und Kalium-Gehalt sind deutlich niedriger als in den Oberböden der Weide- und Trittgemeinschaft. Die ständige Nährstoffabfuhr durch das regelmäßige Abfressen der Pflanzen ohne Kompensation durch Harn und Kot der Weidetiere sowie die fehlende oder sehr geringe Nährstoffzufuhr über Wirtschaftsdünger sind die Hauptgründe hierfür. Die Nährstoffgehalte in den Oberböden der Weidegesellschaft befinden sich zwischen diesen beiden Extremen. In allen untersuchten Tiefenstufen weisen die Böden der Tritt- und

Weidegesellschaft eine höhere Lagerungsdichte sowie ein geringeres Porenvolumen auf als der Boden unterhalb des Weidezaunes. Diese Befunde sowie die deutlich ausgebildete plattige Struktur im A-Horizont und die Krumenpseudovergleyung sind Hinweise dafür, dass die Oberböden in der Tritt- und Weidegesellschaft vor allem auf Grund der häufigen Trittwirkung der Weidetiere verdichtet sind (BOHNER und TOMANOVA 2006). Die Bodenverdichtung ist am stärksten in der Tiefenstufe 5-10 cm ausgebildet. Hier ist wegen der trittbedingten starken Verminderung der

**Tabelle 4: Ausgewählte physikalische Bodenkennwerte (BOHNER und TOMANOVA 2006)**

cm Bodentiefe	Lagerungsdichte (g cm <sup>-3</sup> )			Porenvolumen (%)		
	Tritt	Weide III	Zaun	Tritt	Weide III	Zaun
0-5	1,21	1,06	0,99	52	59	62
5-10	1,52	1,17	0,95	43	55	64
10-15	1,56	1,37	1,08	42	48	59

Tritt = Trittgemeinschaft; Weide III = Weidegesellschaft III; Zaun = Weidezaungemeinschaft

gesättigten Wasserleitfähigkeit die Krumenpseudovergleyung am deutlichsten ausgeprägt. In der Tiefenstufe 0-5 cm verhindert die intensive Durchwurzelung der Gräser eine stärkere Verdichtung (BOHNER et al. 2006). Der Oberboden unterhalb des Weidezaunes hingegen ist locker gelagert; eine Krumenpseudovergleyung ist visuell nicht erkennbar. Die lockere Lagerung und die gut ausgebildete krümelige Struktur resultieren aus der intensiven Durchwurzelung des Oberbodens (siehe unten) und der fehlenden temporären Druckbelastung durch Rinderbeweidung und Befahren mit landwirtschaftlichen Maschinen. Insbesondere der häufige Tritt der Weidetiere führt zu einer Zusammenpressung des Bodens, die mit einer Absenkung der Bodenoberfläche in der Weide verbunden ist (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 2002). Der bodenverdichtende Tritteffekt bewirkt somit auch mikromorphologische Veränderungen; unterhalb des Weidezaunes ist der Boden infolge fehlender Fahr- und Trittbelastung leicht aufgewölbt (vgl. HUSICKA und VOGEL 1999, OZOLS und OZOLS 2007).

In der Vegetationstabelle (Tabelle 1) sind die Pflanzenarten alphabetisch geordnet. Die drei untersuchten Vegetationstypen unterscheiden sich deutlich hinsichtlich ihrer Artenzusammensetzung und Phytodiversität; nur wenige Arten kommen gemeinsam vor. Der häufig betretene Pflanzenbestand am Weideeingang kann pflanzensoziologisch nach der Gliederung von MUCINA (1993) dem *Matricario-Polygonetum arenastris*, der Vogel-Knöterich-Trittgemeinschaft zugeordnet werden. Die Phytozönose wird von Untergräsern dominiert. Die Leguminosen erreichen einen sehr niedrigen Deckungsgrad, lediglich *Trifolium repens* erträgt die häufige Trittbelastung beim Weideeingang. Trittresistente Pflanzenarten wie *Plantago major* ssp. *major*, *Poa annua*, *Poa supina* und *Matricaria discoidea* hingegen erreichen einen höheren Deckungsgrad. Von der trittbedingten Oberbodenverdichtung und der daraus resultierenden ausgeprägten Krumenwechselfeuchtigkeit profitiert vor allem *Agrostis stolonifera*. Kriech- und Rosettenpflanzen ertragen die häufige Störung durch Tritt sehr gut und können daher beim Weideeingang existieren. Bedingt durch den häufigen Tritt ist der Pflanzenbestand sehr lückig. Von den zahlreichen Vegetationslücken (35 % offener Boden) und vom nährstoffreichen Boden profitieren auch einige Therophyten (einjährige Samenpflanzen) wie *Poa annua*, *Matricaria discoidea*, *Capsella bursa-pastoris*, *Stellaria media*, *Polygonum arenastrum* und *Bromus hordeaceus*. Obergräser hingegen werden durch die häufige Tritteinwirkung zurückgedrängt, lediglich *Elymus repens*, *Festuca pratensis* und *Dactylis glomerata* ssp. *glomerata* kommen in der Trittgemeinschaft vor. Magerkeitszeiger fehlen auf Grund des nährstoffreichen Bodens gänzlich. Die drei untersuchten

Pflanzenbestände in der eigentlichen Weidefläche können pflanzensoziologisch nach der Klassifikation von MAR-SCHALL und DIETL (1976) dem *Alchemillo monticola-Cynosuretum cristati*, der Frauenmantel-Weißklee-Weide zugeordnet werden. Diese Phytozönose repräsentiert im Untersuchungsgebiet eine intensiv genutzte Kulturweide auf meist krumenwechselfeuchten Böden (BOHNER und SOBOTIK 2000b). Untergräser sind wichtige Bestandbildner, insbesondere *Poa pratensis* erreicht einen höheren Deckungsgrad. Auch *Lolium perenne* profitiert von einer intensiven Beweidung. Das Englische Raygras erträgt eine häufige Trittbelastung und zählt daher auch zur Artengarnitur der Trittgemeinschaft. Obergräser hingegen erreichen in der Weidegesellschaft eine vergleichsweise niedrige Artmächtigkeit. Lediglich *Elymus repens* verzeichnet einen höheren Deckungsgrad. Insbesondere die Acker-Quecke und der Stumpfblatt-Ampfer (*Rumex obtusifolius*) zeigen einen nährstoffreichen Boden an. Daher fehlen Magerkeitszeiger in den untersuchten Pflanzenbeständen gänzlich. Trittempfindliche Pflanzenarten werden durch intensive Beweidung zurückgedrängt. Folglich fehlen in der Weidegesellschaft die Kennarten der Glatthaferwiese und einige typische Wiesen-Kräuter wie beispielsweise *Anthriscus sylvestris* und *Heracleum sphondylium* ssp. *sphondylium* kommen nicht oder nur sehr spärlich vor. Auch rankende Leguminosen (*Lathyrus pratensis*, *Vicia cracca*, *Vicia sepium*) und der Rot-Klee (*Trifolium pratense* ssp. *pratense*) sind in den untersuchten Pflanzenbeständen nicht vertreten. Der Weiß-Klee hingegen wird durch intensive Beweidung gefördert; *Trifolium repens* erreicht in der Weidegesellschaft einen ziemlich hohen Deckungsgrad. Von der trittbedingten Oberbodenverdichtung und der daraus resultierenden Krumenwechselfeuchtigkeit profitiert in erster Linie *Ranunculus repens*. Der Kriech-Hahnenfuß gilt im Wirtschaftsgrünland als Bioindikator für verdichtete, krumenwechselfeuchte Böden. Bemerkenswert ist ferner das Vorkommen zahlreicher Lückenfüller (insbesondere *Capsella bursa-pastoris*, *Ficaria verna*, *Rumex obtusifolius*, *Rumex crispus*, *Stellaria media*, *Taraxacum officinale* agg.). Sie profitieren vom nährstoffreichen Boden und von den zahlreichen Vegetationslücken (4-8 % offener Boden). Der Pflanzenbestand unterhalb des Weidezaunes wurde nach der Klassifikation von ELLMAUER und MUCINA (1993) dem *Festuco commutatae-Cynosuretum*, der Rotschwengel-Straußgras-Weide angeschlossen. Diese Zuordnung ist allerdings auf Grund der spezifischen Standortbedingungen (fehlende Trittbelastung), wegen des gemeinsamen Vorkommens von typischen Wiesen- und Weidepflanzen und wegen der Kleinflächigkeit des Biotopes äußerst problematisch. Die Phytozönose weist auch eine floristische Ähnlichkeit mit dem *Luzulo-Cynosuretum*, der Wiesen-Hainsimsen-Kammgras-Weide auf (MEISEL 1966). Außerdem besteht eine gewisse Verwandtschaft mit der Rotschwengel-Straußgraswiese (*Festuca rubra-Agrostis capillaris* Gesellschaft im Sinne von BOHNER et al. 2007). Der Pflanzenbestand ist, bedingt durch den nährstoffarmen Boden, relativ niedrigwüchsig und ertragsarm (Tabelle 6). Untergräser und Kräuter sind die Hauptbestandbildner. Obergräser wie *Dactylis glomerata* ssp. *glomerata*, *Homalotrichon pubescens* ssp. *pubescens*, *Festuca pratensis* und *Trisetum flavescens* erreichen hingegen einen niedrigen Deckungsgrad. Am

Bestandesaufbau sind auch zahlreiche Kleearten allerdings mit geringer Artmächtigkeit beteiligt (*Lathyrus pratensis*, *Lotus corniculatus*, *Medicago lupulina*, *Trifolium aureum*, *Trifolium pratense* ssp. *pratense*, *Trifolium repens*, *Vicia cracca*). Die Phytozönose wird von Magerkeitszeigern dominiert. Neben *Festuca rubra* ssp. *rubra* und *Leontodon hispidus* ssp. *hispidus* verzeichnet auch noch *Anthoxanthum odoratum* eine höhere Artmächtigkeit. Magerkeitszeiger finden unterhalb des Weidezaunes offensichtlich einen geeigneten Lebensraum (vgl. HUSICKA und VOGEL 1999, DIERSCHKE 2000); sie ertragen hier auch den regelmäßigen Verbiss. Die reichlich vorhandenen Magerkeitszeiger und das weitgehende Fehlen von Nährstoffzeigern sind Hinweise für einen nährstoffarmen Boden. Auch die Ergebnisse der Bodenanalysen weisen darauf hin. Auf Grund der fehlenden Trittbelastung kommen in der Weidezaungesellschaft einige Kennarten der Glatthaferwiese wie *Campanula patula*, *Crepis biennis* und *Galium album* mit geringer Artmächtigkeit vor. Auch zahlreiche Kennarten der Rotschwingel-Straußgraswiese wie *Agrostis capillaris*, *Anthoxanthum odoratum*, *Festuca rubra* ssp. *rubra* und *Stellaria graminea* zählen zur Artengarnitur. Die Phytozönose nimmt daher floristisch eine Mittelstellung zwischen Wiesen und Weiden ein (vgl. OZOLS und DUES 2001). Neben typischen Arten des Wirtschafts- und Extensivgrünlandes sind auch einige trittempfindliche Wald- und Saumpflanzen am Bestandesaufbau beteiligt. *Cynosurus cristatus* findet ebenfalls unterhalb des Weidezaunes einen geeigneten Lebensraum. Das Wiesen-Kammgras hält eine häufige Trittbelastung nicht aus und fehlt daher in der untersuchten Tritt- und Weidegesellschaft. Auf Grund der lockeren Lagerung und krümeligen Struktur des Oberbodens sowie der fehlenden Krümenwechselfeuchtigkeit (bessere Bodendurchlüftung) kommen Trittplanzen bzw. Bodenverdichtungs- und Krümenwechselfeuchtigkeitszeiger in der Weidezaungesellschaft nur zufällig vor. Sie sind zum Teil vermutlich aus der angrenzenden Weidegesellschaft eingewandert und finden in Vegetationslücken (3 % offener Boden) einen geeigneten Lebensraum. Auch das spärliche Vorkommen von Segetal- und Ruderalarten kann auf diesen Randeffekt und auf Vegetationslücken zurückgeführt werden. Unkräuter wie beispielsweise Disteln fehlen in der untersuchten Weidezaungesellschaft gänzlich; somit besteht für die angrenzenden Grünlandflächen keine unmittelbare Verunkrautungsgefahr. Wegen des nährstoffarmen Bodens und der fehlenden Fahr- und Trittbelastung kommen Zeigerpflanzen für eine intensive Grünlandbewirtschaftung (Überdüngungszeiger, Übernutzungszeiger, Bodenverdichtungszeiger) unterhalb des Weidezaunes nicht oder nur zufällig vor. Die

untersuchte Weidezaungesellschaft weist somit einen geringeren Hemerobiegrad auf als die Weide- und Trittgesellschaft. In der Steiermark seltene bzw. gefährdete Gefäßpflanzenarten (Rote Liste-Arten nach ZIMMERMANN et al. 1989) fehlen allerdings im Pflanzenbestand. Dieser weist mit 59 verschiedenen Farn- und Blütenpflanzen auf einer Fläche von nur 10 m<sup>2</sup> eine hohe Alpha-Diversität auf. Die Artendichte ist damit deutlich höher als in der Weide- und Trittgesellschaft. Die Weidezaungesellschaft ist besonders artenreich, weil Gefäßpflanzenarten mit Verbreitungsschwerpunkt in unterschiedlichen Pflanzengesellschaften koexistieren können (vgl. HUSICKA und VOGEL 1999). Die Gründe hierfür sind die fehlende Fahr- und Trittbelastung, kein bodenchemischer Stress für Pflanzenwurzeln durch Säuretoxizität sowie die günstigen Lichtverhältnisse in Bodennähe resultierend aus dem nährstoffarmen Boden, der geringen oberirdischen Biomasseproduktion und dem regelmäßigen Abfressen der Pflanzen. Unterhalb des Weidezaunes finden auch Moose einen geeigneten Lebensraum. Die Deckung der Mooschicht beträgt etwa 10 %, stellenweise sind deutliche Moospolster vorhanden. In der Weidezaungesellschaft kommen vereinzelt auch Ameisenhögel vor. Ameisen bevorzugen offensichtlich auf Grund der fehlenden Fahr- und Trittbelastung diesen Lebensraum (vgl. HUSICKA und VOGEL 1999).

In der *Tabelle 5* ist die unterirdische Phytomasse und ihre Verteilung auf die einzelnen Tiefenstufen angeführt. In den fünf untersuchten Pflanzenbeständen wurde generell eine niedrige Wurzelmasse festgestellt. Die Bewurzelung nimmt mit zunehmender Bodentiefe rasch und stark ab; der Großteil der Wurzelmasse (76-91 %) befindet sich in den obersten 10 cm des Bodens. Dieses Untersuchungsergebnis stimmt mit dem anderer Autoren (KLAPP 1943, 1951, 1971; KMOCH 1952, SCHULZE und MUES 1961) überein. Die drei Vegetationstypen unterscheiden sich deutlich hinsichtlich ihrer unterirdischen Phytomasse. Die Weidegesellschaft, vor allem aber die Trittgesellschaft weisen in allen untersuchten Tiefenstufen eine geringere unterirdische Phytomasse als die Weidezaungesellschaft auf. Außerdem ist die Wurzelmasse mit einer Ausnahme (Weidegesellschaft I) relativ stärker auf die Tiefenstufe 0-5 cm konzentriert. Daraus resultiert eine ungleichmäßige Wurzelverteilung im Boden. In der Weidegesellschaft I erreichen die Tiefwurzler *Taraxacum officinale* agg. und *Rumex obtusifolius* einen vergleichsweise hohen Deckungsgrad. Daher ist hier die weidebedingte Konzentration der Wurzelmasse auf die oberste Bodenschicht nicht so ausgeprägt. Das Verhältnis oberirdischer Phytomasse zu unterirdischer Phytomasse ist in der Weidezaungesellschaft deutlich niedriger als in der

**Tabelle 5: Unterirdische Phytomasse (Trockenmasse; 0-30 cm Bodentiefe)**

Bodentiefe in cm	Trittges.		Weideges. I		Weideges. II		Weideges. III		Weidezaunges.	
	dt ha <sup>-1</sup>	%	dt ha <sup>-1</sup>	%	dt ha <sup>-1</sup>	%	dt ha <sup>-1</sup>	%	dt ha <sup>-1</sup>	%
0-5	3,6	76	3,5	59	7,1	81	5,9	73	19,5	57
5-10	0,8	16	1,1	18	0,9	10	1,2	14	8,6	25
10-15	0,2	4	0,7	11	0,4	5	0,5	6	2,9	8
15-20	0,1	2	0,4	6	0,2	2	0,3	3	2,5	7
20-25	0,1	1	0,2	3	0,1	1	0,2	2	0,9	2
25-30	0,1	1	0,2	3	0,1	1	0,1	2	0,4	1
<b>0-30</b>	<b>4,8</b>	<b>100</b>	<b>6,0</b>	<b>100</b>	<b>8,8</b>	<b>100</b>	<b>8,0</b>	<b>100</b>	<b>34,9</b>	<b>100</b>

**Tabelle 6: Verhältnis oberirdischer Phytomasse (ohne Stoppelmasse) zu unterirdischer Phytomasse (0-30 cm Bodentiefe)**

	dt ha <sup>-1</sup> TM oberirdische Phytomasse	dt ha <sup>-1</sup> TM unterirdische Phytomasse	Verhältnis
Trittges.	58,9	4,8	12,3
Weideges. I	72,5	6,0	12,1
Weideges. II	86,3	8,8	9,8
Weideges. III	83,0	8,0	10,4
Weidezauges.	11,9	34,9	0,3

Weide- und Trittgemeinschaft (Tabelle 6). Für die geringere unterirdische Phytomasse und die Konzentration auf die oberste Bodenschicht in der Weide- und Trittgemeinschaft sind vor allem floristische (mehr flachwurzelnde Pflanzen mit geringerer Wurzelmasse) und bodenökologische Gründe (raschere Zersetzung der abgestorbenen Pflanzenwurzeln infolge eines nährstoffreicheren Bodens, trittbedingter, verdichteter Oberboden) ausschlaggebend. Die größere Wurzelmasse und das niedrigere Verhältnis von oberirdischer Phytomasse zu unterirdischer Phytomasse in der Weidezaugesellschaft sind eine Anpassung der Magerkeitszeiger an die Nährstoffarmut im Boden. Eine größere Wurzelmasse steigert nämlich die Nährstoffausbeute pro Bodenvolumen. Es erhöht sich die räumliche Verfügbarkeit der Nährstoffe im Boden durch Verminderung der Distanz, die die Nährionen zu den Pflanzenwurzeln auf Grund von Massenfluss und Diffusion zurücklegen müssen (MARSCHNER 1998).

### Schlussfolgerung und Forschungsbedarf

Auf der untersuchten Kulturweide wurde eine hohe räumliche Variabilität einzelner Bodenkennwerte festgestellt. Beim Weideeingang ist der Oberboden stark verdichtet und mit Nährstoffen angereichert. Unterhalb des Weidezaunes hingegen ist der Boden nährstoffarm und locker gelagert. Durch die Beweidung mit Rindern findet ein ständiger Nährstoff- und Kohlenstoff-Transfer von der Fläche unterhalb des Weidezaunes hin zur Weidefläche statt. Daraus resultieren eine Nährstoffverarmungszone unterhalb des Weidezaunes und eine Nährstoffanreicherungszone insbesondere beim Weideeingang. Auf der untersuchten Kulturweide konnten drei Vegetationstypen mit unterschiedlicher Pflanzenartenvielfalt differenziert werden: eine artenarme Trittgemeinschaft, eine etwas artenreichere Weidezaugesellschaft und eine deutlich artenreichere Weidezaugesellschaft. Die Artengarnitur dieser Phytozönose besteht vorwiegend aus Magerkeitszeigern und trittempfindlichen Pflanzenarten, die im intensiv genutzten Grünland keinen geeigneten Lebensraum mehr finden (vgl. VOLLRATH 1970, HUSICKA und VOGEL 1999). Weidezäune können somit die Vegetationstypenvielfalt (Beta-Diversität im Sinne von WHITTAKER 1972) in der Kulturlandschaft erhöhen, sie schaffen unter bestimmten Voraussetzungen Lebensräume und Rückzugsgebiete für zahlreiche Magerkeitszeiger und trittempfindliche Pflanzenarten und können dadurch die Phytodiversität in einem intensiv genutzten Weide-Ökosystem steigern. Die Flächen unterhalb der Weidezäune stellen Korridore dar, in denen eine Linienmigration der Magerkeitszeiger und trittempfindlichen Pflanzenarten stattfinden kann. Diese linearen Kleinbiotope haben somit trotz ihrer Kleinflächigkeit eine

große Bedeutung im Rahmen des Biotopverbundes. Damit ihre Funktion als Refugium für Arten des Extensivgrünlandes erhalten bleibt, sollte nicht bis zum Weidezaun gedüngt werden. Auch das regelmäßige Abfressen der Pflanzen muss gewährleistet sein, damit es nicht zu einer Selbsteutrophierung des Standortes und zu einer floristischen Artenverarmung auf Grund des Lichtmangels in Bodennähe kommt (vgl. HUSICKA und VOGEL 1999).

Durch diese unter Praxisbedingungen erzielten Ergebnisse werden die bekannten Auswirkungen einer Nutzungsintensivierung auf die Wurzelmasse und räumliche Wurzelverteilung im Grünlandboden bestätigt. Eine Intensivierung der Grünlandbewirtschaftung bewirkt vor allem durch Änderungen in der Artenzusammensetzung des Pflanzenbestandes (Förderung von flachwurzelnden Arten mit geringerer Wurzelmasse) eine Verminderung der unterirdischen Phytomasse und gleichzeitig auch eine relativ stärkere Anreicherung in der Tiefenstufe 0-5 cm. Daraus resultiert eine ungleichmäßige Wurzelverteilung im Boden. Die Wasser- und Nährstoffvorräte in tieferen Bodenschichten dürften bei einer intensiven Grünlandbewirtschaftung auf Grund der geringeren Durchwurzelung vergleichsweise schlechter ausgenutzt werden als bei einer extensiven Bewirtschaftung. Dies kann vor allem während einer längeren Trockenperiode das Pflanzenwachstum hemmen. Die Verminderung der Wurzelmasse insbesondere in tieferen Bodenschichten begünstigt auch die Nährstoffauswaschung mit dem Sickerwasser. Außerdem dürfte bei einer Nutzungsintensivierung die Kohlenstoff-Zufuhr zum Boden durch lebende und abgestorbene Pflanzenwurzeln und somit der Humifizierungsprozess vermindert werden, was zu einer allmählichen Abnahme des Humusgehaltes in tieferen Bodenschichten führt.

Bei künftigen Untersuchungen sollte neben der Wurzelmasse vor allem auch die Größe der Wurzeloberfläche in den einzelnen Tiefenstufen bestimmt werden. Um den jahreszeitlichen Verlauf der Wurzelmassebildung feststellen und die unterirdische Phytomasseproduktion grob abschätzen zu können, sollte die Bestimmung der Wurzelmasse und Wurzeloberfläche am Beginn und Ende eines Jahres sowie mehrmals während der Vegetationsperiode durchgeführt werden.

### Literatur

- BERGMANN, W., 1954: Wurzelwachstum und Ernteertrag. Zeitschrift Acker- und Pflanzenbau 97, 337-368.
- BOHNER, A., 1998: Almwirtschaft und Gebirgs-Ökosysteme. Dissertation BOKU Wien, 169 S + 215 S (Tabellenband).
- BOHNER, A. und M. SOBOTIK, 2000a: Der Landschaftsraum und seine Rahmenbedingungen für die Grünlandbewirtschaftung im Mittlen Steirischen Ennstal. MaB-Forschungsbericht „Landschaft und Landwirtschaft im Wandel“, Akademie der Wissenschaften, BAL Gumpenstein, 5-14.
- BOHNER, A. und M. SOBOTIK, 2000b: Das Wirtschaftsgrünland im Mittlen Steirischen Ennstal aus vegetationsökologischer Sicht. MaB-Forschungsbericht „Landschaft und Landwirtschaft im Wandel“, Akademie der Wissenschaften, BAL Gumpenstein, 15-50.
- BOHNER, A., R. ÖHLINGER und O. TOMANOVA, 2006: Auswirkungen der Grünlandbewirtschaftung und Flächenstilllegung auf Vegetation, Boden, mikrobielle Biomasse und Futterqualität. Die Bodenkultur 57, 33-45.

- BOHNER, A. und O. TOMANOVA, 2006: Effects of cattle grazing on selected soil chemical and soil physical properties. *Grassland Science in Europe* 11, 89-91.
- BOHNER, A., 2007: Phytodiversität im Wirtschafts- und Extensivgrünland der Tallagen. Bericht HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Biodiversität in Österreich, 29-36.
- BOHNER, A., F. GRIMS und M. SOBOTIK, 2007: Die Rotschwingel-Straußgraswiesen im Mittleren Steirischen Ennstal (Österreich). Ökologie, Soziologie und Naturschutz. Mitteilungen des naturwissenschaftlichen Vereins für Steiermark 136, 113-134.
- BRAUN-BLANQUET, J., 1964: Pflanzensoziologie. Springer Verlag, 865 S.
- DIERSCHKE, H., 2000: Kleinbiotope in botanischer Sicht – ihre heutige Bedeutung für die Biodiversität von Agrarlandschaften. *Pflanzenbauwissenschaften* 4, 52-62.
- ELLMAUER, T. und L. MUCINA, 1993: Molinio-Arrhenatheretea. In: Mucina L., G. Grabherr und T. Ellmauer (Hrsg.). *Die Pflanzengesellschaften Österreichs. Teil I*, Fischer Verlag, 297-401.
- FISCHER, M.A., K. OSWALD und W. ADLER, 2008: Exkursionsflora für Österreich, Liechtenstein und Südtirol. 3. Auflage, Biologiezentrum der Oberösterreichischen Landesmuseen, 1391 S.
- FLÜGEL, H.W. und F. NEUBAUER, 1984: Steiermark. Geologie der österreichischen Bundesländer in kurzgefassten Einzeldarstellungen. Geologische Bundesanstalt Wien, 127 S.
- GLAVAC, V., 1996: Vegetationsökologie. Fischer Verlag, 358 S.
- HARTGE, K.H. und R. HORN, 1989: Die physikalische Untersuchung von Böden. Enke Verlag, 175 S.
- HELAL, H.M., 1991: Bodengefüge, Wurzelentwicklung und Wurzelfunktionen. *Zeitschrift Pflanzenernährung, Bodenkunde* 154, 403-407.
- HUSICKA, A. und A. VOGEL, 1999: Zur Refugialfunktion von Weideparzellenrändern für Pflanzenarten und Vegetationstypen des Grünlandes. *Tuexenia* 19, 405-424.
- KEITA, S. und D. STEFFENS, 1989: Einfluss des Bodengefüges auf Wurzelwachstum und Phosphataufnahme von Sommerweizen. *Zeitschrift Pflanzenernährung, Bodenkunde* 152, 345-351.
- KLAPP, E., 1943: Über die Wurzelverbreitung der Grasnarbe bei verschiedener Nutzungsweise und Pflanzengesellschaft. *Zeitschrift Pflanzenbau* 19, 221-236.
- KLAPP, E., 1951: Leistung, Bewurzelung und Nachwuchs einer Grasnarbe unter verschieden häufiger Mahd und Beweidung. *Zeitschrift Acker- und Pflanzenbau* 93, 269-286.
- KLAPP, E., 1971: Wiesen und Weiden. Parey Verlag, 620 S.
- KMOCH, H.G., 1952: Über den Umfang und einige Gesetzmäßigkeiten der Wurzelmassenbildung unter Grasnarben. *Zeitschrift Acker- und Pflanzenbau* 95, 363-380.
- KMOCH, H.G., H.H. HALFMANN und A. SIEVERS, 1958: Jahreszeitliche Entwicklung der Wurzelmasse unter einer Weide in der Kölner Bucht. *Zeitschrift Acker- und Pflanzenbau* 105, 121-144.
- KULLMANN, A., 1957: Zur Intensität der Bodendurchwurzelung. *Zeitschrift Acker- und Pflanzenbau* 103, 189-197.
- LICHTENEGGER, E., 1997: Wurzeln. Bewurzelung von Pflanzen in verschiedenen Lebensräumen. Spezieller Teil. *Stapfia* 49, 55-331.
- LICHTENEGGER, E., 1983: Wurzel- und Bodentyp als Ausdruck des Standortes. In: Böhm, W., L. Kutschera und E. Lichtenegger (Hrsg.), *Wurzelökologie und ihre Nutzenanwendung*. Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft, 369-388.
- MARSCHALL, F. und W. DIETL, 1976: Beiträge zur Kenntnis der Kammgrasweiden der Schweiz. *Schweizerische Landwirtschaftliche Forschung* 15, 287-295.
- MARSCHNER, H., 1998: Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, 889 S.
- MEISEL, K., 1966: Zur Systematik und Verbreitung der Festuco-Cynosueteen. In: Tüxen R. (Hrsg.), *Anthropogene Vegetation. Berichte über die Internationalen Symposia der Internationalen Vereinigung für Vegetationskunde, Rinteln 1961*, 201-211.
- MOHR, H.D., 1980: Einfluss der Bodeneigenschaften auf das Wurzelwachstum. *Kali-Briefe* 15, 305-316.
- MUCINA, L., 1993: Polygono-Poetea annuae. In: MUCINA L., G. GRABHERR und T. ELLMAUER (Hrsg.), *Die Pflanzengesellschaften Österreichs. Teil I*, Fischer Verlag, 82-89.
- OZOLS, U. und R. DUES, 2001: Über die Artenverbindungen an intensiv genutzten Weidezaunstreifen. *Botanik und Naturschutz in Hessen* 13, 21-32.
- OZOLS, U. und R. OZOLS, 2007: Untersuchungen zur Vegetationsentwicklung von Weidezaungesellschaften. *Tuexenia* 27, 307-326.
- SAUERBECK, D. und B. JOHNEN, 1976: Der Umsatz von Pflanzenwurzeln im Laufe der Vegetationsperiode und dessen Beitrag zur Bodenatmung. *Zeitschrift Pflanzenernährung, Bodenkunde* 139, 315-328.
- SAUERBECK, D., 1978: Assimilatbedarf und -umsatz von Pflanzenwurzeln. *Kali-Briefe* 14, 17-27.
- SCHEFFER, F. und P. SCHACHTSCHABEL (Begr.), 2002: Lehrbuch der Bodenkunde. 15. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, 593 S.
- SCHULZE, E. und H. MUES, 1961: Ertragsleistung, Pflanzenbestand und Bewurzelung einer Grasnarbe bei verschiedener Düngungsweise. *Zeitschrift Acker- und Pflanzenbau* 112, 141-160.
- SMUCKER, A.J.M., S.L. Mc BURNEY und A.K. SRIVASTANA, 1982: Quantitative separation of roots from compacted soil profiles by the Hydropneumatik Elutriation System. *Agronomy Journal*, 500-503.
- SOBOTIK, M., 1989: Auf die Wurzel kommt es an! Bedeutung der Wurzelökologie für die praktische Landwirtschaft. *Der Förderungsdienst* 37, 174-177.
- SPEIDEL, B. und A. WEISS, 1972: Zur ober- und unterirdischen Stoffproduktion einer Goldhaferwiese bei verschiedener Düngung. *Angewandte Botanik* 46, 75-93.
- SPEIDEL, B., 1986: Dynamik und Haushalt der Goldhaferwiese bei verschiedener Düngung. In: Ellenberg, H., R. Mayer und J. Schauer-mann (Hrsg.), *Ökosystemforschung. Ergebnisse des Sollingprojekts 1966-1986*. Ulmer Verlag, 159-178.
- VOLLRATH, H., 1970: Unterschiede im Pflanzenbestand innerhalb der Koppeln von Umtriebsweiden. *Bayerische Landwirtschaftliche Jahrbuch* 47, 160-173.
- WERGER, M.J.A., 1983: Wurzel/Spross-Verhältnis als Merkmal der Pflanzenstrategie. In: Böhm, W., L. Kutschera und E. Lichtenegger (Hrsg.), *Wurzelökologie und ihre Nutzenanwendung*. Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft, 323-334.
- WHITTAKER, R.H., 1972: Evolution and measurement of species diversity. *Taxon* 21, 213-251.
- ZAMG (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik), 2002: Klimadaten von Österreich 1971-2000. [http://www.zamg.ac.at/fix/klima/oe71-00/klima2000/klimadaten\\_oesterreich\\_1971\\_frame1.htm](http://www.zamg.ac.at/fix/klima/oe71-00/klima2000/klimadaten_oesterreich_1971_frame1.htm).
- ZIMMERMANN, A., G. KNIELY, H. MELZER, W. MAURER und R. HÖLLRIEGL, 1989: Atlas gefährdeter Farn- und Blütenpflanzen der Steiermark. Joanneum-Verein, 302 S.

# Wurzelparameter von Gräsern, Kräutern und Leguminosen als Grundlage zur Bewertung von Trockenheitstoleranz im Grünland

Markus Herndl<sup>1\*</sup>, Matthias Kandolf<sup>1</sup>, Andreas Bohner<sup>1</sup>, Bernhard Krautzer<sup>1</sup>,  
Wilhelm Graiss<sup>1</sup> und Martina Schink<sup>1</sup>

## Zusammenfassung

Trockenheit kann sich auf einen Grünlandbestand in unterschiedlicher Weise auswirken, kurzfristig mit einem Rückgang des Ertragspotentials, langfristig mit Änderungen in der botanischen Zusammensetzung. Bei der Reaktion auf Trockenheit, spielt die Wurzel als wichtigstes Organ bei der Aufnahme von Wasser die bedeutendste Rolle. In dieser Arbeit, werden erste Ergebnisse hinsichtlich Wurzelparameter von Gräsern, Kräutern und Leguminosen als Grundlage zur Bewertung von Trockenheitstoleranz im Grünland vorgestellt. Dazu wurden 15 Gräserarten, fünf Gräserarten sowie fünf Kräuter- und fünf Leguminosenarten in einem Gefäßversuch im Gewächshaus hinsichtlich Anpassung des Wurzelsystems während der Trockenheit (innerhalb der vegetativen Entwicklungsphase) geprüft. Ergebnisse hinsichtlich Wurzel/Spross-Verhältnis weisen die Gräser *Arrhenatherum elatius* und *Festuca rubra* (Gondolin) und das Kraut *Pimpinella saxifraga* mit einem höheren Verhältnis (stresstoleranter), als alle anderen Arten und Sorten aus. Ein Zusammenhang von vergleichsweise höherem Wurzel/Spross-Verhältnis mit einem niedrigen Ellenberg F-Wert, kann aber nur für die Leguminosen eindeutig und für die Kräuter in der Tendenz bestätigt werden. Resultate bezüglich der Anpassung des Wurzelsystems während Trockenheit weisen das Gras *Lolium perenne* (Guru), die Kräuter *Cichorium intybus* und *Daucus carota* und die Leguminose *Lotus corniculatus* als relativ trockenstresstolerant aus. Diese Arten reagierten auf Trockenstress mit einer Verlagerung der Gesamtwurzelmasse in tiefere Schichten (Wurzeltiefe bis 40 cm). Hinsichtlich Wurzeloberfläche und -länge bestätigen die Versuchsergebnisse Untersuchungen aus der Literatur die eine höhere Durchwurzelungsintensität bei den Gramineen im Vergleich zu den Leguminosen festgestellt haben. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Gewächshausversuch sehr gut geeignet ist, Unterschiede in der Anpassung des Wurzelsystems an Trockenstressbedingungen zu beschreiben. Die aufgeführten Gräser, Kräuter und Leguminosen lassen sich je nach Anspruch in Feldversuche bezüglich Ertragsfähigkeit und Qualität für trockene Lagen integrieren und sollten Trockenheit vergleichsweise gut widerstehen können.

**Schlagwörter:** Wurzel, Wurzelsystem, Trockenheit, Grünland, Gewächshaus

## Summary

Drought can affect grassland swards in different ways, at short-term with a decrease in yield potential, at a long-term basis with changes in the botanical composition. Regarding the reaction to drought, roots play the key role as the most important organ at the admission of water. In the present work, first results regarding root parameters of grasses, forbs and legumes as a basis for the evaluation of drought tolerance in grassland are presented. For this purpose, 15 grass species, five grass varieties as well as five forbs and five legume species were examined in a greenhouse pot experiment regarding the adjustment of their root system during drought (within the vegetative development phase). Results regarding root-shoot ratio indicate a better relationship (more stress tolerant) for the grasses *Arrhenatherum elatius* and *Festuca rubra* (Gondolin) and for the forb *Pimpinella saxifraga*, than for all other species and varieties. A connection of comparatively higher root-shoot ratio with a low Ellenberg F-value, can however only be confirmed for the legumes clearly and for the forbs in tendency. Results concerning the adjustment of the root system during drought conditions prove the grass *Lolium perenne* (Guru), the forbs *Cichorium intybus* and *Daucus carota* and the legume *Lotus corniculatus* as relatively drought stress tolerant. These species reacted to drought stress with a misalignment of the total root mass into deeper layers (rooting depth of 40 cm). Regarding root surface and root length, the results confirm investigations from the literature which determined a higher root density for graminaceous compared to legumes. It can be summarized that the greenhouse experiment is well suited to describe differences in the adjustment of the root system to drought stress conditions. The specified grasses, forbs and legumes can be integrated depending upon requirement in field experiments concerning yield potential and quality for dry conditions and should be able to resist drought comparatively well.

**Keywords:** root, root system, drought, grassland, greenhouse

<sup>1</sup> Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein (LFZ), Raumberg 38, A-8952 IRDNING

\* Ansprechpartner: Dr. Markus Herndl, markus.herndl@raumberg-gumpenstein.at

## Einleitung

Die globale Klimaerwärmung und seine regionalen Ausprägungen und Folgen werden in den letzten Jahren immer deutlicher erkennbar. Vor allem das Jahr 2003, mit seiner Hitzewelle und den damit verbundenen regionalen und überregionalen landwirtschaftlichen Schäden, zeigt die Wichtigkeit des Themas Trockenheitsgefährdung. Der mittlere Wasserbedarf von Grünland ist im Vergleich zu andern Kulturarten relativ hoch (ca. 600-800 mm/a; BOHNER et al. 2007). Nach Abschätzungen von EITZINGER et al. (2009), könnte die landwirtschaftliche Grünlandnutzung durch Klimaerwärmung insbesondere in trockenen Regionen aufgrund zunehmenden Trocken- und Hitzestress gefährdet sein. In Österreich würden vor allem Regionen mit einem derzeitigen mittleren Jahresniederschlag von unter 800 mm betroffen sein d.h. hauptsächlich Gebiete des Ostalpenrandes (TRNKA et al. 2008). Klimatische Veränderungen hin zu mehr Trockenheit haben neben Rückgang des Ertragspotentials vor allem Änderungen in der botanischen Zusammensetzung des Grünlandbestandes zur Folge. Das Artenspektrum wird sich langfristig hin zu trockenheitsverträglichen Gräsern, Kräutern und Leguminosen verschieben, die in der Regel meist niedrigere Futterqualität und Erträge aufweisen. Bei der Reaktion auf

Klimaveränderung, insbesondere auf Trockenheitstoleranz, spielt die Wurzel als wichtigstes Organ bei der Aufnahme von Wasser die bedeutendste Rolle. Untersuchungen zeigen, dass sowohl morphologische Parameter wie z.B. Wurzellängendichte oder Wurzelplastizität aber auch physiologische Parameter wie hydraulische Leitfähigkeit oder osmotische Regulation wichtig sind (BELL und SULTAN 1999, HSIAO et al. 2000, VAMERALI et al. 2003). Die Pflanzenarten im Grünland sind hinsichtlich Wurzelmasse und -tiefe unterschiedlich (KLAPP 1943). Grundsätzlich weisen Gräser im Allgemeinen eine größere Wurzelmasse auf, wobei Wurzelmasse und -tiefe tendenziell bei den Untergräsern geringer ist als bei den Obergräsern (KMOCH 1952). Im Vergleich mit den Gräsern durchwurzeln Leguminosen und viele Kräuter den Boden meist weniger intensiv (KULLMANN 1957). In der Studie mit dem Titel "Arten- und Sortenscreening von Gräsern, Kräutern und Leguminosen als Grundlage für Grünlandbewirtschaftung auf trockenen Standorten" (HERNDL et al. 2010) wurden unterschiedlichste Wurzelparameter wie Wurzeltiefe, Wurzel/Spross-Verhältnis, Wurzellänge und -oberfläche erhoben. Das Ziel dieses Beitrages ist, erste Ergebnisse vorzustellen die Wurzelparameter von Gräsern, Kräutern und Leguminosen als Grundlage zur Bewertung von Trockenheitstoleranz im Grünland darstellen.

**Tabelle 1: Herkunft, Ellenberg F-Wert, WT-Wert der in der Studie verwendeten Grünlandarten und -sorten (aus HERNDL et al. 2010)**

Art	Sorte	Herkunft	F-Wert <sup>a</sup>	WT-Wert <sup>b</sup>
<b>Gräser</b>				
<i>Agrostis capillaris</i>	Gudrun	Österreich	x	F
<i>Arrhenatherum elatius</i>	Arone	Deutschland	x	T
<i>Bromus erectus</i>	Ökotyp	Österreich	3	F
<i>Bromus inermis</i>	Keszthelyi-51	Ungarn	4	-
<i>Cynosurus cristatus</i>	Cristal	Österreich	5	F
<i>Dactylis glomerata</i>	Beluga	Frankreich	5	F
<i>Dactylis glomerata</i>	Tandem	Österreich	5	F
<i>Festuca arundinacea</i>	Keszthelyi-50	Ungarn	7	T
<i>Festuca ovina</i>	Bornito	Deutschland	x	F
<i>Festuca pratensis</i>	Pradel	Schweiz	6	F
<i>Festuca pratensis</i>	Preval	Schweiz	6	F
<i>Festuca rubra</i>	Echo	Dänemark	6	F
<i>Festuca rubra</i>	Gondolin	Dänemark	6	F
<i>Festulolium</i>	Hycor	Tschechoslowakei	-	-
<i>Lolium perenne</i>	Guru	Österreich	5	F
<i>Lolium perenne</i>	Tivoli	Dänemark	5	F
<i>Poa angustifolia</i>	Ökotyp	Deutschland	-	-
<i>Poa pratensis</i>	Lato	Deutschland	5	F
<i>Poa pratensis</i>	Oxford	Niederlande	5	F
<i>Trisetum flavescens</i>	Gunther	Austria	x	F
<b>Kräuter</b>				
<i>Cichorium intybus</i>	Ökotyp	-	4	T
<i>Daucus carota</i>	Ökotyp	Österreich	4	T
<i>Pimpinella saxifraga</i>	Ökotyp	Deutschland	3	T
<i>Plantago lanceolata</i>	Ökotyp	-	x	T
<i>Sanguisorba minor</i>	Ökotyp Vicenca	Italien	3	T
<b>Leguminosen</b>				
<i>Lotus corniculatus</i>	Rocco	Deutschland	4	F
<i>Medicago sativa</i>	Franken neu	Deutschland	4	T
<i>Onobrychis viciifolia</i>	Ökotyp	-	3	T
<i>Trifolium pratense</i>	Tedi	Frankreich	5	T
<i>Trifolium repens</i>	Milkanova	Dänemark	5	F

<sup>a</sup> F-Wert nach ELLENBERG et al. (1992); x=indifferent; <sup>b</sup> WT-Wert nach DIERSCHKE und BRIEMLE (2002)

## Material und Methoden

### Grünlandarten und -sorten

Die Grünlandarten und -sorten für den Versuch wurden nach Kriterien wie Verwendung in Grünlandneuanfaat- und Nachsaatmischungen, F- und WT-Wert ausgewählt (Tabelle 1). Um eine möglichst realistische Entwicklung der Pflanzen zu ermöglichen, wurde das Saatgut der einzelnen Arten und Sorten entsprechend ihrer Keimdauer gruppiert, angekeimt und anschließend in einer Kühlkammer bei 4°C 50 Tage lang vernalisiert

### Gewächshausversuch

Der Versuch erfolgte in einem temperatursteuerbaren Glashaus mit einer durchschnittlichen Wachstumstemperatur über die Versuchsdauer von 62 Tagen von 22°C ±1,5°C. Die Arten und Sorten wurden auf 2 Blöcke randomisiert mit jeweils 3 Wiederholungen aufgeteilt (Abbildung 1), wobei die Nährstoffversorgung dem Nährstoffbedarf angepasst wurde und über einen Flüssigdünger (6% N, 5% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 5% K<sub>2</sub>O) der dem Gießwasser zugesetzt wurde erfolgte. Die Auspflanzung erfolgte am 08.04.2009 in PVC Abwasserrohre (1 m Länge, 10 cm Durchmesser) die der Länge nach aufgeschnitten, mit einem Klebeband abgedichtet und mit Quarzsand ME 0,5–2 mm (Quarzwirke) gefüllt waren (Abbildung 1). Um ein freies Dränen des Gießwassers zu ermöglichen, wurde das untere Ende der Röhre mit einem Vlies abgedeckt. Zusätzlich wurden die Rohre mit einer weißen PE -Folie umwickelt, um ein zu starkes Erwärmen des Substrates zu verhindern. Nach einer Etablierungsphase von 1 Monat (Gießmenge konstant bei 100 ml/Röhre und Tag), wurde im Block 2 die Wassermenge bei Feldkapazität durch wiegen ermittelt und bei Block 1 75% dieser Menge für eine Woche verabreicht. Täglich wurde durch Wägung der Röhren der Wasserverbrauch der Pflanzen ermittelt und jeweils auf Feldkapazität bzw. 75% aufgegossen. Diese Prozedur wurde in wöchentlichen Schritten auf 50 und abschließend auf 30% der Feldkapazität auf Block 1 angewandt.



Abbildung 1: Aufteilung der Versuchsvarianten im Gewächshaus

### Erhebung von Wurzelparametern

Um den Einfluss von Trockenheit unterirdisch quantifizieren zu können, wurden die Pflanzröhren nach Ernte der Biomasse bei -20°C tief gefroren. In einem nächsten Schritt wurden die Wurzeln ausgewaschen. Dazu wurden alle 10 cm Scheiben mit einer Säge abgetrennt und mit warmem Wasser auf einem Sieb ausgewaschen. Die ausgewaschenen Wurzeln wurden bis zur weiteren Bearbeitung in einer 15 % Ethanollösung bei 10°C gelagert (BÖHM 1979). Nach einer Aufbereitung und Einfärbung der Wurzeln mit Azur-Eosin-Methylenblau wurden diese mit einem Scanner (Epson Perfection V700 Photo) gescannt und mit der WinRHIZO 4.1 software (ARSENAULT et al. 1995) hinsichtlich Wurzellänge und Wurzeloberfläche ausgewertet. Da diese Methode relativ zeitaufwendig war, konnten diese Parameter nur für ausgewählte Arten ermittelt werden. Nach dem Scannen wurden die Wurzelproben bei 105°C getrocknet und die Wurzelrockenmasse ermittelt. SAS Generalized Linear Models procedure (GLM) wurde verwendet, um die Versuchsmittelwerte und Blockeffekte zu bestimmen (SAS INSTITUTE, 2000).

## Ergebnisse und Diskussion

### Wurzel/Spross-Verhältnis

Ein wichtiges Merkmal zur Bewertung der Trockenheitstoleranz ist das Wurzel/Spross-Verhältnis. Tabelle 2 zeigt das Wurzel/Spross-Verhältnis sowie die Wurzel- und Sprosstrockenmasse der geprüften Gräser, Kräuter und Leguminosen für Block 1 und Block 2. Bei den Gräsern, wiesen *Arrhenatherum elatius* und *Festuca rubra* (Gondolin) zwischen den Blöcken einen signifikanten ( $\alpha=0,05$ ) Unterschied im Merkmal Wurzel/Spross-Verhältnis auf. Zwischen den Arten und Sorten innerhalb der Blöcke, traten keine signifikanten Unterschiede auf. Beim Vergleich zwischen Block 1 und 2 bei den Kräutern und Leguminosen war lediglich *Pimpinella saxifraga* signifikant höher im Block 1 als im Block 2. Bei den Leguminosen gab es keinen signifikanten Unterschied zwischen den Arten. Bei den anderen Merkmalen wie Wurzel- und Sprosstrockenmasse war über beide Blöcke sowohl bei den Gräsern als auch bei den Kräutern und Leguminosen keine Art bzw. Sorte signifikant über die Blöcke hinweg unterschiedlich. Um die Ergebnisse besser einordnen bzw. interpretieren zu können, wurden sie mit dem aus der Literatur bekannten Ellenberg F-Wert (DIERSCHKE und BRIEMLE 2002) gegenübergestellt. Vergleicht man das Wurzel/Spross-Verhältnis in Block 1 mit dem F-Wert und der Einteilung in Flach- und Tiefwurzler (Abbildung 2), kann man einige Tendenzen erkennen, die jedoch über Arten hinweg teilweise nicht statistisch abgesichert sind. Generell gilt, dass stresstolerante Pflanzen ein hohes Wurzel/Spross-Verhältnis aufweisen, d.h. sie investieren im Verhältnis viel in die unterirdische Biomasse (HENDRY und GRIME 1993). Die Ergebnisse dieser Studie zeigen für Leguminosen einen eindeutigen und für Kräuter einen tendenziellen Zusammenhang zwischen hohem Wurzel/Spross-Verhältnis und niedrigem F-Wert. Bei den Gräsern kann kein Zusammenhang erkannt werden. Aus der Literatur bekannte Zusammenhänge wie eine größere Biomasse



Tabelle 2: Wurzel- und Sprosstrockenmasse sowie das Wurzel/Spross-Verhältnis der geprüften Arten und Sorten (aus HERNDL et al. 2010)

Art	Sorte	Block 1			Block 2		
		TM Wurzel [g]	TM Spross [g]	W/S Verh.	TM Wurzel [g]	TM Spross [g]	W/S Verh.
<b>Gräser</b>							
<i>Agrostis capillaris</i>	Gudrun	0,19	1,28	0,15	0,55	5,72	0,10
<i>Arrhenatherum elatius</i>	Arone	0,76	5,27	0,14	1,22	5,31	0,23
<i>Bromus erectus</i>	Ökotyp	0,22	1,30	0,17	0,30	1,96	0,17
<i>Bromus inermis</i>	Keszthelyi-51	0,95	3,36	0,28	1,29	4,55	0,28
<i>Cynosurus cristatus</i>	Cristal	0,11	0,50	0,21	0,46	2,08	0,22
<i>Dactylis glomerata</i>	Beluga	0,39	2,42	0,16	1,51	6,98	0,22
<i>Dactylis glomerata</i>	Tandem	0,48	3,18	0,15	1,38	9,65	0,14
<i>Festuca arundinacea</i>	Keszthelyi-50	0,23	1,45	0,16	0,47	2,45	0,19
<i>Festuca ovina</i>	Bornito	0,07	0,50	0,14	0,07	0,53	0,13
<i>Festuca pratensis</i>	Pradel	0,57	3,12	0,18	0,72	4,08	0,18
<i>Festuca pratensis</i>	Preval	0,46	3,07	0,15	0,71	4,76	0,15
<i>Festuca rubra</i>	Echo	0,31	2,20	0,14	0,18	1,55	0,12
<i>Festuca rubra</i>	Gondolin	0,39	3,91	0,10	0,50	2,61	0,19
<i>Festulolium</i>	Hycor	0,37	2,30	0,16	0,76	5,66	0,13
<i>Lolium perenne</i>	Guru	0,96	5,16	0,19	1,33	10,06	0,13
<i>Lolium perenne</i>	Tivoli	0,45	3,11	0,15	1,04	10,18	0,10
<i>Poa angustifolia</i>	Ökotyp	0,11	0,70	0,16	0,30	2,05	0,15
<i>Poa pratensis</i>	Lato	0,09	0,77	0,12	0,40	2,30	0,17
<i>Poa pratensis</i>	Oxford	0,05	0,63	0,08	0,16	1,22	0,13
<i>Trisetum flavescens</i>	Gunther	0,21	1,90	0,11	0,32	2,24	0,10
LSD <sub>5</sub>		0,30	2,68	0,10	0,48	3,82	0,10
LSD <sub>5</sub> (Block1 und Block 2)		0,28	2,39	0,07	0,28	2,39	0,07
<b>Kräuter</b>							
<i>Cichorium intybus</i>	Ökotyp	0,74	2,50	0,30	0,93	3,75	0,25
<i>Daucus carota</i>	Ökotyp	0,25	2,43	0,10	0,54	4,76	0,11
<i>Pimpinella saxifraga</i>	Ökotyp	0,28	1,26	0,22	0,33	2,19	0,15
<i>Plantago lanceolata</i>	Ökotyp	0,53	4,15	0,13	0,88	7,17	0,12
<i>Sanguisorba minor</i>	Ökotyp	0,17	0,96	0,18	0,41	2,09	0,19
LSD <sub>5</sub>		0,38	2,13	0,08	0,86	3,81	0,12
LSD <sub>5</sub> (Block1 und Block 2)		0,39	2,00	0,07	0,39	2,00	0,07
<b>Leguminosen</b>							
<i>Lotus corniculatus</i>	Rocco	0,06	0,42	0,14	0,10	2,02	0,05
<i>Medicago sativa</i>	Franken neu	0,53	2,99	0,18	0,59	3,21	0,18
<i>Onobrychis viciifolia</i>	Ökotyp	0,19	0,81	0,24	0,56	3,80	0,15
<i>Trifolium pratense</i>	Tedi	0,15	1,15	0,19	0,28	1,96	0,14
<i>Trifolium repens</i>	Milkanova	0,10	0,66	0,13	0,18	3,61	0,05
LSD <sub>5</sub>		0,24	1,38	0,17	0,45	5,19	0,11
LSD <sub>5</sub> (Block1 und Block 2)		0,21	2,31	0,10	0,21	2,31	0,10

der Obergräser und damit verbunden eine vergleichsweise höhere Wurzelmasse wie die feineren Untergräser, konnten auch in dieser Studie gefunden werden. Auch die arttypischen Unterschiede in der Wurzelmassenbildung und Wurzeltiefgang aus den gleichen Untersuchungen können im Wesentlichen bestätigt werden (KMOCH 1952).

### Wurzelmasseverteilung

Wurzeltiefe und Wurzelmasseverteilung über die Wurzeltiefe hinweg, sind wichtige Parameter um die Ursachen von Trockenheitstoleranz umfassend bewerten zu können. *Abbildung 3a* zeigt die Wurzelmassenverteilung der untersuchten Gräser über den durchwurzelten Horizont hinweg. Zieht man einen Vergleich hinsichtlich Wurzeltiefe in der trockenstressinduzierten Variante (Block 1) und Block 2

ergab sich für *Arrhenatherum elatius*, *Festuca pratensis* (Pradel), *Lolium perenne* (Guru), *Lolium perenne* (Tivoli), *Poa pratensis* (Oxford) eine tiefere Wurzel in Block 1 als in Block 2. Hinsichtlich Anteils der Gesamtwurzelmasse in den unterschiedlichen Wurzeltiefen gab es sowohl über die Arten und Sorten als auch über die Blöcke einige Unterschiede. Jene Arten die beinahe 100% der Gesamtwurzelmasse in den obersten 20 cm hatten und nur geringe Verschiebungen in der Wurzelverteilung bei Trockenstress zeigten sind *Cynosurus cristatus*, *Festuca ovina*, *Poa angustifolia*, *Poa pratensis* (Oxford, Lato) und *Trisetum flavescens*. *Arrhenatherum elatius* zeigte bei Trockenstress eine deutliche Verschiebung der Wurzelmasse in tiefere Schichten, wohingegen *Festuca pratensis* (Preval) eine Verschiebung der Wurzelmasse in die Tiefe bei ungestressten Verhältnissen erkennen ließ. Aus der Literatur ist bekannt, dass Gräser in hohem Maße Wasser

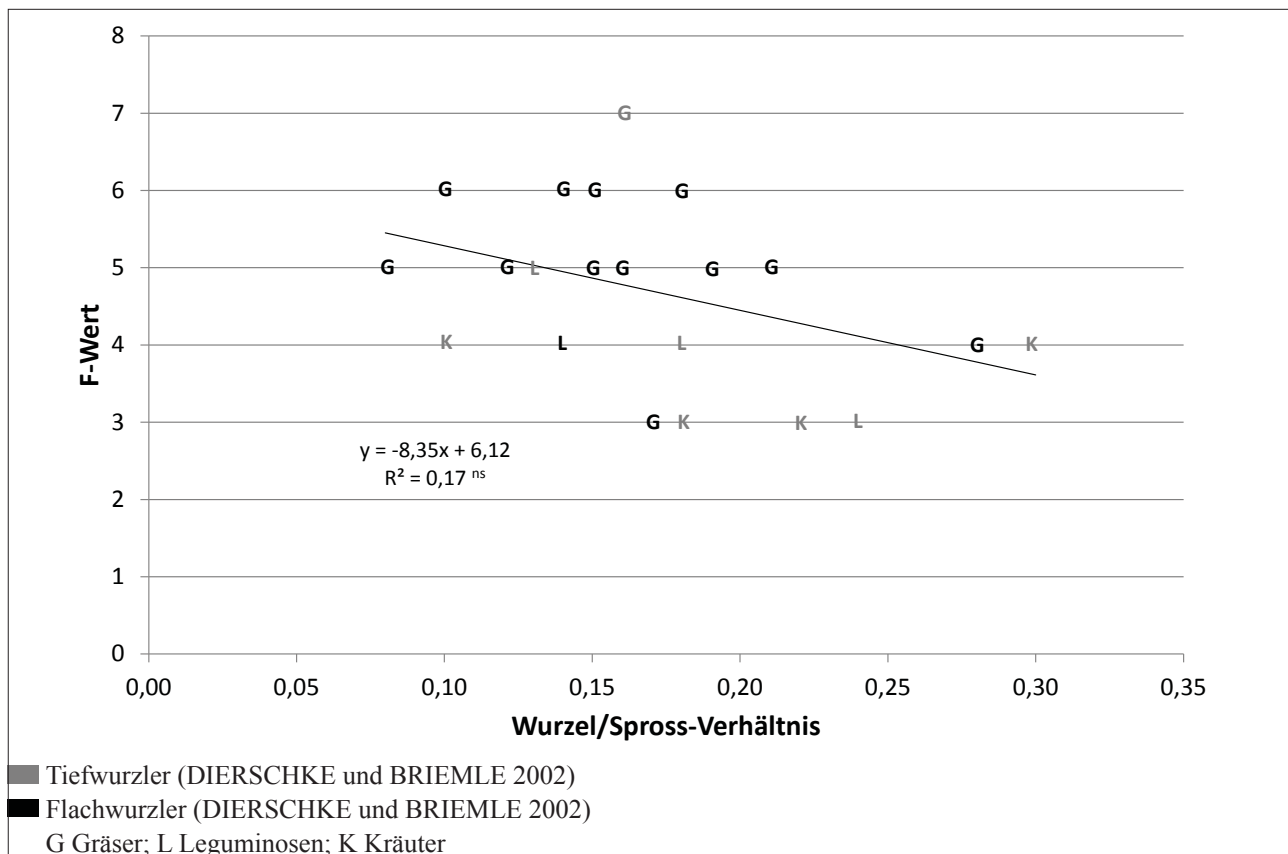


Abbildung 2: Beziehung zwischen Ellenberg F-Wert und Wurzel/Spross-Verhältnis der geprüften Gräser, Kräuter und Leguminosen

aus der obersten Bodenschicht entnehmen können (KMOCH 1952). Es zeigt sich, dass 70-90% der Wurzelmasse sehr flach, in einer Tiefe von etwa 10 cm konzentriert sind, was bei fast allen Arten in dieser Studie der Fall ist und daher bestätigt werden kann.

Abbildung 3b zeigt die Wurzelmasseverteilung der untersuchten Kräuter über den durchwurzelten Horizont hinweg. Die Reaktion auf Trockenstressinduzierung (Vergleich Block 2 zu Block 1) wirkte sich bei *Daucus carota* in einer Zunahme der Wurzeltiefe bzw. in einer Verlagerung der Wurzelmasse in tiefere Schichten aus. Die anderen Kräuter zeigten keine wesentlichen Veränderungen bei der Induzierung von Trockenstress im Vergleich zur ungestressten Variante. Die Verteilung der Gesamtwurzelmasse der geprüften Leguminosen ist ebenfalls in Abbildung 3b ersichtlich. Beim Vergleich der beiden Blöcke war bei den Arten *Lotus corniculatus*, *Trifolium pratense* und *Trifolium repens* eine deutliche Verlagerung der Gesamtwurzelmasse in tiefere Schichten in Block 1 im Vergleich zu Block 2 zu sehen. Bei den restlichen Leguminosen war kein Einfluss des Trockenstresses auf die Wurzeltiefenverteilung festzustellen. Untersuchungen von PETERSON et al. 1984 und CLOUPEK 1999 zeigten, dass die Trockenheitstoleranz von Alfalfa durch die Selektion auf Wurzelgewicht und Wurzelsystemgröße gefördert werden konnte. Ein Konnex mit dem Wurzel/Spross-Verhältnis kann für die Art *Lolium perenne* (Guru) gezogen werden, die in der trockenstressinduzierten Variante eine tiefere Wurzel ausbildete und auch ein hohes

Wurzel/ Spross-Verhältnis aufwies. Diese Ergebnisse würden die vorher genannten Studien hinsichtlich Trockentoleranz und dem Zusammenhang Wurzeltiefe und erhöhtem Wurzel/ Spross-Verhältnis prinzipiell bestätigen. Bei den Kräutern würde auch *Daucus carota* dem gleichen Prinzip folgen. Da aber auch Arten wie *Cynosurus cristatus*, *Cichorium intybus* ein relativ hohes Wurzel/Spross-Verhältnis hatten und keine Verlagerung der Wurzel in tiefere Schichten bei Trockenstress zeigten, kann dieser Zusammenhang nicht über alle Arten hinweg verallgemeinert werden. Diese Feststellung wird auch dadurch bestätigt, dass nahezu bei allen Leguminosen bei der trockenstressinduzierten Variante eine Verlagerung der Gesamtwurzelmasse in tiefere Schichten erfolgte, obwohl das Wurzel/Spross-Verhältnis relativ niedrig war.

### Wurzeloberfläche und -länge

Wurzellänge und Wurzeloberfläche sind Parameter die das Potential Wasser aufzunehmen aufzeigen sollen. Die Ergebnisse diesbezüglich in dieser Untersuchung lassen wegen des hohen Aufwandes für dessen Erhebung nur für einzelne Arten Bewertungen zu. Abbildung 4a zeigt die Wurzellänge und -oberfläche der Arten *Arrhenatherum elatius* und *Lolium perenne* (Tivoli). Bei *Arrhenatherum elatius* zeigte sich bis in die Tiefe von 20 cm eine erhöhte Wurzeloberfläche in Block 2 im Vergleich zu Block 1, wohingegen ab der Tiefe von 30 cm die Wurzellängen bzw. -oberflächen in Block 1 überwogen bzw. die Wurzeln in

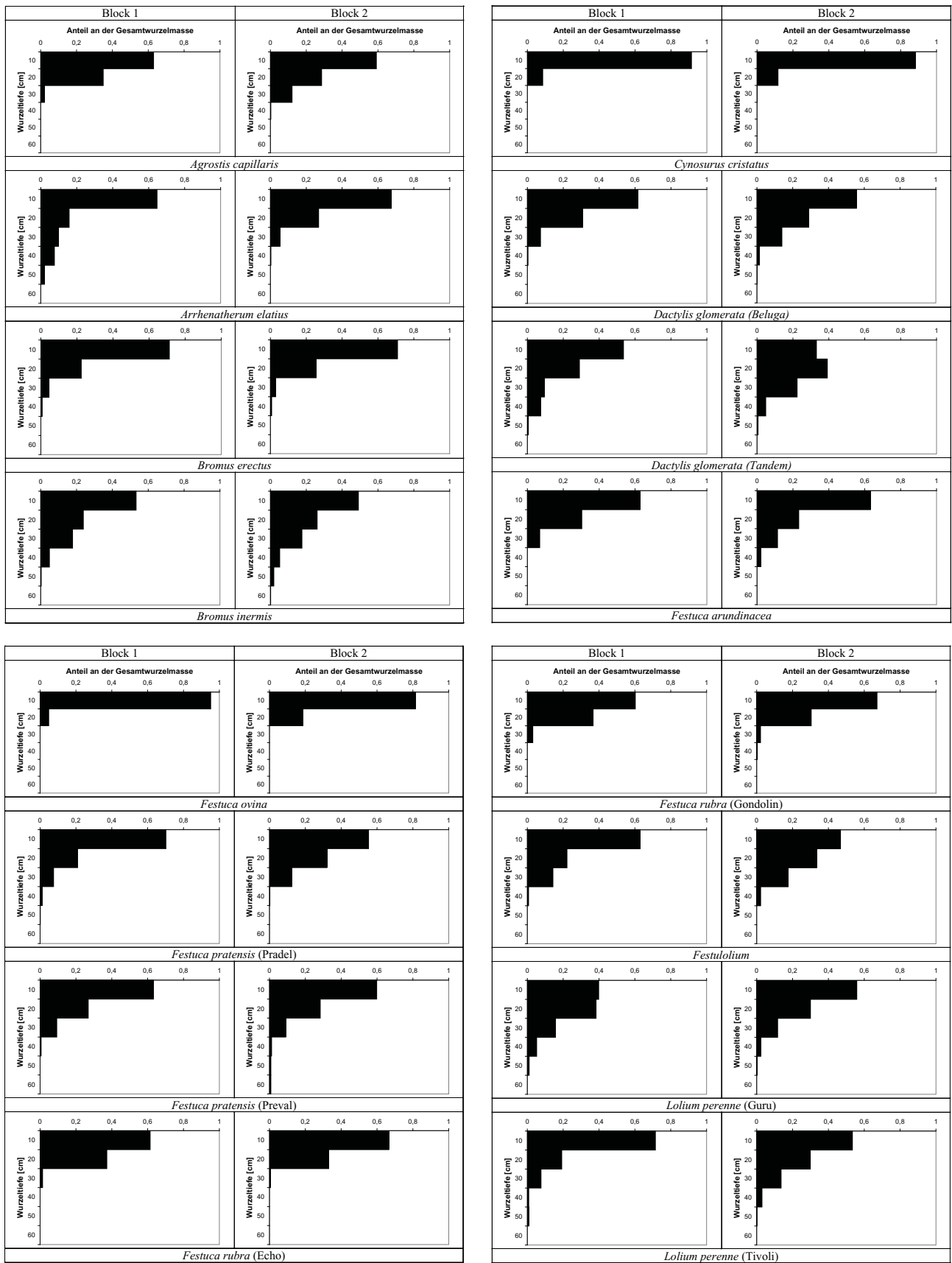
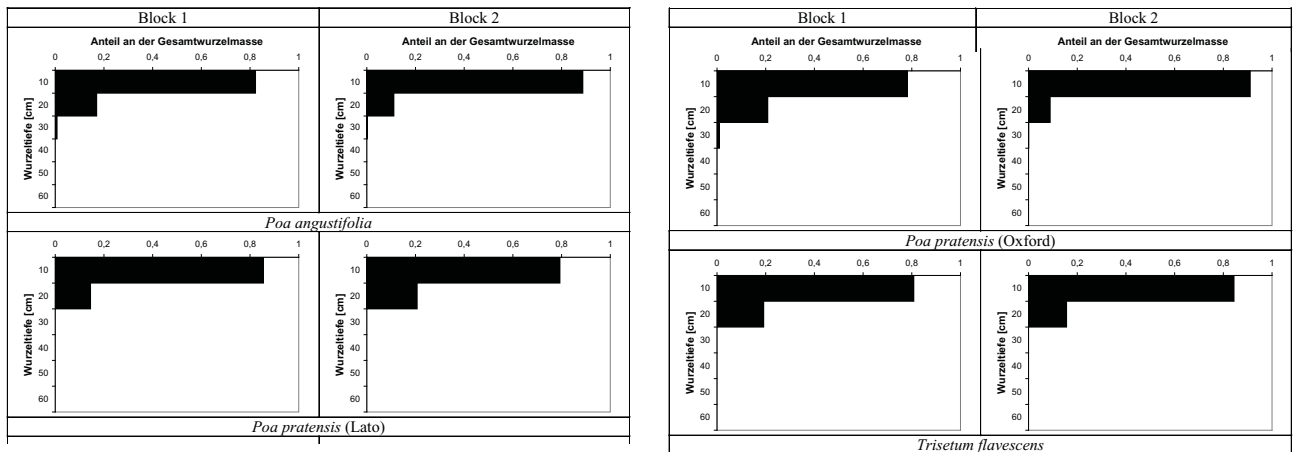


Abbildung 3a: Anteil der Gesamtwurzelmasse in den unterschiedlichen Wurzeltiefen der geprüften Gräser (aus HERNDL et al. 2010)



Fortsetzung Abbildung 3a: Anteil der Gesamtwurzelmasse in den unterschiedlichen Wurzeltiefen der geprüften Gräser (aus HERNDL et al. 2010)

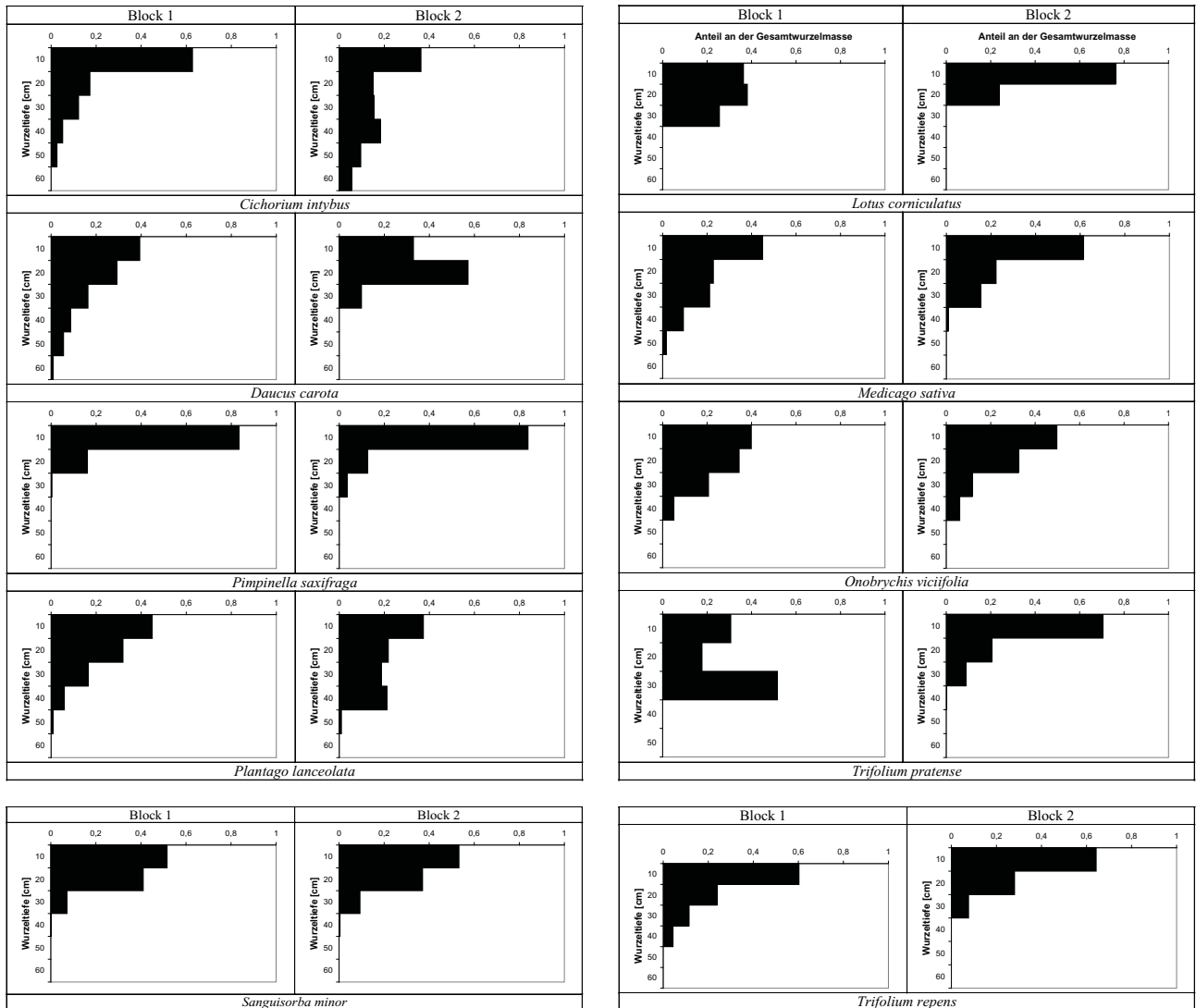


Abbildung 3b: Anteil der Gesamtwurzelmasse in den unterschiedlichen Wurzeltiefen der geprüften Kräuter und Leguminosen (aus HERNDL et al. 2010)

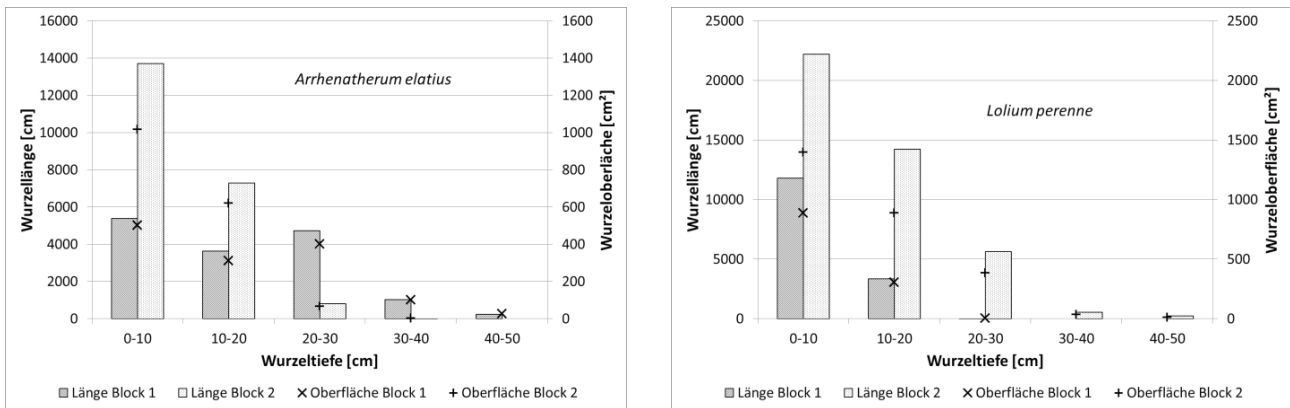


Abbildung 4a: Wurzellänge und -oberfläche einer Auswahl der geprüften Gräser

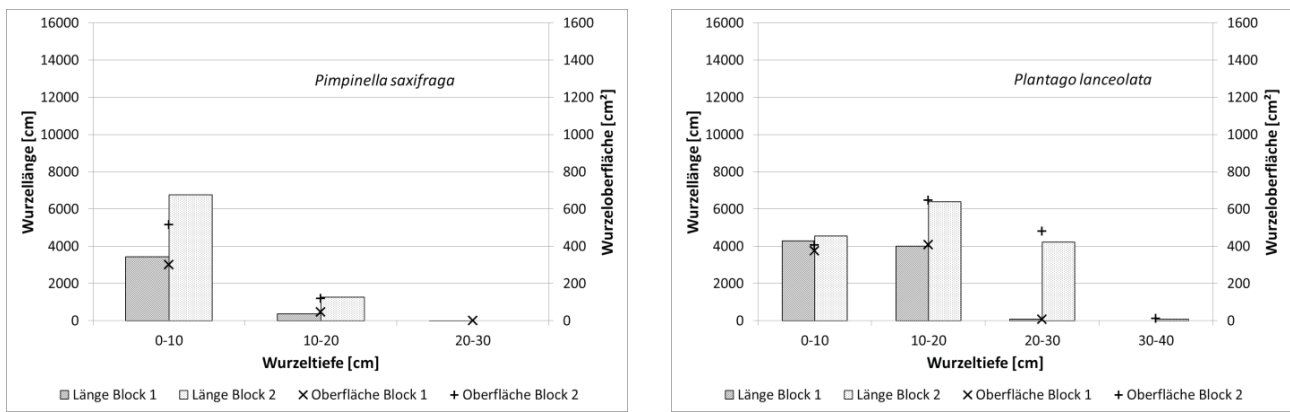


Abbildung 4b: Wurzellänge und -oberfläche einer Auswahl der geprüften Kräuter

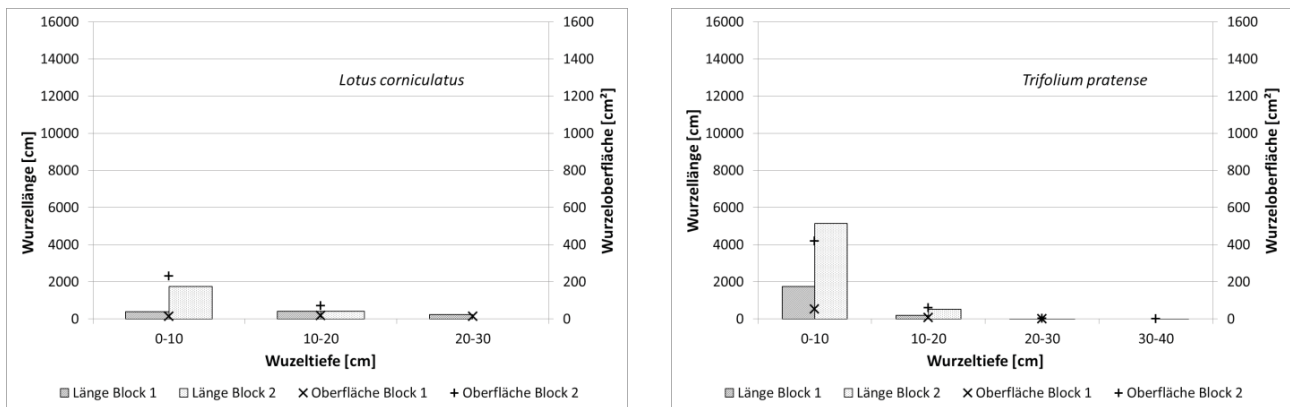


Abbildung 4c: Wurzellänge und -oberfläche einer Auswahl der geprüften Leguminosen

tieferen Schichten reichten. Bei *Lolium perenne* (Tivoli) reichten die Wurzeln in Block 1 nur bis 30 cm und sowohl die Oberfläche als auch die Länge waren geringer als in Block 2 wo sich diese Parameter bis 50 cm erstreckten. Bei *Arrhenatherum elatius* zeigte sich im Vergleich zu *Lolium perenne* (Tivoli) in Block 1 eine größere Wurzeloberfläche und -länge in tieferen Schichten, wobei bei *Lolium perenne* (Tivoli) beide Größen in den obersten 20 cm im Vergleich erhöht waren. Diese Tatsache lässt vermuten, dass bei Trockenheit *Arrhenatherum elatius* im Vergleich zu *Lolium perenne* (Tivoli) in tieferen Schichten mehr Wasser aufnehmen kann bzw. eine effizientere Wasseraufnahme hat.

Bei den Kräutern wurden die Arten *Pimpinella saxifraga* und *Plantago lanceolata* hinsichtlich Wurzellänge und Wurzeloberfläche untersucht (Abbildung 4b). Bei *Pimpinella saxifraga* reichten die Wurzeln in Block 1 bis in eine Tiefe von 30 cm und waren sowohl im Parameter Wurzeloberfläche als auch Wurzeltiefe geringer als im Block 2. Für *Plantago lanceolata* war die Wurzellänge und -oberfläche in der Tiefe bis 10 cm in Block 1 und Block 2 annähernd gleich, differenzierte sich aber zugunsten von Block 2 ab einer Tiefe von 20 cm wobei die Tiefe in Block 2 bis 40 cm reichte. Bei *Plantago lanceolata* und *Pimpinella saxifraga* beschränkte sich der größte Anteil der Wurzeloberfläche und -länge in Block 1 auf die obersten 20 cm, wobei bei

*Plantago lanceolata* sich der Anteil gleichmäßig auf die Tiefen 10-20 und 20-30 cm aufteilte und diese Aufteilung annähernd gleich war wie in Block 2. Die Interpretation dieser Ergebnisse ist, dass *Plantago lanceolata* in den obersten 20 cm Wasser auch bei Trockenheit effizienter aufnehmen konnte als *Pimpinella saxifraga*. *Lotus corniculatus* teilte seine Wurzeloberfläche bzw. -länge unter Trockenstress relativ gleichmäßig auf die Wurzeltiefe 0-30 cm auf, im Gegensatz zu Block 2, wo der Hauptanteil in den obersten 10 cm lag. Auch hier kann angenommen werden, dass bei Trockenheit die Schichten 0-30 cm gleichmäßig genutzt werden können. *Abbildung 4c* zeigt die Wurzellänge und -oberfläche der Leguminosen *Lotus corniculatus* und *Trifolium pratense*. Die Wurzellänge bzw. -oberfläche von *Lotus corniculatus* in Block 2 war hauptsächlich auf die obersten 10 cm konzentriert, wobei die Wurzellänge in 10-20 cm in Block 1 annähernd gleich war wie in Block 2. Bei *Trifolium pratense* war in der Wurzeltiefe von 0-10 cm die komplette Wurzelmasse akkumuliert, während sowohl bei der Wurzellänge als auch bei der Wurzeloberfläche der Hauptanteil in Block 1 im Vergleich zu Block 2 zu finden war.

Der Anteil der Wurzeloberfläche und -länge bei *Trifolium pratense* lag bei annähernd 100% in den obersten 20 cm wobei sich ein eklatanter Unterschied in der Größenordnung zwischen Block 1 und 2 ergab. *Trifolium pratense* reagierte auf Trockestressinduzierung mit einer Reduzierung seiner Wurzeloberfläche und seiner Wurzellänge. Allgemein bestätigen die Versuchsergebnisse Untersuchungen von KULLMANN 1957, der eine höhere Durchwurzelungsintensität (Oberfläche) bei den Gramineen im Vergleich zu den Leguminosen feststellt. Weiters kann auch mit den Ergebnissen in dieser Studie bestätigt werden, dass nicht die Art mit den höchsten Wurzelgewichten auch die höchsten Oberflächenwerte aufweist.

## Literatur

- ARSENAULT, J.L., S. POULEUR, C. MESSIER and R. GUAY, 1995: WinRhizo, a root measuring system with a unique overlap correction method. *Horticultural Science* 30, 906.
- BELL, D.L. and S.E. SULTAN, 1999: Dynamic phenotypic plasticity for root growth in *Polygonum*: a comparative study. *American Journal of Botany* 86, 807-819.
- BOHNER, A., G. EDER und M. SCHINK, 2007: Nährstoffkreislauf und Stoffflüsse in einem Grünland Ökosystem. Bericht HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 12. Gumpensteiner Lysimetertagung, 17.-18.4.2007, 91-99.
- BÖHM, W., 1979: Methods of studying root systems. *Ecological Studies: Analysis and Synthesis*, vol 33. Springer, Berlin Heidelberg New York.
- CHLOUPEK, O., M. SKACEL and M. EHRENBERGEROVA, 1999: Effect of divergent selection for root size in fieldgrown alfalfa. *Canadian Journal of Plant Science*, 79, 93-95.
- DIERSCHKE, H. und G. BRIEMLE, 2002: Kulturgrasland. Wiesen, Weiden und verwandte Staudenfluren. - Ulmer-Verlag, Stuttgart S.239.
- EITZINGER, J., K.C. KERSEBAUM und H. FORMAYER, 2009: Landwirtschaft im Klimawandel - Auswirkungen und Anpassungsstrategien für die Land- und Forstwirtschaft in Mitteleuropa. <http://de.agrimedia.com>, Agrimedia, D-29459 Clenze, Deutschland.
- ELLENBERG, H., H.E. WEBER, R. DÜLL, V. WIRTH, W. WERNER und D. PAULISSEN, 1992: Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa, 2. Auflage, Scripta Geobotanika XVIII.
- HENDRY, G. and J. GRIME, 1993: Methods in Comparative Plant Ecology: A laboratory manual. Chapman & Hall, London, S.252.
- HERNDL, M., M. KANDOLF, A. BOHNER, B. KRAUTZER und W. GRAISS, 2010: Arten- und Sortenscreening von Gräsern, Kräutern und Leguminosen als Grundlage für Grünlandbewirtschaftung auf trockenen Standorten, Abschlussbericht.
- HSIAO, T.C. and L.K. XU, 2000: Sensitivity of growth of roots versus leaves to water stress: biophysical analysis and relation to water transport. *Journal of Experimental Botany*, 51, 1595-1616.
- KLAPP, E., 1943: Über die Wurzelverbreitung der Grasnarbe bei verschiedener Nutzungsweise und Pflanzengesellschaft. *Zeitschrift Pflanzenbau* 19, 221-236.
- KMOCH, H.G., 1952: Über den Umfang und einige Gesetzmäßigkeiten der Wurzelmassenbildung unter Grasnarben. *Zeitschrift Acker- und Pflanzenbau* 95, 363-380.
- KULLMANN, A., 1957: Zur Intensität der Bodendurchwurzelung. *Zeitschrift Acker- und Pflanzenbau* 103, 189-197.
- PEDERSON, G.A., W.A. KENDALL and R.R. Jr. HILL, 1984: Effect of divergent selection for root weight on genetic variation for root and shoot characteristics in alfalfa. *Crop Science*, 24, 570-573.
- SAS INSTITUTE INC., 2000: SAS/STAT User's Guide. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.
- TRNKA, M., K. SEMERADOVA und Z. ZALUD, 2008: Änderung des Grünlandproduktionspotentials (ECHAM Klimascenario 2050) In: (ed) J. Eitzinger, K. Kersebaum, 2009. Landwirtschaft im Klimawandel - Auswirkungen und Anpassungsstrategien für die Land- und Forstwirtschaft in Mitteleuropa. S. 197.
- VAMERALI, T., M. SACCOMANI, S. BONA, G. MOSCA, M. GUARISE and A. GANIS, 2003: A comparison of root characteristics in relation to nutrient and water stress in two maize hybrids. *Plant and Soil* 255, 157-167.

# Effects of pathogenic and symbiotic fungi on root exudation of tomato in intercropping systems

Karin Hage-Ahmed<sup>1\*</sup>, Vladimir Chobot<sup>2</sup>, Andreas Voglgruber<sup>2</sup>, Franz Hadacek<sup>2</sup>  
und Siegrid Steinkellner<sup>1</sup>

## Zusammenfassung

Die Rhizosphäre ist ein sehr dynamischer Lebensraum, wo vielfältige Interaktionen zwischen Pflanzen und Mikroorganismen und zwischen Pflanzen bzw. Mikroorganismen untereinander stattfinden. Diese Interaktionen spielen eine wichtige Rolle sowohl in der Entstehung von Infektionen, hervorgerufen durch Pathogene, als auch in der Etablierung von günstigen Kolonisierungen der Wurzeln durch Mikroorganismen. Es ist weiters bekannt, dass pflanzenspezifische Signalstoffe an diesen Interaktionen beteiligt sind, dennoch gibt es noch einige ungeklärte Fragen dazu. Aus diesem Grund wurde ein Modellsystem entwickelt bestehend aus der Tomate (*Solanum lycopersicum* L.), dem Lauch (*Allium porrum* L.) als Mischkulturpartner, dem bodenbürtigen Pathogen *Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici* (FOL) und dem arbuskulären Mykorrhizapilz *Glomus mosseae* (AMF).

Die Tomate/Lauch Kombinationen wurden in Töpfen kultiviert und den folgenden Behandlungen unterzogen: FOL, AMF, FOL und AMF in Kombination. Wurzelgewichte, AMF Kolonisationsgrade und FOL Infektionsraten wurden untersucht. Weiters wurden mit Wurzelexsudaten in-vitro Tests mit FOL durchgeführt, um Effekte auf Sporenkeimrate und Myzelentwicklung untersuchen zu können. Zusätzlich wurden die Wurzelexsudate auf ihre Inhaltsstoffe (z.B. Zucker, Sekundärmetaboliten) untersucht, um Schlüsselkomponenten identifizieren zu können.

**Schlagwörter:** *Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici*, *Glomus mosseae*, arbuskuläre Mykorrhizapilze, Sekundärmetaboliten, root exudates

## Summary

The rhizosphere is a very dynamic environment where several plant–microbe, plant–plant and microbe–microbe interactions take place. These interactions play an important role in the development of pathogenic infection as well as in beneficial colonization of plant roots by microorganisms. It is also known that signal compounds of plants are involved in these interactions. However, the picture of these signals is not clear yet. Therefore a model system was created consisting of tomato (*Solanum lycopersicum* L.), the intercropping partner leek (*Allium porrum* L.), the soilborne tomato pathogen *Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici* (FOL) and the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* (AMF).

Tomato/leek combinations were grown together in pots and received the following treatments: FOL, AMF, FOL and AMF in combination. Root weights, AMF colonization rates and FOL infection rates were assessed. Furthermore, root exudates were collected for in vitro tests of FOL to determine their effects on germination rate and mycelial development. Additionally, root exudates were analysed for their components (e.g. sugars, secondary metabolites) to identify key compounds.

**Keywords:** *Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici*, *Glomus mosseae*, arbuscular mycorrhizal fungi, plant metabolites, root exudates

## Introduction

The rhizosphere is a very dynamic environment where several plant–microbe, plant–plant and microbe–microbe interactions take place. These interactions play an important role in the development of pathogenic infection as well as in beneficial colonization of plant roots by microorganisms. It is also known that signal compounds are involved in these interactions. Root exudates, as signals from the plant side (NELSON 1991), offer a wide range of different compounds such as sugars, sugar alcohols, organic and amino acids, and secondary me-

tabolites, such as phenolic acids and flavonoids (BERTIN et al. 2003). However, it is not clear yet how compounds in root exudates affect the development of pathogenic fungi in the rhizosphere. A better knowledge of the role of root exudates in plant–pathogen interactions would provide new prospects for control strategies against soilborne fungi. To get more insights in such interactions we studied a model system consisting of tomato (*Solanum lycopersicum* L.), the intercropping partner leek (*Allium porrum* L.), the soilborne tomato pathogen *Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici* (FOL) and the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* (AMF).

<sup>1</sup> Institute of Plant Protection, Department of Applied Plant Sciences and Plant Biotechnology, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, Peter-Jordan-Straße 83, A-1190 VIENNA

<sup>2</sup> Department for Chemical Ecology and Ecosystem Research, Faculty of Life Sciences, University of Vienna, Althanstraße 14, A-1090 VIENNA

\* Ansprechpartner: DI Karin Hage-Ahmed, karin.hageahmed@boku.ac.at

## Material and methods

For this experiment 21-day-old tomato (cv. "Tiny Tim") and 63-day-old leek (cv. "Golem") seedlings were potted together in a mixture of potting soil, perlite and sand (1:1:1 v/v/v). The plants received the following treatments: FOL, AMF and AMF+FOL. For FOL inoculation tomato seedlings were dipped for 5 min in a spore suspension ( $1 \times 10^5$  microconidia/ml) of *Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici* isolate "Fol 007". For AMF inoculation a commercially available inoculum of *Glomus mosseae* (BEG 12, Biorize/Agrauxine, Quimper, France) was used. Uninoculated tomato and leek and tomato and tomato plants were added as control treatments to the experimental set-up. Plants were irrigated with a nutrient solution and cultivated for 10 weeks under greenhouse conditions.

After 10 weeks root exudates were collected. The roots of the plants were washed and submerged in an acetate buffer solution (25 mmol/L, pH=5.5) for 6 h. The obtained exudates were adjusted with the acetate buffer solution to 10 ml/g root fresh weight, passed through millipore filters (0.2  $\mu$ m) and stored at  $-20^\circ\text{C}$ .

FOL disease incidence, i.e. percentage of infected plants, was determined according to the symptoms described in WELLMAN (1939). The degree of mycorrhization was estimated according to the staining method of VIERHEILIG et al. (1998) and the gridline intersect method of GIOVANNETTI and MOSSE (1980).

For the determination of fungal activity and spore germination rates aliquots of 170  $\mu$ l of root exudates (adjusted to a final concentration of 20 ml/g root fresh weight) were mixed with 30  $\mu$ l of a FOL-suspension ( $1 \times 10^7$  microconidia/ml) in 96-well-culture plates and incubated at  $24^\circ\text{C}$  in the dark while shaking for 6 h 10 min. After incubation 10  $\mu$ l of resazurin (fluorescent dye) were added and incubated for further 50 mins. Afterwards fluorescence (Ex: 540 nm, Em: 590 nm) was determined using a fluorescence reader (Fluostar, Omega). Furthermore, spore germination rates were determined.

To analyse chemical compounds in root exudates GC-MS analyses were performed with an AutoSystem XL gas chromatograph. Compounds were detected in a coupled mass spectrometer equipped with a mass selective flame ionization

detector. Mass spectra were identified by comparison with spectra from commercial databases.

## Results and discussion

In the AMF treatment an increased root fresh weight compared to other treatments could be observed. The AMF+FOL treatment did not differ from the other treatments. In general was the AMF colonization rate (*Glomus mosseae*) of the tomato plants cv. "Tiny Tim" quite low. Furthermore, in the AMF+FOL treatment no reduction of disease incidence could be observed. However, in other intercropping systems with different AMF species and isolates the situation can be different (AKKÖPRÜ and DEMIR 2005).

Looking on the fungal activity our assays show no differences between the different treatments. The chemical analyses revealed dynamics in the root exudate composition. Differences in fructose, glucose, malate and citrate levels could be detected according to the different treatments. These preliminary results can only give an idea about these dynamics. Further tests need to be done to get more insights.

## Acknowledgements

This project is funded by the Austrian Science Fund.

## References

- AKKÖPRÜ, A. and S. DEMIR, 2005: Biological control of Fusarium wilt in tomato caused by *Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici* by AMF *Glomus intraradices* and some rhizobacteria. *Phytopathology* 153, 544-550.
- BERTIN, C., X. YANG and L.A. WESTEN, 2003: The role of root exudates and allelochemicals in the rhizosphere. *Plant and Soil* 256, 67-83.
- GIOVANNETTI, M. and B. MOSSE, 1980: An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots. *New Phytol.* 84, 489-500.
- NELSON, E.B., 1990: Exudate molecules initiating fungal responses to seeds and roots. *Plant and Soil* 129, 61-73.
- VIERHEILIG, H., A.P. COUGHLAN, U. Wyss and Y. PICHÉ, 1998: Ink and vinegar, a simple staining technique for arbuscular-mycorrhizal fungi. *Appl. Environ. Microbiol.* 64, 5004-5007.
- WELLMAN, F.L., 1939: A technique for studying host resistance and pathogenicity in tomato Fusarium wilt. *Phytopathology*. 29, 945-956.



# Application of DNA sequence based taxon identification to the study of root associated fungal communities

Alexander Urban<sup>1\*</sup>

## Zusammenfassung

Die Anwendung molekularer Methoden enthüllte die unerwartete Diversität Wurzel-assoziiierter Pilze. Besonders die symbiotischen Pilzpartner fordern die Pilztaxonomie heraus, und nur durch Kombination molekularer und morphologischer Analysen ist es möglich, die bestehenden Klassifikationen zu verbessern. Arten sind elementare Einheiten der Biologie, und eine gut abgesicherte Taxonomie ist unerlässliche Grundlage für Biodiversitätsstudien und experimentelle Forschung. Diese scheinbar einfache Aufgabe wird durch die vergleichsweise geringe morphologische Differenzierung bei hoher phylogenetischer Diversität erschwert. Die nächste große Herausforderung ist die Schaffung von Datenbanken funktioneller Gene wurzelassoziiierter Pilze, als Basis für metagenomische Studien der Wurzel-Pilz-Boden Interaktionen.

## Summary

Molecular tools revealed unexpected diversity among different guilds of root associated fungi.

Particularly the symbiotic root associates constitute a major challenge for fungal taxonomy, a combined molecular and morphological approach is needed to improve the classification

Species are the basic units of biology, and a reliable, stable taxonomy of root associated fungi is needed as a basis of biodiversity studies and experimental research. This seemingly simple task is complicated by the fact that morphological differentiation is low compared to the deep phylogenetic diversity recently discovered in various groups of root associated fungi. The next major challenge is the establishment of databases of functional genes of root associated fungi, to explore the metagenomics of plant-fungus-soil interactions.

*Keywords:* Sebaciniales, biodiversity, mycorrhiza, evolution, symbiosis

## Introduction

Here, the term root associated fungi is used to denote a variety of guilds or functional groups of fungi, which overlap only in part with systematic respectively phylogenetic groups. **Mycorrhizal** fungi form intimate mutualistic interactions with plant roots, the mycorrhizal symbiosis is based on an exchange of mineral nutrients and carbohydrates between fungi and plants. Different types of mycorrhizal associations are distinguished. **Arbuscular Mycorrhiza (AM)**, which are exclusively formed by members of the Glomeromycota, are most universally distributed in the plant kingdom, and they are likely to have facilitated the colonisation of terrestrial habitats by plants from the beginning of land plant evolution. **Ectomycorrhiza (ECM)** is more specific to a selection of plant families, which however, include many of the dominant tree species of boreal, temperate, mediterranean and certain (sub-)tropical areas, e.g.. Pinaceae, Betulaceae, Fagaceae, Salicaceae, Dipterocarpaceae, eucalypts, certain Rosaceae and Fabaceae, and others. **Ericoid mycorrhiza** is specific to ericaceous host plants, typically occurring in strongly Nitrogen limited soils, e.g. in heaths and bogs (SMITH and READ 2008). Mycorrhizal samples are often co-colonized by **mycorrhiza co-associated fungi** (URBAN et al. 2008). Ectomycorrhiza co-associated fungi

include a diverse assemblage of ascomycetes with helotialean, hypocrealean and chaetothyrialean affinities, some of the former appear to be closely related to or identical with ericoid mycorrhizal fungi, and are also known as **Dark Septate Endophytes (DSE)**. **Fungal root endophytes** are rather negatively defined, as are endophytes in general. They are neither regarded as mycorrhizal or pathogens and they do not cause recognizable symptoms in their host plants. They comprise a diverse and still incompletely known assemblage of fungi, some of them may have mutualistic properties, e.g. by conferring resistance against plant pathogens, some of them may simply be latent, asymptomatic states of plant decomposers. The **rhizosphere**, a microhabitat defined by the activity of fine roots, is characterised by specific properties different from the bulk soil. In the depletion zone, the concentration of less diffusible mineral nutrients, particularly phosphates, is low, and the concentration of low molecular weight organic plant exsudates is high. These conditions create a specific microniche for soil microbia. Filamentous fungi typically explore larger soil volumes, and it is unlikely that species of filamentous fungi are confined to this zone. On the contrary, the mycelium of mycorrhizal fungi is generally thought to extend beyond the depletion zone, providing better access to mineral nutrients. However, if it is true that most of the mineral nutrients absorbed by plant

<sup>1</sup> Universität Wien, Department Systematische Botanik und Evolutionsforschung, Rennweg 14, A-1030 WIEN

\* Ansprechpartner: Dr. Alexander Urban, alexander.urban@univie.ac.at

roots are delivered by mycorrhizal fungi, the concept of the rhizosphere and of the depletion zone needs to be revised. Fuelled by plant derived carbohydrates, actively absorbing and exuding fungal hyphae would create their own depletion zones and microhabitat, and it may be more appropriate to use the term **mycorrhizosphere** (DUPONNOIS et al. 2008).

Roots are the primary target of many soil-born **plant pathogenic fungi**, most serious damage to crops or natural vegetation is often caused by introduced species, such as certain *Phytophthora* spp. Certain primitive plant pathogenic fungi with motile spores are known as vectors of plant viruses, demonstrating that vector properties are not limited to animals (CAMPBELL 1996).

### The molecular revolution: novel fungal lineages, surprising diversity

About 20 years ago, the development of fungal specific PCR primers targeting nuclear ribosomal DNA, later combined with emerging DNA sequencing technology, opened up a whole new research area, the molecular ecology of root-fungus associations. Ever since, much of our knowledge about the identity, diversity and function of root associated fungi had to be revised.

Studies of root associated fungi continue to reveal surprising diversity, both in terms of species richness and in terms of deeply branching phylogenetic lineages. Despite significant progress in the representativity of published fungal sequence data, some of the fungal lineages discovered during early diversity studies (e.g. VANDENKOORNHUYSE et al. 2002) are still unidentified. It appears that our present knowledge about the biology of root associated fungi is based on a rather narrow selection of certain plant pathogens and of a few model species of mycorrhizal fungi. FITTER (2005) concludes that 'soils contain more uncharacterized biodiversity than any of the rest of the terrestrial biosphere and it is partly that diversity that renders their behaviour (in global change) so difficult to predict'.

### A case study: diversity of Sebaciales

The Sebaciales are an inconspicuous group of 'primitive' basidiomycetes, which had received little attention, before it was discovered with molecular tools that they are involved in an apparently unlimited multitude of root associations (SELOSSE et al. 2002, 2007; URBAN et al. 2003, WEISS et al. 2004, WEISS et al. 2011). Research was further stimulated by the availability of pure cultures of *Piriformospora indica*, a member of the Sebaciales.

In the past years, the ubiquity of sebacianean root associates was recognized, but the species diversity is still far from being disentangled. According to our current knowledge, the Sebaciales are deeply split into at least two phylogenetic groups, one comprising the ECM species including certain orchid root colonizers, and another more heterogeneous group involved in a multitude of plant root associations (WEISS et al. 2004, WEISS et al. 2011).

Much of sebacianean diversity seems to be cryptic, with few morphospecies comprising several potential biological species. Currently, most ribotypes (genetically distinct

biological units as defined by ribosomal DNA sequences) are known only from DNA directly amplified from roots or rhizoids of a wide diversity of plant species, including typical ECM, ERM and AM host plants, as well as orchids and liverworts. The teleomorphs (sexually reproductive structures) of these fungi are known for a few ribotypes only. A phylogenetic tree based on a BLAST generated selection of the 100 sequences most similar to a partial nuclear ribosomal large subunit DNA sequence of *Sebacina allantospora* illustrates the dominance of DNA sequence information directly generated from plant roots, and the lack of knowledge about the fungal species (*Figure 1*). Currently field collected basidiomata of the ECM forming subgroup are analysed to fill that gap and to prepare a revision of that group. However, at present it is not certain if the limited number of available morphological characters will suffice to recognize all biological species, since phylogenetic diversity exceeds by far morphological diversity. Probably, the major driver in the evolution of Sebaciales was the recognition of the diverse host species, and apparently there was only limited advantage of morphological differentiation and complexity.

A very similar situation was found in the Glomeromycota, the mycobionts of AM. This group was studied intensively, since its significance for plant growth and ecosystem services has been recognised for long. The biology of these obligately biotrophic fungi is peculiar, with coenocytic hyphae harbouring populations of genetically diverse nuclei. No sexual state is known, rendering the application of conventional species concepts questionable. Species recognition is limited by the paucity of available micromorphological characters, about 150 to 200 species are currently recognized, but this number is probably much too low to represent the genetic diversity adequately (FITTER 2005, FITTER et al. 2011). Unresolved taxonomy resulted in confusion regarding experimental model organisms. '*Glomus intraradices* DAOM197198', a model fungus in arbuscular mycorrhiza research, is not conspecific with the type culture and should be named *G. irregulare* (STOCKINGER et al. 2009).

In the Sebaciales and beyond, it appears that a significant proportion of fungal diversity is root associated. Consequently, environmental sequences, of which root associated sequences form a major part, are a complementary and increasingly important source of information about fungal biodiversity.

### From biodiversity to function – the evolving molecular toolbox

There is little disagreement that mycorrhizal fungi are essential for plant productivity, element cycles, ecosystem resilience and a variety of ecosystem services. On the other hand, it is a difficult task to directly link root fungal community composition to emergent ecosystem properties, with other words, to synthesize population and community ecology and ecosystem ecology. Conceptually, the integration of different levels of organisation is at the core of ecological theory. In practice, the level of integration in ecological research and theory is limited by the potential of the methods of investigation, and by traditional borders between different disciplines of ecology (FITTER 2005).

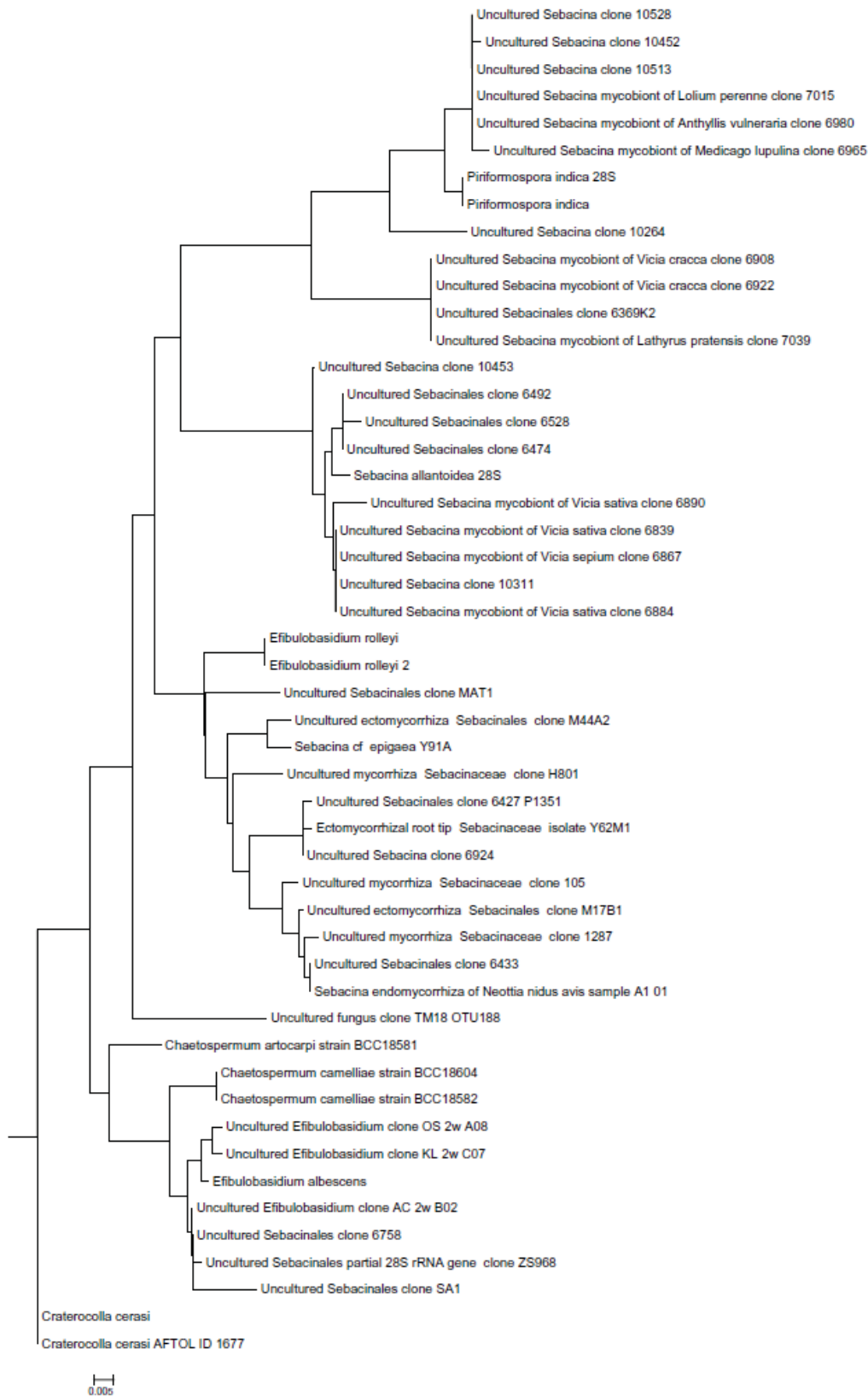


Figure 1: Fast Minimum Evolution tree generated by the NCBI BLAST server based on BLASTN 2.2.25+ (<http://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi>) results for a partial DNA sequence coding for the large subunit nuclear ribosomal RNA of *Sebacina allantoides* (Accession number AF291367.1). Default parameters, sequence subrange basepairs 50-500, maximum target sequences = 100. Sample descriptors were automatically truncated. *Craterocolla cerasi* was chosen as root by the author.

Metagenomics, metatranscriptomics and other metadisciplines promise to facilitate a unified analysis of diversity and function. The direct sequence analysis of expressed genes theoretically allows assessing both function and phylogenetic affinity simultaneously. In reality, the application of this approach is still limited by the resolution of available reference data, particularly taxonomic resolution. In an attempt to overcome this limitation for one ecologically highly relevant gene, GORFER et al. (2011) established a database for fungal nitrate reductase genes, and demonstrated the applicability of the data for the identification of environmental cDNA samples. The study further suggested the multiple occurrence of gene transfers of nitrate reductase encoding genes in the fungi.

With the increasing availability of bacterial and fungal genome information it will be possible to extend the metagenomic approach to a variety of fungal genes, and to assess the ecological roles of different groups of root and soil microbiota more precisely.

## Applications

Up to now, the taxonomic resolution of most soil ecological studies is low. For instance, the ratio fungal biomass / bacterial biomass is regarded as an indicator of sustainability (de VRIES et al. 2006). The evolving toolbox promises to achieve a new synthesis of biodiversity research and functional ecology, and to solve fundamental theoretical questions: e.g. linking aboveground – belowground biodiversity, connecting microbial community ecology and ecosystem resilience, nutrient capture and storage efficiency, microbial community structure and composition and invasibility of plant communities, microbial biodiversity in ‘extreme’ environments, etc.

Are there practical applications? Purposeful management of diverse microbial communities is a relatively recent field. Mycorrhizal inoculum and gut microbes for man and farm animals are pioneer applications, with growing markets. The cultivation of mycorrhizal fungi as a crop is currently applied to narrow selection of high value species only, particularly truffles. In the past, his application has been limited by difficulties in assessing fungal identity and growth in the soil. New analytic tools are hence most significant for the development of this field. Other promising applications are microbiological soil pathogen control, the reduction of fertilizer input, or, more generally, the assessment of the effects of soil management practices on microbial communities.

## Conclusions

Root associated fungi are a major frontier of biodiversity research. Very basic questions are still poorly resolved, from alpha taxonomy (the naming and classification of organisms) to the quantification of biomass of fungal species and to the linking of species to processes. Deeper knowledge of

the diversity, biology and ecology of root associated fungi is urgently needed to understand the interactions of their communities with ecosystem processes.

## References

- CAMPBELL, R.N., 1996: Fungal transmission of plant viruses. *Annu. Rev. Phytopathol.* 34:87-108.
- DUPONNOIS, R., A. GALIANA and Y. PRIN, 2008: The Mycorrhizosphere Effect: A Multitrophic Interaction Complex Improves Mycorrhizal Symbiosis and Plant Growth. In: Z.A. Siddiqui, M.S. Akhtar & K. Futai, eds. *Mycorrhizae: Sustainable Agriculture and Forestry* Dordrecht: Springer Netherlands, p. 227-240.
- FITTER, A.H., 2005: Darkness visible: reflections on underground ecology. *Journal of Ecology* 93:231-243.
- FITTER, A.H., T. HELGASON and A. HODGE, 2011: Nutritional exchanges in the arbuscular mycorrhizal symbiosis: Implications for sustainable agriculture. *Fungal Biology Reviews* 25:68-72.
- GORFER, M., M. BLUMHOFF, S. KLAUBAU, A. URBAN, E. INSELSBACHER, D. BANDIAN, B. MITTER, A. SESSITSCH, W. WANKE and J. STRAUSS, 2011: Community profiling and gene expression of fungal assimilatory nitrate reductases in agricultural soil. *ISME J.*
- JOERGENSEN, R.G. and F. WICHERN, 2008: Quantitative assessment of the fungal contribution to microbial tissue in soil. *Soil Biology and Biochemistry* 40:2977-2991.
- SELOSSE, M., R. BAUER and B. MOYERSON, 2002: Basal hymenomycetes belonging to the Sebacinaceae are ectomycorrhizal on temperate deciduous trees. *New Phytologist* 155:183-195.
- SELOSSE, M., S. SETARO, F. GLATARD, F. RICHARD, C. URCELAY and M. WEISS, 2007: Sebacinales are common mycorrhizal associates of Ericaceae. *New Phytologist* 174:864-878.
- SMITH, S.E. and D.J. READ, 2008: *Mycorrhizal symbiosis*. Academic Press.
- STOCKINGER, H., C. WALKER and A. SCHÜSSLER, 2009: “Glomus intraradices DAOM197198”, a model fungus in arbuscular mycorrhiza research, is not Glomus intraradices. *New Phytologist* 183:1176-1187.
- URBAN, A., M. PUSCHENREITER, J. STRAUSS and M. GORFER, 2008: Diversity and structure of ectomycorrhizal and co-associated fungal communities in a serpentine soil. *Mycorrhiza* 18:339-354.
- URBAN, A., M. WEISS and R. BAUER, 2003: Ectomycorrhizas involving sebacinoid mycobionts. *Mycol. Res* 107:3-14.
- VANDENKOORNHUYSE, P, S.L. BALDAUF, C. LEYVAL, J. STRACZEK and J.P.W. YOUNG, 2002: Extensive Fungal Diversity in Plant Roots. *Science* 295:2051.
- DE VRIES, F.T., E. HOFFLAND, N. van EEKEREN, L. BRUSSAARD and J. BLOEM, 2006: Fungal/bacterial ratios in grasslands with contrasting nitrogen management. *Soil Biology and Biochemistry* 38:2092-2103.
- WEISS, M., M.A. SELOSSE, K.H. REXER, A. URBAN and F. OBERWINKLER, 2004: Sebacinales: a hitherto overlooked cosm of heterobasidiomycetes with a broad mycorrhizal potential. *Mycological Research* 108:1003-1010.
- WEISS, M., Z. SÝKOROVÁ, S. GARNICA, K. RIESS, F. MARTOS, C. KRAUSE, F. OBERWINKLER, R. BAUER and D. REDECKER, 2011: Sebacinales Everywhere: Previously Overlooked Ubiquitous Fungal Endophytes. *PLoS ONE* 6:e16793.

# Modelling the effect of arbuscular mycorrhizal fungi on plant phosphate uptake

Andrea Schnepf<sup>1\*</sup> und Daniel Leitner<sup>2</sup>

## Introduction

Phosphate (P) is an essential nutrient for plants which is sparingly soluble in most soils. Arbuscular mycorrhizal fungi may enhance plant P uptake by increasing the soil volume accessible for plants. Therefore, this ubiquitous symbiosis between many crop plants and soil fungi is currently viewed as a promising alternative to the excessive use of mineral fertilisers in agricultural management (FROSSARD et al. 2000). For applying this form of plant P nutrition in agricultural systems, mathematical modelling can help to estimate how much of P fertiliser could be substituted through mycorrhizal-enhanced P uptake. In this paper, we demonstrate how to quantify the growth of external fungal hyphae in soil, soil P depletion and P influx into a plant root colonised by arbuscular mycorrhizal fungi. We focus on a single mycorrhizal root and therefore use cylindrical coordinates as described in SCHNEPF et al. (2011).

## Modelling the growth of arbuscular mycorrhizal hyphae

Three arbuscular mycorrhizal fungi with different growth strategies are considered as described by SCHNEPF et al. (2008a): firstly, the linear branching strategy, secondly the nonlinear branching strategy, and thirdly the anastomosis strategy. The first two strategies assume that branching is linearly or nonlinearly proportional to the hyphal tip density in soil while the third strategy allows for the fusion of

external hyphae. All of these strategies are included in the model described in the following paragraph. *Figure 1* shows a 2-dimensional visualisation of the colony shapes resulting from the different fungal growth strategies.

The hyphal length density,  $\rho$ , is calculated with a continuous and spatially explicit hyphal population growth model (SCHNEPF et al. 2008a). It calculates hyphal tip and length densities based on elongation of the region just behind the hyphal tip, branching due to tip splitting, anastomosis and tip and hyphal death. Calibration of this model to experimental data (JAKOBSEN et al. 1992) gave evidence that all three growth strategies mentioned above occurred. The parameters we found in this calibration study (SCHNEPF et al. 2008a) are used in the following simulations. Model equations for the hyphal tip density  $n$  and the hyphal length density  $\rho$  are given by

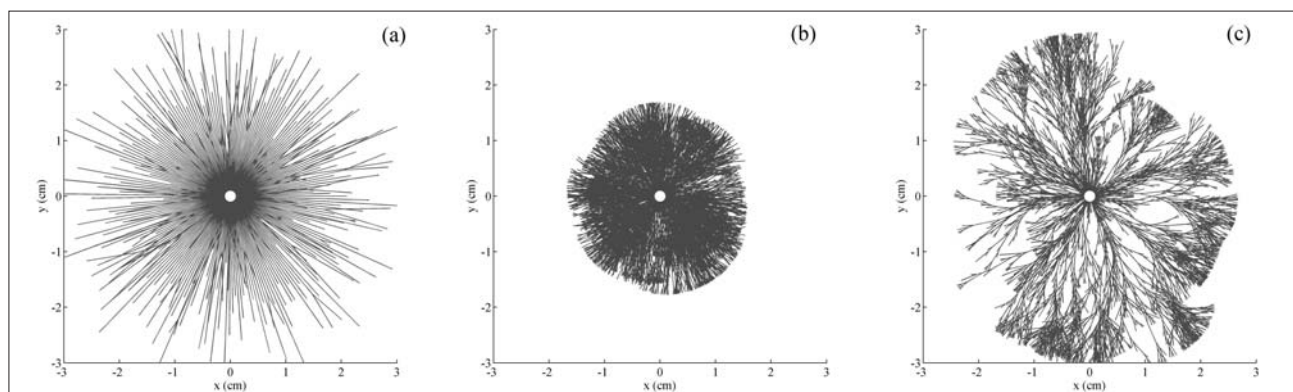
$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r n v) + f \quad \text{Equation 1}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = n v - d \rho \quad \text{Equation 2}$$

$$f = \underbrace{b_n n \left(1 - \frac{n}{n_{\max}}\right)}_{\text{branching}} - \underbrace{a_1 n^2 - a_2 n \rho}_{\text{anastomosis}} - \underbrace{d_n n}_{\text{tipdeath}} \quad \text{Equation 3}$$

$$n = 0, \quad \rho = 0 \quad \text{at } t = 0 \quad \text{Equation 4}$$

$$n = f_b(t) \quad \text{at } r = r_0 \quad \text{Equation 5}$$



**Figure 1: Visualisation of (a) linear branching, (b) nonlinear branching and (c) anastomosis growth strategies of arbuscular mycorrhizal fungi after 14 days (after SCHNEPF et al. 2011). Simulations are based on a discrete L-System model (LEITNER et al. 2010) which approximates the continuous model given by Eqs. (1)-(5).**

<sup>1</sup> Institute of Soil Science, Department of Forest and Soil Sciences, BOKU - University of Natural Resources and Life Sciences, Peter Jordan Straße 82, A-1190 VIENNA

<sup>2</sup> Faculty of Mathematics, University of Vienna

\* Ansprechpartner: Andrea Schnepf, andrea.schnepf@boku.ac.at

( $n$  hyphal tip density,  $\rho$  hyphal length density,  $d$  hyphal death rate,  $b_n$  branching rate,  $n_{max}$  maximal tip density,  $a_1$  and  $a_2$  tip-tip and tip-side anastomosis rates,  $d_n$  tip death rate,  $f_b$  tip density at the root interface). This hyperbolic system of equations given by Eqs. (1)-(5) was solved numerically using a Lax-Wendroff-scheme (MORTON and MAYERS 1994).

## Modelling soil P depletion and P influx into the plant root

We model P transport in soil based on the diffusion equation as described in SCHNEPF and ROOSE (2006) and SCHNEPF et al. (2008b). Furthermore, we assume that P is taken up by both root and fungal hyphae according to Michaelis Menten kinetics. The classical single root model (BARBER 1995, TINKER and NYE 2000) is extended by a sink term for P uptake from soil due to arbuscular mycorrhizal hyphae (see last term in Eq. (6)). The model is given by the following equations,

$$(\theta + b) \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( D \theta f r \frac{\partial c}{\partial r} \right) - 2r_h \pi \rho(r, t) \frac{F_m c}{K_m + c}, \quad \text{Equation 6}$$

$$c = c_0, \quad \text{at } t = 0, \quad \text{Equation 7}$$

$$D \theta f \frac{\partial c}{\partial r} = \frac{F_m c}{K_m + c}, \quad \text{at } r = r_0, \quad \text{Equation 8}$$

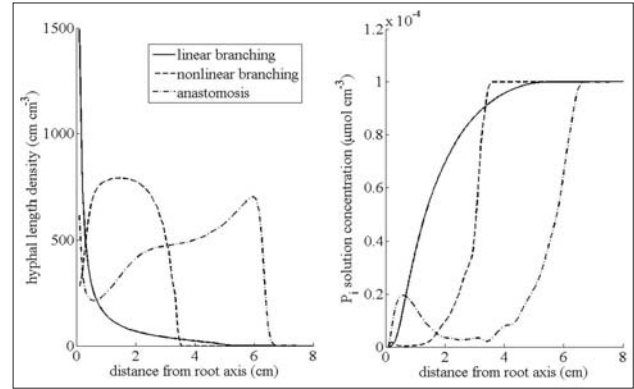
$$D \theta f \frac{\partial c}{\partial r} = 0, \quad \text{at } r = r_1, \quad \text{Equation 9}$$

( $c$  concentration of P in soil solution,  $t$  time,  $r$  radial distance from root axis,  $\theta$  volumetric water content,  $b$  buffer power,  $f$  impedance factor,  $D$  diffusion coefficient in water,  $c_0$  initial P concentration in soil solution,  $r_h$  hyphal radius,  $r_0$  root radius,  $r_1$  mean half distance between roots,  $\rho$  hyphal length density). Eqs. (6)-(9) were solved numerically with the finite element method using Comsol Multiphysics.

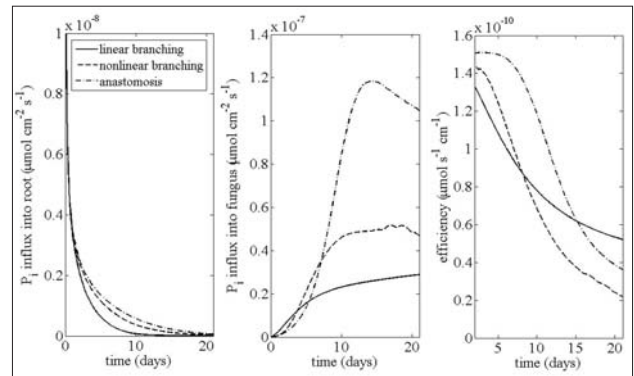
## Results

The hyphal length densities and P depletion at different distances from the root after 21 days are shown in *Figure 2*. The linear branching strategy produces the highest root length density at the root surface, then the hyphal length density declines exponentially with increasing distance from the root surface. Thus, P is strongly depleted within a radius of 1.5 cm around the root. The fungus with the nonlinear branching strategy has a peak in hyphal length density at about 1.7 cm distance from the root axis and the radius of P depletion is 3 cm. The anastomosis strategy produces a peak in hyphal length density at the front of the colony and results in the largest radius of P depletion of 6 cm. In this scenario, the soil is less depleted in the vicinity of the root itself. *Figure 3* shows the resulting influx of P into root (a) and hyphae (b). In all cases, P influx into root decreases quickly with time and influx into fungus becomes dominant. The most effective strategy with respect to P uptake per unit hyphal length is the anastomosis strategy (see *Figure 3c*).

The results in *Figures 2* and *3* are based on the common assumption that external hyphae are able to take up P along their entire length. However, it has been shown by SCHNEPF et al. (2008b) that this is bound to overestimate hyphal P uptake from soil. In a theoretical case study, the



*Figure 2: Hyphal length densities and P solution concentration around the root corresponding to the linear branching, nonlinear branching and anastomosis growth strategies of arbuscular mycorrhizal fungi assuming that root and fungi have the same P uptake parameters (after SCHNEPF et al., 2011).*



*Figure 3: P influx per unit root surface area due to (a) root and (b) hyphae corresponding to the linear branching, nonlinear branching and anastomosis growth strategies of arbuscular mycorrhizal fungi. (c) P influx per unit hyphal length (after SCHNEPF et al. 2011).*

compared the differences with regard to the sites of P uptake along the individual hyphae and simulated, in addition to the full length scenario, two other scenarios that were based on the assumption that only the metabolic active part of the mycelium is taking up P or that P uptake occurs only at the hyphal tips. These simulations suggest that P uptake occurs at parts of the mycelium which are metabolically active. *Figure 4* shows the effectiveness of the different P uptake scenarios under the three branching patterns considered. The anastomosis pattern is also the most effective in the half length uptake scenario.

## Discussion and Outlook

In view of future shortcomings in mineral phosphate supply (LAMBERS et al. 2006), applying arbuscular mycorrhizal symbioses can help to reduce the use of mineral fertilizers in agricultural management. Simulation results show that P influx into root due to external mycorrhizal fungi is up to an order of magnitude larger than P influx due to root uptake. This is particularly pronounced when the fungus follows the linear branching strategy where the fungal hyphae compete for P inside the root depletion zone. The

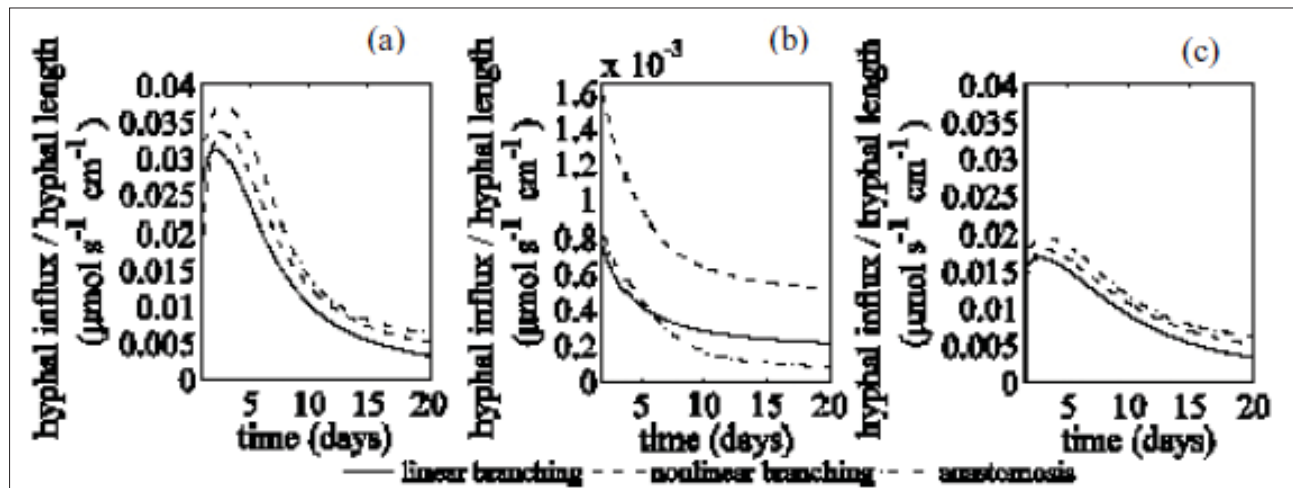


Figure 4: P uptake rate of the whole mycelium versus total hyphal length for three fungi with different growth patterns: (a) full length uptake scenario, (b) tip uptake scenario, (c) half length uptake scenario (after SCHNEPF et al., 2008b).

anastomosis strategy on the other hand makes more use of the soil volume near the front of the colony. Thus the competition between root and fungus inside the root depletion zone is less and the root contribution to overall uptake is higher. However, fungal P uptake dominates overall P uptake in all branching strategies. This supports the idea that roots can completely rely on the fungus for their P nutrition (SMITH et al. 2003).

A spatially explicit model for the spread of mycorrhizal mycelium and active parts is still missing. Assuming Michaelis-Menten kinetics for uptake may also oversimplify the actual uptake process. The molecular and biochemical characterisation of the corresponding P transport systems is currently studied (BUCHER 2007, RAGHOTHAMA and KARTHIKEYAN 2005). Thus, more experimental data for model parameterisation and validation are required.

## References

- BARBER, S.A., 1995: Soil Nutrient Bioavailability: a mechanistic approach. JohnWiley & sons, Inc. New York.
- BUCHER, M., 2007: Functional biology of plant phosphate uptake at root and mycorrhiza interfaces. *New Phytol.* 173, 11-26.
- FROSSARD, E., L.M. CONDRON, A. OBERSON, S. SINAJ and J.C. FARDEAU, 2000: Processes governing phosphorus availability in temperate soils. *Journal of Environmental Quality* 29, 15-23.
- JAKOBSEN, I., L.K. ABBOTT and A.D. ROBSON, 1992: External hyphae of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Trifolium subterraneum* L. 1. Spread of hyphae and phosphorus inflow into roots. *New Phytologist* 120, 371-380.
- LAMBERS, H., M.W. SHANE, M.D. CRAMER, S.J. PEARSE and E.J. VENEKLAAS, 2006: Root Structure and Functioning for Efficient Acquisition of Phosphorus: Matching Morphological and Physiological Traits. *Ann Bot* 98, 693-713.
- LEITNER, D., S. KLEPSCH, G. BODNER and A. SCHNEPF, 2010: A dynamic root system growth model based on L-Systems: Tropisms and coupling to nutrient uptake from soil. *Plant and Soil* 332: 177-192.
- MORTON, K.W. and D.F. MAYERS, 1994: Numerical Solution of Partial Differential Equations. Cambridge University Press.
- RAGHOTHAMA, K.G. and A.S. KARTHIKEYAN, 2005: Phosphate acquisition. *Plant Soil* 274, 37-49.
- SMITH, S.E., F.A. SMITH and I. JAKOBSEN, 2003: Mycorrhizal Fungi Can Dominate Phosphate Supply to Plants Irrespective of Growth Responses. *Plant Physiology* 130, 16-20.
- SCHNEPF, A. and T. ROOSE, 2006: Modelling the contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to plant phosphate uptake. *New Phytologist* 171, 669-682.
- SCHNEPF, A., T. ROOSE and P. SCHWEIGER, 2008a: Growth model for arbuscular mycorrhizal fungi. *Journal of the Royal Society Interface* 5, 773-784.
- SCHNEPF, A., T. ROOSE and P. SCHWEIGER, 2008b: Impact of growth and uptake patterns of arbuscular mycorrhizal fungi on plant phosphorus uptake - A modelling study. *Plant and Soil* 312, 85-99.
- SCHNEPF, A., D. LEITNER, S. KLEPSCH, S. PELLERIN and A. MOLLIER, 2011: Modelling P dynamics in the soil-plant system. In: E. Bünemann, A. Oberson and E. Frossard (Eds.), *Phosphorus in Action - Biological Processes in Soil Phosphorus Cycling*. Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg, 113-133.
- TINKER, P.B. and P.H. NYE, 2000: *Solute Movement in the Rhizosphere*. Oxford University Press, New York, Oxford.

# Drought and root system size of barley and wheat

Tomas Streda<sup>1\*</sup>, V. Dostál<sup>1</sup>, V. Horáková<sup>2</sup> and Oldrich Chloupek<sup>1</sup>

## Zusammenfassung

Kornertrag von verschiedenen Sommergerste- und Winterweizen-Sorten in umfangreichen Feldversuchen wurde mit ihrer Wurzelsystemgröße (WSG) von zwei Standorten im trockenen Jahr 2007 verglichen. Die Ertragsunterschiede wurden mit publizierten Angaben für spezifischen Wasserverbrauch an Einheit von Kornertrag konfrontiert. So wurde gefunden, dass ein Drittel Gerstensorten mit überdurchschnittlicher WSG im Vergleich mit dem Drittel mit unterdurchschnittlicher WSG nutzte um 14% mehr Bodenwasser vom Totalverbrauch in Gerste und um 2% mehr in Weizen. Aber wenn Weizen wurde spät gesät, es wurde schon 5%.

*Schlagwörter:* Trockenheit, Gerste, Weizen, Wurzelsystemgröße, Kornertrag, Stärke, Wasserverbrauch

## Summary

Grain yield of different varieties of spring barley and of winter wheat in extensive field trials was compared with their root system size (RSS) on two locations in dry year 2007. The differences in yield were related to the published data about water consumption for a unit of grain yield. It was found that one third of barley varieties with above-averaged RSS as compared to the third one with under-averaged RSS used by 14% more of soil water of the total demand for barley and by 2% for wheat. However, in stress due to late sowing it was 5% in wheat.

*Keywords:* Drought, barley, wheat, root system size, grain yield, starch, water consumption

## Material and methods

We evaluated about 20 varieties of spring barley in 2005-2008 and similar number of winter wheat in 2007-2010 for their root system size (RSS) on two locations in three terms (elongation, heading and grain filling) and the values compared with yield and quality results in official variety trials on about 20 locations. The trials were evaluated on low and high input level.

## Results

Significant relationship between RSS and yield was found only in extremely dry year 2007 in both crops (for barley  $r^2 = 0.230^*$  and  $0.221^*$ , for wheat  $r^2 = 0.285^*$  and  $0.284^*$ , in both input levels respectively). In other years was the relationship found only in some environments in both crops. In wheat was the relationship however also significantly negative in 2008, the highest-yielding year, at the three stations at the lowest altitude and with the highest temperature ( $r^2 = -0.459^*$ ). In both crops was not significant yield difference between groups of varieties with average and above-average RSS, but significant between group with under-averaged and averaged RSS.

## Discussion

In both crops was in the dry year 2007 significantly higher content or yield of starch in grain (with content in barley  $r^2 = 0.403^{**}$ , with yield in barley  $r^2 = 0.694^{**}$ , in wheat  $r^2 = 0.248^*$ ) in varieties with greater RSS. A reduction in barley grain weight has been found to be greater under heat

stress (average 13%) than under drought (6%). Under these conditions, the amount and quality of starch was reduced, especially when stresses occurred during grain filling (SAVIN and NICOLAS 1999). In our experiments decreased the yield in 2007 in comparison to all four experimental years by 14% (CHLOUPEK et al. 2010). A single 25-mm irrigation in the early stages of grain filling increased the malt extract in barley (PAYNTER and YOUNG 2004). This effect of irrigation on starch concentration and yield was similar to the effect of a greater RSS, as described in 2007.

The quality of harvested barley grain was evaluated from four stations. Two stations are located at lower altitudes (260 and 425 m, respectively) than the other two (450 and 505 m, respectively). They have lower average precipitation (555 and 481 mm vs. 616 and 594 mm, respectively) and higher average annual temperatures (8.9 and 8.0°C vs. 7.4 and 7.5°C). Official evaluation of all 51 varieties and candivars<sup>1</sup> in the experiments (not all were evaluated for RSS) showed lower starch contents in the grain grown at the drier stations (66.9 and 68.4%) than in the grain from wetter ones (71.2 and 69.8%). It can be concluded that drought showed a similar effect as small RSS on the starch content of the barley grain, which was lower (CHLOUPEK et al. 2010).

The crop water requirement (CWP) for winter wheat was about 430 mm. Optimal irrigation amounted to 186, 161 and 99 mm for winter wheat in dry, normal and wet seasons, respectively (SUN et al. 2010). The CWP of irrigated wheat was lower; 1.09 (0.6-1.7) kg m<sup>-3</sup> (ZWART and BASTIANSSEN 2004).

<sup>1</sup> Candivar = candidate for variety or cultivar

<sup>1</sup> Mendel Universität in Brno, Zemedelska 1, CZ-61300 BRNO

<sup>2</sup> National Sortenamnt Brno

\* Ansprechpartner: Tomas Streda, xstreda@mendelu.cz



Our results showed that wheat varieties with a 21% greater RSS had a 420 kg ha<sup>-1</sup> increase in grain yield in 2007 (STŘEDA et al., unpublished yet); based on the data of KIRKEGAARD et al. (2007), this increase corresponds to the use of approximately 7 mm of additional subsoil water (420/59), i.e. about 2% of total demand as published by MARTYNIAK (2008) for Central Europe (7/314). However, comparison of the varieties with the smallest and greatest RSSs (*Ilias* and *Etela*) showed yield difference of 860 kg, i.e., about 15 mm of subsoil water, i.e. 5% (15/314). This difference shows selection perspectives for the better use of subsoil water in dry years. When wheat was sown late in 2007, a similar comparison between the groups with below- and above-average RSSs shows a difference in yield of 950 kg ha<sup>-1</sup>, corresponding to the use of an additional 16 mm of subsoil water in this dry year. The difference corresponds also to 5% (16/314) of total demand as published by MARTYNIAK (2008).

Similarly calculated in wheat according to publication by KIRKEGAARD et al. (2007) who published 59 kg of wheat grain/mm of soil water it would be responsible for about 5 mm of water. Spring barley needs 293 mm of soil water during its vegetation (MARTYNIAK 2008). When we use the data by PELTONEN et al. (2011), the 9.5% of *barley* RSS increment (CHLOUPEK et al. 2010) would be accounted for 40 from 293 mm, i.e. for about 14% of the total demand or, for 40 mm from -145 mm seasonal deficit i.e. for about 27% of it.

The highest values of water requirements of plants were observed in the stages from shooting to heading, during the intensive increase of biomasses. During this period, the plants utilized up to 5 mm of water per day. Seasonal deficits of precipitation during the growing season in central Poland were -145 and -169 mm for barley and wheat, respectively. In the growing season they utilized from 293 to 314 mm of soil water (MARTYNIAK 2008).

CHLOUPEK et al. (2010) compared yield of seven barley varieties with under-averaged RSS with yield of six varieties with averaged RSS of all 20 evaluated varieties in dry year 2007, when the yield of four standard varieties was only 5.62 t/ha, but in other three years averaged to 6.82 t/ha due to drought during vegetation. The varieties with under-averaged RSS yielded 4.87 t/ha but the ones with averaged

RSS 5.19 t/ha. The difference amounted to 320 kg/ha due to greater RSS by 9.5% (1.48 and 1.62 nF, respectively). Spring cereals decreased yields by 45-75 kg/ha due to decreased precipitation by 10 mm (PELTONEN et al. 2011). The difference in the RSS responded therefore for about 40 mm higher precipitation (320 kg/75 kg) in the dry year.

## Conclusion

In dry year 2007 brought varieties with smaller RSS significantly lower yield of both cereals in comparison with varieties with greater RSS. Already during selection should be such lines eliminated. However, also one-sided selection for great RSS should be avoided, since in particular winter wheat (which has greater RSS in comparison with spring barley) varieties with great RSS could bring in moist years lower yields.

This research was supported by projects Nr. MSM6215648905 and NAZV QH 91192.

## References

- CHLOUPEK, O., V. DOSTÁL, T. STŘEDA, V. PSOTA and O. DVOŘÁČKOVÁ, 2010: Drought tolerance of barley varieties in relation to their root system size. *Plant Breeding* 129: 630-636.
- KIRKEGAARD, J.A., J.M. LILLEY, G.N. HOWE and J.M. GRAHAM, 2007: Impact of subsoil water use on wheat yield. *Australian Journal of Agricultural Research* 58, 303-315.
- MARTYNIAK, L., 2008: Response of spring cereals to a deficit of atmospheric precipitation in the particular stages of plant growth and development. *Agricultural Water Management* 95: 171-178.
- PAYNTER, B.H. and K.J. YOUNG, 2004: Grain and malting quality in two-row spring barley are influenced by grain filling moisture. *Australian Journal of Agricultural Research* 55, 539-550.
- PELTONEN-SAINIO, P., L. JAUHAINEN and K. HAKALA, 2011: Crop responses to temperature and precipitation according to long-term multi-location trials at high-latitude conditions. *Journal of Agricultural Science* 149: 49-62.
- SAVIN, R. and M.E. NICOLAS, 1999: Effects of timing of heat stress and drought on growth and quality of barley grains. *Australian Journal of Agricultural Research* 50, 357-364.
- STŘEDA, T., V. DOSTÁL, V. HORÁKOVÁ and O. CHLOUPEK: Effective use of water of wheat varieties with different root system size in rain-fed experiments of Middle Europe. Submitted.

# Wurzeleigenschaften von Zwischenfrüchten und ihre agroökologische Funktion

Gernot Bodner<sup>1\*</sup>, Arno Kastelliz<sup>2</sup>, Peter Liebhard<sup>1</sup>, Willibald Loiskandl<sup>3</sup>,  
Margarita Himmelbauer<sup>3</sup> und Hans-Peter Kaul<sup>1</sup>

## Zusammenfassung

Das Wurzelsystem von Zwischenfrüchten ist für deren agroökologische Leistung entscheidend. Bildanalytisch erhobene Daten zeigten, dass sich die Arten vor allem in ihrer Wurzelichte im Oberboden unterschieden. Die Tiefenverteilung der Wurzeln war stark von den Jahresniederschlägen beeinflusst. Wurzelrückstände unterlagen einer wesentlich langsameren Mineralisierung als die oberirdischen Pflanzenreste. Mit Hilfe eines Simulationsmodell wurden die hydrologischen Auswirkungen unterschiedlicher Wurzelverteilungen geprüft. Bei einer vollständig den Boden bedeckenden Begrünung mit tiefem Wurzelsystem und frühem Saattermin liegt der Wasserentzug in einem Trockenjahr um 63 mm über einer Schwarzbrache. Dagegen ist der Wasserverbrauch bei dem üblichen Saattermin Ende August nur geringfügig höher als bei einer Brache, vor allem für die zumeist oberflächennahe Wurzelkonzentration von Zwischenfrüchten. Eine tiefwurzelnde Begrünung ist dagegen für die Reduktion von Nitrat-Verlagerung ins Grundwasser von großer Bedeutung. Das Wurzelsystem einer Zwischenfrucht ist entscheidend für eine erfolgreiche Begrünung und daher für ein standortangepasstes Management zu berücksichtigen.

*Schlagwörter:* Wurzelverteilung, Zwischenfrucht, Wasserhaushalt, Simulation

## Summary

The root system of cover crops is essential for their agroecological performance. Based on image analysis based root data, we showed that species differed mainly in their surface near rooting density. Root depth distribution was mainly influenced by annual precipitation. Root residues showed a significantly slower mineralization compared to above ground residues. Using a simulation model, the hydrological effects of different root distribution was tested. An early seeded cover crop with high coverage and deep root system extracted 63 mm more water in a dry year compared to fallow. Water use of a cover crop sown at the end of August on the contrary had only slightly higher water use, particularly for root systems concentrated in the upper soil layers as commonly found in cover crops. For efficient nitrate uptake to avoid leaching losses however a deep root system is essential. As root properties determine the success of cover cropping, they should be considered in for a site adapted management.

*Keywords:* root distribution, cover crops, water uptake, simulation model

## Einleitung

Zwischenfruchtbau gehört zu den wichtigsten Agrarumweltmaßnahmen in Europa. Zielsetzungen des Zwischenfruchtbaus sind Verringerung der Nitratauswaschung, Erosionsschutz, Verbesserung der Humusbilanz und Bodenstrukturstabilisierung. Viele Zwischenfruchteffekte hängen ursächlich mit ihrem Wurzelsystem zusammen: Tiefwurzler ermöglichen die Aufnahme von Nitrat aus tieferen Bodenschichten, Wurzeln lockern den Boden und hinterlassen stabile Biomakroporen, durch die das Wasser rasch in den Boden infiltrieren kann, sie bilden eine wesentliche Quelle stabiler Humussubstanzen und sind damit besonders für die Bodenstrukturwirkung einer Begrünung von großer Bedeutung.

Eine systematische Beschreibung von Zwischenfruchtarten und -sorten im Hinblick auf ihre Umweltleistungen ist im Vergleich zur Sortenbeschreibung von Hauptfrüchten nicht

vorhanden. Dies gilt umso mehr für die Wurzeleigenschaften der Begrünungspflanzen, deren Untersuchung unzureichend ist, um sie im Management zu berücksichtigen. Der folgende Beitrag zeigt Ergebnisse zum Wurzelsystem von Zwischenfruchtbegrünungen und ihrer Mineralisierungsdynamik. Über ein Wasser- und Stoffflussmodell werden die wurzelbedingten Funktionen einer Zwischenfrucht im Vergleich zu einer Brache analysiert. Ziel ist es, die Kenntnis der Wurzeleigenschaften zu verbessern und deren Wichtigkeit zum Erzielen der angestrebten Umweltleistungen zu zeigen.

## Material und Methoden

Die Untersuchungen wurden auf Feldversuchen an der Versuchswirtschaft der BOKU in Raasdorf sowie an der Landwirtschaftlichen Fachschule Hollabrunn durchgeführt. Das Versuchsfeld in Hollabrunn ist eine Hanglage, während Raasdorf in der Ebene des Marchfeldes liegt. Beide Standort-

<sup>1</sup> Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Universität für Bodenkultur Wien, Gregor Mendel Straße 33, A-1180 WIEN

<sup>2</sup> Landwirtschaftliche Fachschule Obersiebenbrunn, Feldhofstraße 6, A-2283 OBERSIEBENBRUNN

<sup>3</sup> Institut für Hydraulik und Landeskulturelle Wasserwirtschaft, Universität für Bodenkultur Wien, Muthgasse 18, A-1190 WIEN

\* Ansprechpartner: Dr. Gernot Bodner, gernot.bodner@boku.ac.at

te zählen zum semi-ariden pannonischen Produktionsgebiet Ostösterreichs mit Jahresniederschlagssummen von 520 mm bzw. 500 mm und einer mittleren Temperatur von 9,8 °C bzw. 8,8 °C. Der Bodentyp ist der für die pannonische Bodenprovinz typische Tschernosem aus Löss, wobei der Boden in Raasdorf durch einen höheren Schluffgehalt (65 % vs. 52 %) gekennzeichnet ist, während in Hollabrunn ein im Vergleich relativ hoher Feinsandanteil vorliegt.

Vom Standort Hollabrunn liegen zweijährige Daten für die Zwischenfrüchte Senf, Phacelia, Winterwicke und Grünroggen vor (Versuchsjahre 2004/05 und 2005/06), während in Raasdorf im Jahr 2009/10 Wurzeluntersuchungen an den Varianten Platterbse, Phacelia, Senf, Grünroggen und Öllein gemacht wurden. Das Management entsprach jeweils der ÖPUL-Variante A mit Anbau am 20. August. Die Wurzelprobenahme erfolgte mittels eines Bodenbohrers ( $\varnothing$  7,5 cm) auf eine Tiefe von 60 cm (2009/10) bzw. in der Oberkrume (0-40 cm) Anfang Dezember, zu einem Zeitpunkt, als die

Begrünungen vor Winter ihre weiteste Entwicklung erreicht hatten. Die Bestimmung der Wurzelparameter wurde bildanalytisch mit der Software WinRhizo durchgeführt (HIMMELBAUER et al. 2004). Danach wurde die Trockenmasse der Wurzeln nach 48 Stunden im Trockenschrank bei 65°C bestimmt.

Die Mineralisierung der oberirdischen und Wurzelrückstände am Versuch Raasdorf wurde mit der Litterbag-Methode bestimmt (SILVER und MIYA 2001). Es wurde 2 g trockenes Material pro Litterbag am 30. Dezember in 5 cm Bodentiefe vergraben. Die Maschenweite der Netze betrug 1 mm. Je drei Säckchen wurden an drei Terminen (30.3., 9.4., 4.5.) ausgegraben und gewogen. Bestimmt wurde die Abnahme des Kohlenstoffgewichts (Trockenmasse bei Abzug des Ascheanteils).

Die statistische Auswertung der Daten erfolgte varianzanalytisch mit der Software SAS. Die Bestimmung von Parametern zur Beschreibung der Wurzeltiefenverteilung nach

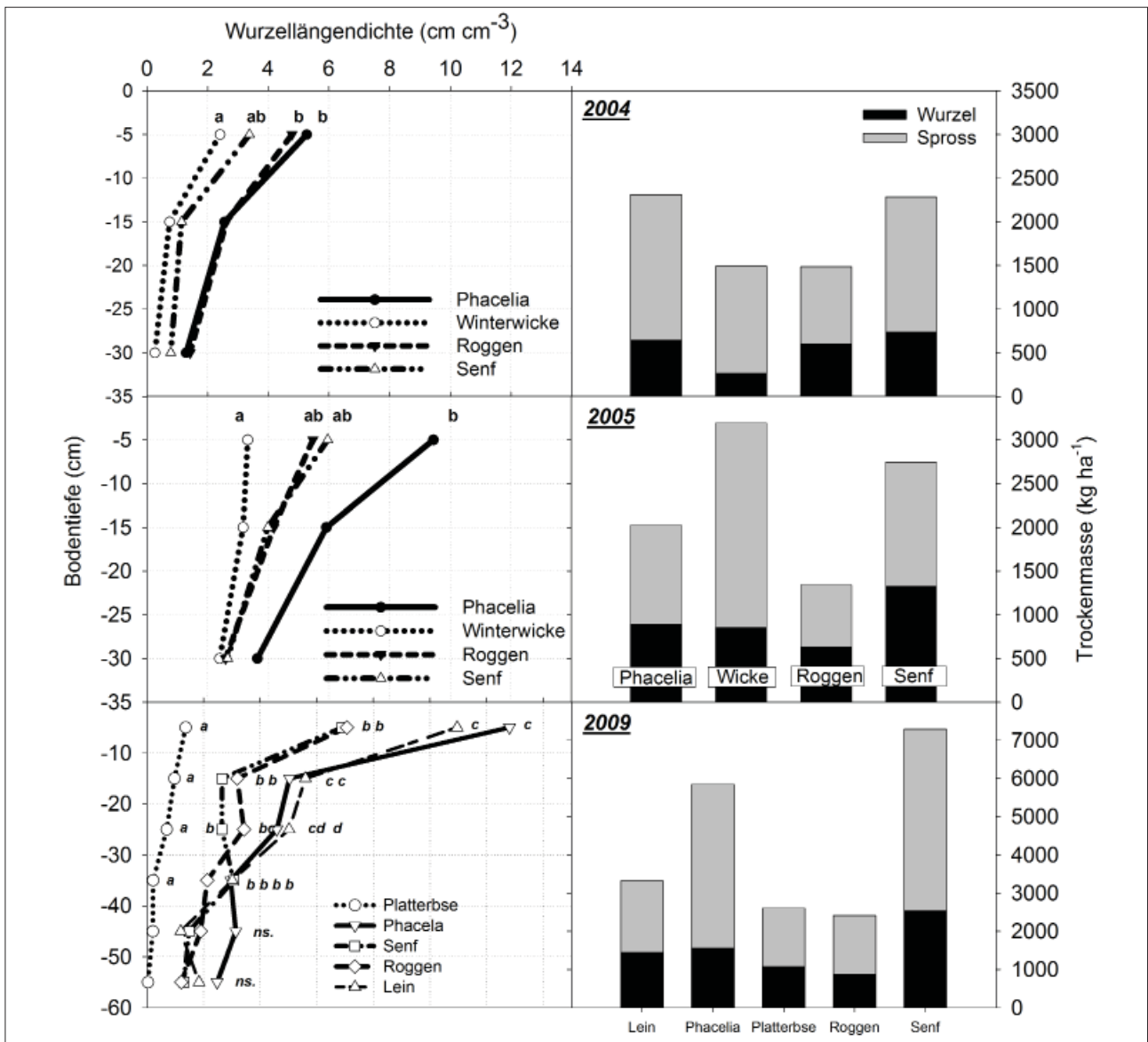


Abbildung 1: Wurzellängendichte, Wurzel- und Sprossbiomasse ausgewählter Zwischenfrüchte

GERWITZ und PAGE (1974) wurde mittels nichtlinearer Regression in SigmaPlot durchgeführt. Die Analyse der hydrologischen Auswirkungen unterschiedlicher Wurzelprofile erfolgte mit dem Simulationsprogramm HYDRUS 1D (SIMUNEK et al. 2008).

## Ergebnisse und Diskussion

### Wurzeldichte und Wurzelbiomasse

Abbildung 1 zeigt den Tiefenverlauf der Wurzellängendichte der Begrünungskulturen sowie deren Gesamttrockenmasse. Phacelia brachte in allen Jahren und an beiden Standorten die dichteste Durchwurzelung. Auch Lein (2009) führte zu sehr hohen Wurzellichten. Die damit zusammenhängende intensive Vernetzung der Bodenpartikel ist besonders für die Gefügestabilisierung von großer Bedeutung. Das Wurzelsystem der Leguminosen mit dickeren Einzelwurzeln lag dagegen bei der Durchwurzelungsdichte im unteren Bereich.

Hinsichtlich der Wurzelbiomasse zeigte Senf unter den Versuchsvarianten deutlichsten sekundären Verdickung der Primärwurzel die höchsten Werte. Das Wurzel/Sproß-Verhältnis lag zwischen 0,21 (Wicke 2004) und 0,94 (Roggen 2005), im Mittel bei 0,59. Dies beweist die Bedeutung des Wurzelsystems als Quelle organischer Substanz bei Zwischenfruchtbegrünungen. Bedenkt man den ständigen Kohlenstoffumsatz im Wurzelsystem (Exsudate, Feinwurzeln), der messtechnisch sehr schwierig zu erfassen ist (PIERRET et al. 2005), so wird die Bedeutung des Wurzelsystems für den Humushaushalt unterstrichen.

### Wurzelmineralisierung

Die Wurzel als Humusquelle ist umso bedeutender als sich oberirdisches Pflanzenmaterial und Wurzelbiomasse in ihrer Abbaudynamik unterscheiden.

Abbildung 2 zeigt die Abnahme des Kohlenstoffes von in den Boden eingebrachten Zwischenfruchtrückständen. Die Wurzelrückstände wiesen eine höhere Stabilität auf als das Blattmaterial. Am 4. Mai waren im Mittel noch 34,3 % des eingesetzten Kohlenstoffes der Wurzelrückstände gegenüber 14,5 % des oberirdischen Materials vorhanden. Die unterschiedliche Qualität des Materials bei stärkerer Verholzung der Wurzelrückstände (besonders bei Lein) führt zu einer langsameren Mineralisierung des Wurzelmaterials, während die oberirdischen Rückstände als Gründünger rasch umgesetzt werden.

### Wurzelverteilung

Neben der Wurzeldichte ist die Tiefenverteilung des Wurzelsystems für die agroökologische Wirkung von Begrünungen wichtig, besonders für Wasser- und N-Aufnahme. Tabelle 1 zeigt die Parameter des exponentiellen Wurzelverteilungsmodells von GERWITZ und PAGE (1974), welches die Messdaten sehr gut darstellen konnte ( $r^2$  zwischen 0,73 und 0,94).

$L_0$  ist ein Indikator für die Dichte der Durchwurzelung, während der Parameter  $a$  die Abnahme mit der Tiefe

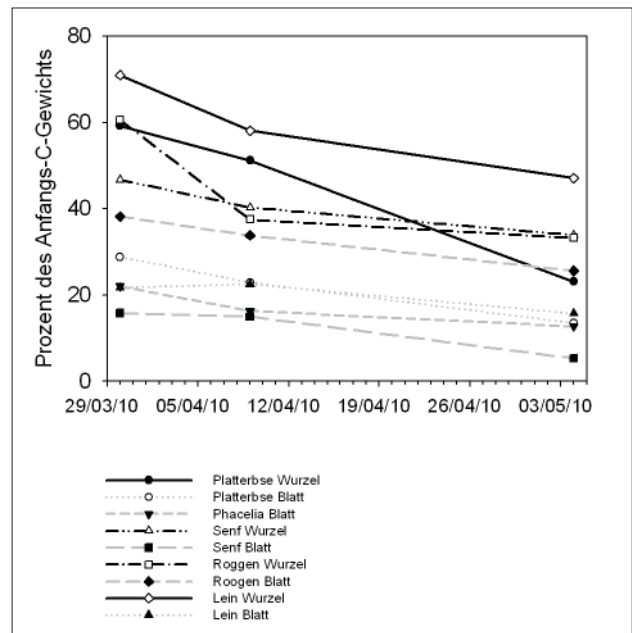


Abbildung 2: Mineralisierungsverlauf oberirdischer und Wurzelrückstände von Zwischenfrüchten

Tabelle 1: Parameter der Wurzelverteilung

		$L_0$ (cm cm <sup>-3</sup> )	$a$ (-)
Phacelia	2004	7,1	0,06
	2005	11,4	0,04
	2009	7,3	0,04
Senf	2004	5,1	0,09
	2005	7,0	0,03
	2009	14,7	0,05
Roggen	2004	6,1	0,05
	2005	6,4	0,03
	2009	7,8	0,04
Winterwicke	2004	4,1	0,11
	2005	3,6	0,01
Platterbse	2009	1,8	0,05
Lein	2009	13,2	0,04
<b>MITTELWERT ARTEN</b>			
Phacelia		8,6	0,05
Senf		8,9	0,06
Roggen		6,8	0,04
Leguminosen		3,7	0,05
CV		<b>39 %</b>	<b>16 %</b>
<b>MITTELWERT JAHRE</b>			
2004		5,6	0,0775
2005		7,1	0,0275
2009		7,9	0,045
CV		<b>17 %</b>	<b>51 %</b>

kennzeichnet. Die Arten unterschieden sich vor allem in ihrer Durchwurzelungsdichte im Oberboden, während die Tiefenabnahme eine geringere Artdifferenzierung aufwies. Dagegen wirkt sich die Jahreswitterung besonders auf die Tiefenverteilung, weniger aber auf die Wurzellichte aus. Die Durchwurzelungstiefe kann als Optimierung an die bodenhydrologischen und Nährstoffverhältnisse interpretiert werden (HO et al. 2004), während artspezifische Unterschiede sich stärker in der Wurzellichte zeigen.

Tabelle 2: Modellparameter für die Simulation mit HYDRUS 1D

Parameter	Wert
<b>Bodenhydraulische Eigenschaften</b>	
<b>Schluffiger Lehm</b>	
$\theta_s$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,45
$\theta_r$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,067
$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	0,02
n (-)	1,41
$K_{sat}$ (cm d <sup>-1</sup> )	10,8
<b>Wasserstress-Parameter</b>	
<b>Feddes Reduktionsfunktion</b>	
$h_0$ (cm)	-10
$h_{opt}$ (cm)	-25
$h_{2,high}$ (cm)	-400
$h_{2,low}$ (cm)	-500
$h_3$ (cm)	-8000
<b>Meteorologische obere Randbedingungen</b>	
$ET_{0,früh}$ (mm)	262,9
$ET_{0,spät}$ (mm)	98,4
$NS_{trocken,früh}$ (mm)	156,2
$NS_{trocken,spät}$ (mm)	354,6
$NS_{feucht,früh}$ (mm)	103,0
$NS_{feucht,spät}$ (mm)	247,2
<b>Untere Randbedingung</b>	
<b>Einheitsgradient</b>	
<b>Stofftransport</b>	
<b>Nicht-sorbierender Stoff</b>	
Dispersionkoeffizient (cm)	5,0
Diffusionskoeffizient (cm <sup>2</sup> d <sup>-1</sup> )	2,0
<b>Anfangsbedingung</b>	
$h_{trocken}$ (cm)	0 cm bis -100 cm: Lineare Abnahme von -1000 cm auf -330 cm -100 cm bis -200 cm: -330 cm (FK) 0 cm bis -200 cm: -330 cm (FK)
$h_{trocken}$ (cm)	

## Wurzelfunktionen

Die Bedeutung der Wurzelsystemeigenschaften für wichtige Funktionen der Begrünung wurde über das Simulationsmodell HYDRUS-1D getestet. Ziel war die Abschätzung des Wurzeinflusses auf Wasserverbrauch und Nitratverlagerung im semiariden Raum Ostösterreichs. Tabelle 2 gibt die Inputparameter für die Simulation wieder, Abbildung 3 zeigt die geprüften Wurzelverteilungen.

Als potentielle Verdunstung wurde die Referenzverdunstung ( $ET_0$ ) nach Penman-Monteith angesetzt. Simuliert wurde aus einem 10jährigen Wetterdatensatz (2000-2010) aus Groß Enzersdorf das feuchteste und trockenste Jahr bei gleicher potentieller Evapotranspiration. Entsprechend den gemessenen Wurzelverteilungen wurden zwei Extreme mit (i) gleichmäßig über die Tiefe verteiltem Wurzelsystem (Wurzel 1) und (ii) oberflächennahem Wurzelsystem (Wurzel 2) simuliert (Abbildung 3).

Die Wurzelverteilung wird für die Simulation normalisiert (WU et al. 1999). Das Modell berücksichtigt keinen Einfluss der Wurzel-dichte. Die Auswirkungen dieser Wurzelverteilungen wurden für eine stark bodendeckende Zwischenfrucht (Transpiration = 90 % von  $ET_0$ ) sowie eine geringer deckende Kultur (Transpiration = 65 % von  $ET_0$ ) modelliert und mit Brache (Bodenevaporation = 100% von  $ET_0$ ) verglichen. Ebenfalls berücksichtigt wurde eine früh gesäte Begrünung unter der Annahme vollständiger Pflanzenentwicklung ab dem ersten August und einer später gesäten Variante mit vollständiger Entwicklung ab 15. September. HYDRUS erlaubt keine genauere Modellierung des

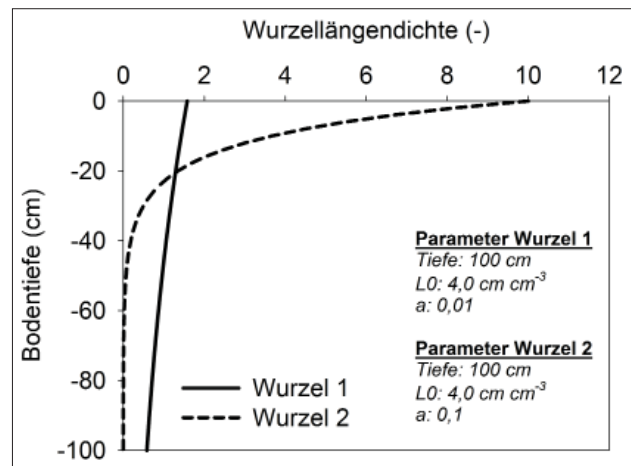


Abbildung 3: Normalisierte Wurzelverteilung für die Simulation zweier Zwischenfrüchte mit unterschiedlicher Wurzellängenallokation

Pflanzenwachstums. Die vereinfachte Repräsentation der Pflanze über klar definierte Randbedingungen, bietet jedoch den Vorteil einer eindeutigen Analyse der hydrologischen Auswirkungen der Wurzelverteilung. Dies ist in komplexeren Boden-Pflanze-Atmosphäre-Modellen mit umfassender Simulation des Pflanzenwachstums (z.B. Daisy, DSSAT, CropSyst) kaum möglich, da die verknüpften Submodelle und Algorithmen die Festlegung der Wurzelverteilung erschweren (diese ist ein zeitlich variabler Modelloutput) und damit die Vergleichbarkeit von Szenarien problematisch machen.

**Tabelle 3: Aktuelle Verdunstung (ET), Anteil Transpiration und Versickerung bei unterschiedlichen Begrünungsszenarien und Schwarzbrache**

Variante*	ET in mm (Anteil Transpiration)	Versickerung in mm
<b>SZENARIO 1**</b>		
Brache	124,8 (0,0)	5,3
Wurzel 1	179,0 (0,85)	5,0
Wurzel 2	145,6 (0,86)	5,3
Bedeckung 1	186,4 (0,64)	5,1
Bedeckung 2	146,5 (0,62)	5,3
<b>SZENARIO 2</b>		
Brache	194,2 (0,0)	5,7
Wurzel 1	256,6 (0,90)	4,1
Wurzel 2	222,6 (0,89)	4,5
Bedeckung 1	254,1 (0,66)	4,1
Bedeckung 2	218,7 (0,67)	4,6
<b>SZENARIO 3</b>		
Brache	73,1 (0,0)	3,8
Wurzel 1	92,3(0,90)	3,8
Wurzel 2	84,9 (0,89)	3,8
Bedeckung 1	92,5 (0,66)	3,8
Bedeckung 2	84,3 (0,65)	3,8
<b>SZENARIO 4</b>		
Brache	99,0 (0,0)	3,5
Wurzel 1	98,0 (0,90)	3,4
Wurzel 2	98,1 (0,90)	3,5
Bedeckung 1	98,6 (0,65)	3,4
Bedeckung 2	98,5 (0,65)	3,5

Legende:

\***Varianten:** *Wurzel 1:* tiefergehendes Wurzelsystem, 90 % Bodendeckung; *Wurzel 2:* oberflächennahes Wurzelsystem, 90 % Bedeckung; *Bedeckung 1:* tiefergehendes Wurzelsystem, 65 % Bodendeckung; *Bedeckung 2:* oberflächennahes Wurzelsystem, 65 % Bedeckung

\***Szenarien:** *Szenario 1:* Fröhsaat, Trockenjahr; *Szenario 2:* Fröhsaat, Feuchtjahr; *Szenario 3:* Normalsaat, Trockenjahr; *Szenario 4:* Normalsaat, Feuchtjahr; Fröhsaat: Entwickelter Bestand ab 1. August, Normalsaat: Entwickelter Bestand ab 15. September

Eine wichtige Kenngröße eines nachhaltigen Begrünungsmanagements im Trockengebiet ist der Wasserverbrauch. *Tabelle 3* zeigt den Wasserentzug bei den verschiedenen Szenarien.

Die Tiefenversickerung war sehr gering und unterschied sich kaum zwischen den Szenarien. Selbst in einem Feuchtjahr lag die potentielle Verdunstung bis Mitte Oktober über dem Niederschlag, was bei einem Boden mit hoher Speicherfähigkeit in dem betrachteten Zeitraum zu keiner Überschreitung der Wasserspeicherfähigkeit bis zwei Meter Profiltiefe führte. Versickerungsverluste sind erst über die Winter- und Frühjahrsmonate zu erwarten, einem Überhang des Niederschlages über die Verdunstung.

Der Wasserverbrauch der Begrünung liegt bei einer Variante mit gleichmäßiger Wurzeltiefenverteilung am höchsten, da sie die reduzierte Wasserverfügbarkeit im austrocknenden Oberboden durch den Wurzelentzug aus tieferen Schichten kompensieren kann. Die Differenz kann hier bis zu 64 mm (Szenario 2) betragen. Dagegen ist die Wasserentzugsdifferenz eine Zwischenfrucht mit oberflächennahem Wurzelsystem nur etwa halb so groß (ca. 20-30 mm). Da Begrünungen im Allgemeinen ein stärker oberflächennahes Wurzelsystem

aufweisen kann davon ausgegangen werden, dass der Wasserverbrauch bei einer früh gesäten Zwischenfrucht bei etwa +25 % im Vergleich zur Brache liegt. Interessant ist, dass sich eine Begrünung mit geringerem Deckungsgrad – etwa durch niedrige Saatmenge, unzureichende Saatechnik oder schlechten Feldaufgang - hinsichtlich des Wasserverbrauchs kaum von einem gut entwickelten Bestand unterscheidet. Der geringere Pflanzenwasserverbrauch geht über vermehrte Bodenevaporation verloren. Für einen späteren Anbau der Begrünung (Szenario 3 und 4), wie er in Österreich üblich ist (20. August), zeigt sich deutlich, dass kaum ein Unterschied im Wasserverbrauch gegenüber einer Brache zu erwarten ist.

Die Profilwassergehalte am Ende der Simulation – zu Winterbeginn bei Abfrostern der Begrünung – sind in *Abbildung 4* dargestellt.

In einem Trockenjahr ist die Wasserdynamik auf einem Boden mit hoher Speicherkraft in den oberen Bodenschichten konzentriert, die Infiltrationstiefe des Niederschlages ist auf ca. 40 cm beschränkt. Die durch den Pflanzenentzug bedingte Differenzierung im Profilwassergehalt folgt diesem Feuchteangebot aus den Niederschlägen und zeigt sich besonders zwischen 40 und 80 cm Bodentiefe, wo der Boden stärker ausgetrocknet wird. Der Oberboden bleibt dagegen bei einem hohen Deckungsgrade der Pflanzen bis 30 cm Tiefe wegen verringerter Evaporation feuchter. In einem Feuchtjahr zeigt sich die Differenzierung nur bei frühem Anbau in tieferen Schichten. Der Oberboden wird durch die Niederschläge gänzlich aufgefüllt, wobei bei der Brache ein Teil des Niederschlages in tiefere Schichten perkoliert, während er bei der Begrünung nicht ausreicht, den gesamten Profilspeicher unter 50 cm Tiefe aufzufüllen.

*Abbildung 5* zeigt für die Variante einer tiefwurzelnden Zwischenfrucht mit hoher Deckung (Wurzel 1) die Unterschiede im Profilwassergehaltsverlauf zu Brache. Bei frühem Anbauermin ergibt sich etwa Mitte September, nach jenem Teil der Vegetationszeit mit hohem Verdunstungspotential der Atmosphäre, der maximale Unterschied. Zum Ende der Simulationsperiode lag die Zwischenfrucht bei 64 mm weniger Profilwasser zwischen 0 und 200 cm Bodentiefe. Dies entspricht einer mittleren Wassergehaltsdifferenz von ca. 3 Vol. % deren Verteilung *Abbildung 5* zeigt. Bei spätem Saattermin liegt die Differenz bei nur 20 mm bzw. zeigt sich keine Differenz bei einer Begrünung mit nur 65 % Deckungsgrad.

*Abbildung 6* stellt die Auswirkungen auf die Nitratverteilung im Profil dar. Nach einem typischen anfänglichem Verteilmuster, etwa durch im Boden verbleibenden Stickstoffdünger nach der Hauptfrucht, mit 60 % in 0-30 cm, 31 % in 30-60 cm und 9 % in 60-90 cm Bodentiefe, finden sich bei einer Brache am Ende der Simulationsperiode 9 % in 0-30 cm, 29 % in 30-60 cm, 39 % in 60-90 cm und 23 % unter 90 cm Bodentiefe. Bei einer tiefwurzelnden Begrünung hat sich der NO<sub>3</sub>-Gehalt durch die Pflanzenaufnahme um 72 % von anfänglich 92 kg ha<sup>-1</sup> auf 25 kg ha<sup>-1</sup> reduziert, wobei auch hier der Peak der Nitratkonzentration in der Schicht zwischen 60 und 90 cm Bodentiefe (84 cm) liegt.

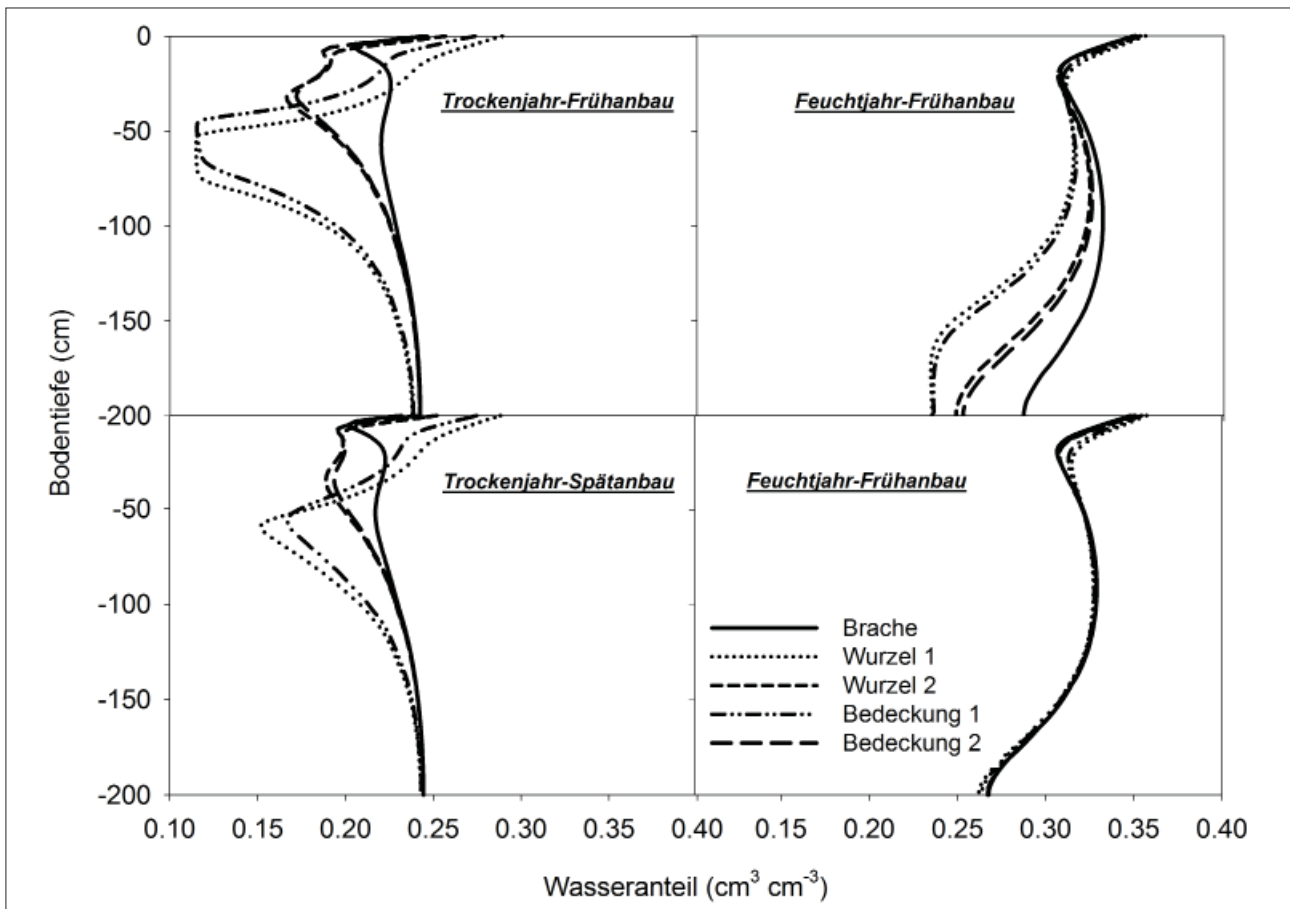


Abbildung 4: Profilwassergehalt am Ende der Simulation (Abfrosten der Begrünung)

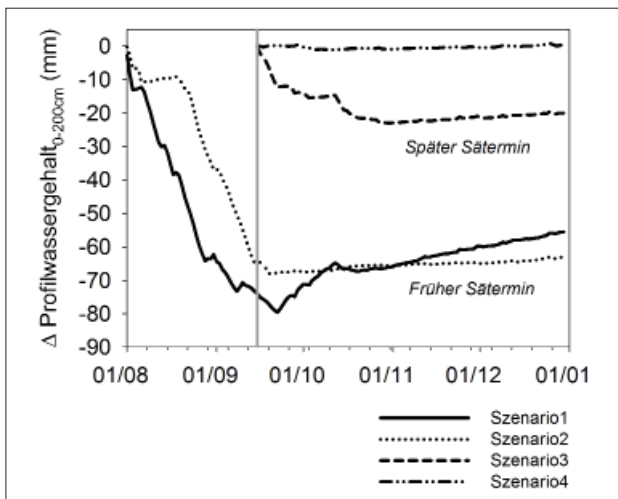


Abbildung 5: Profilwasserdifferenz zwischen Brache und einer tiefwurzelnden Begrünung bei unterschiedlichem Deckungsgrad und zwei Saatterminen

## Schlussfolgerung

Zwischenfrüchte zeigen deutliche Unterschiede in ihrem Wurzelsystem, insbesondere in der Durchwurzelungsdichte des Oberbodens. Eine hohe Menge stabilen Wurzelmaterials trägt entscheidend zur Humusreproduktion bei. Die Tiefenverteilung der Wurzel wird vor allem durch Standort-

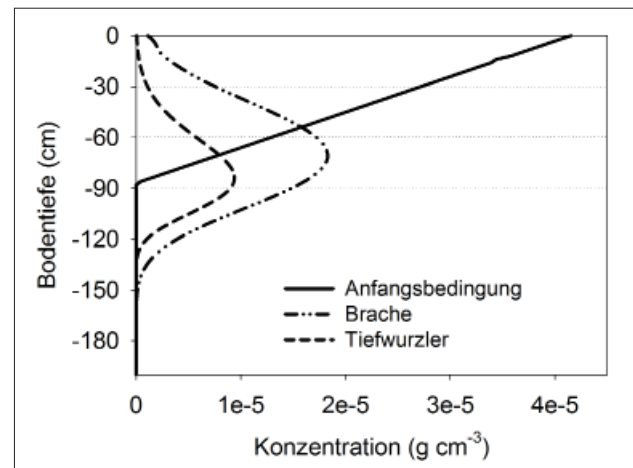


Abbildung 6: Konzentrationsprofil von Nitrat im Bodenprofil nach einer tiefwurzelnden Begrünung im Vergleich zu Brache in einem feuchten Jahr

hydrologie und Jahreswitterung bestimmt. Die Simulation des Einflusses von Wurzelverteilung und Oberflächenbedeckung auf Wasserdynamik und Stofftransport zeigt, dass die Wurzelverteilung für die Zwischenfruchtwirkung auf bodenhydrologische und bodenchemische Prozesse (Wasserverbrauch, Nitratverlagerung) wichtiger ist als der oberirdische Bedeckungsgrad. Dementsprechend ist

unter Trockenbedingungen eine rasch deckende, üppige Begrünung anzustreben, deren Wurzelsystem vor allem die Oberkrume intensiv durchwurzelt. Dies garantiert eine Wassernutzung, die vor allem auf der Umverteilung von unproduktiver Bodenverdunstung in Richtung Pflanzentranspiration basiert, ohne zusätzlichen höheren Wasserentzug aus tieferen Bodenschichten. Diese Empfehlung gilt nicht für jene Standorte, in denen die Reduktion der Nitratverlagerung der hauptsächliche Zweck der Begrünung ist, und damit tiefwurzeln Arten entscheidend sind. Unsere Ergebnisse zeigen klar, dass das Management der agroökologischen Wirkungen der Zwischenfrucht die Kenntnis ihres Wurzelsystems erfordert. Dies ermöglicht auch eine Artenwahl, die das wasserbedingte Risiko für die Folgekultur unter semiariden Bedingungen minimiert.

## Literatur

- GERWITZ, A. and E.R. PAGE, 1974: An empirical mathematical model to describe plant root systems. *J. Appl. Ecol.* 11, 773-782.
- HIMMELBAUER, M.L., W. LOISKANDL and F. KASTANEK, 2004: Estimating length, average diameter and surface area of roots using two different image analysis systems. *Plant Soil* 260, 111-120.
- HO, M.D., B.C. McCANNON and J.P. LYNCH, 2004: Optimization modeling of plant root architecture for water and phosphorus acquisition. *J. Theor. Biol.* 226, 331-340.
- PIERRET, A, CH.J. MORAN and C. DOUSSAN, 2005: Conventional detection methodology is limiting our ability to understand the roles and functions of fine roots. *New Phytol.* 166, 967-980.
- SILVER, W.L. and R.K. MIYA, 2001: Global patterns in root decomposition: comparison of climate and litter quality effects. *Oecologia* 129, 407-419.
- SIMUNEK, J., M. SEJNA, H. SAITO, M. SAKAI and M.TH. VAN GENUCHTEN, 2008: The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media. University of California Riverside.
- WU, J., R. ZHANG and S. GUI, 1999: Modeling soil water movement with water uptake by roots *Plant Soil* 215, 7-17.



# Untersuchungen zum Bodenwasserhaushalt und zur Durchwurzelung unter einem Gehölzbestand (*Salix purpurea* L.) im Vergleich zu einer Gräser-Kräuter-Narbe

Walter Lammeranner<sup>1\*</sup> und M. Obriejetan<sup>1</sup>

## Zusammenfassung

Zur oberflächennahen Stabilisierung geschütteter (verdichteter) Dämme und Böschungen können sowohl Gräser-Kräuter Begrünungen als auch Gehölzpflanzungen (ingenieurbioologische Bauweisen) zum Einsatz kommen. Die Art und Weise wie diese den Boden schützen und stabilisieren ist aber durch ihre Lebensform und ihren unterschiedlichen Habitus geprägt. Die im Beitrag vorgestellten Forschungsarbeiten untersuchen deshalb anhand von Lysimeterversuchen die Auswirkungen der beiden Vegetationstypen auf den Bodenwasserhaushalt und legen im Rahmen dieser Versuche ein besonderes Augenmerk auf Form und Tiefe der beiden Wurzelsysteme. Der untersuchte Gehölzbestand besteht dabei aus der bei ingenieurbioologischen Sicherungsmaßnahmen häufig verwendeten Purpur-Weide (*Salix purpurea* L.) und wird einer aus trockenheitsresistenten Arten bestehenden Gräser-Kräuter Vegetation gegenübergestellt. Die vorliegende Arbeit präsentiert die Ergebnisse der ersten Vegetationsperiode. Dabei konnte nach der ersten Vegetationsperiode bei der Gräser-Kräuter Vegetation eine sehr hohe Wurzelkonzentration in den obersten Bodenschichten (vor allem 5-10 cm Bodentiefe) festgestellt werden, welche aber nach unten hin sehr schnell abnimmt. Bei der Weidenvegetation ist die Wurzelkonzentration in den obersten Bodenschichten deutlich geringer, aber gleichmäßiger über das Tiefenprofil verteilt. Betrachtet man die Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt so kam es bei den mit Weiden bepflanzten Lysimetern sehr rasch zu erhöhten Bodenwasserspannungen und geringeren Bodenwassergehalten. Bei den mit Gräser-Kräuter Vegetation bepflanzten Lysimetern kam es erst gegen Ende der Vegetationsperiode zu Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt, welche sich überdies auf die obersten Bodenschichten beschränkten.

**Schlagwörter:** Bodenwasserhaushalt, Durchwurzelung, Gehölze, Gräser-Kräuter Bewuchs

## Summary

For the surface stabilization of (compacted) dams and embankments grass-herb vegetation as well as woody plants (soil bioengineering methods) can be used. The manner in which these vegetation forms stabilize and protect the soil is influenced by their life form and different habitus. The research presented in this article is therefore studying the effects of both types of vegetation on the soil water balance and the shape and depth of the rootinf systems by lysimeter investigations. The investigated woody plants consisted of purple willows (*Salix purpurea* L.) which are often used in soil bioengineering techniques and are compared to a drought-resistant grass-herb vegetation. This paper presents the results of the first growing season. After the first growing season the grass-herb vegetation showed a very high concentration of roots in the upper soil layers (5-10 cm soil depth), but the root concentration decreased very fast towards the bottom of the lysimeters. Within the woody vegetation lysimeters, the root concentration in the upper soil layers was significantly less, but more evenly distributed over the depth profile. Regarding the soil water balance the willows led very fast to increased soil water pressures and lower soil water contents. In the lysimeters with grass-herb vegetation, effects on soil water balance were limited to the upper soil layers and were observed only at the end of the growing season.

**Keywords:** soil water balance, rooting systems, woody plants, grass-herb vegetation

## Einleitung

Die Untersuchungen wurden im Rahmen von Forschungsarbeiten zu den Auswirkungen von Gehölzbeständen auf Hochwasserschutzdämme durchgeführt. Die Vegetationsdecke auf Hochwasserschutzdämmen ist dabei besonders im Hinblick auf Erosionsschutz und Böschungsstabilität maßgebend. In den Regelwerken wird als bester Schutz für den Dammkörper eine dauerhafte, dichte und geschlossene

Grasnarbe gesehen. Gehölze auf Hochwasserschutzdeichen werden abgelehnt, beziehungsweise nur unter besonderen Bedingungen geduldet. Begründet wird dies unter anderem mit den Befürchtungen, dass Wurzeln entlang ihrer Gänge die Wasserbewegung und die Durchlässigkeit erhöhen und sich angreifende Kräfte (Wind, Wasser, Schnee) auf die Wurzeln übertragen und damit den Boden lockern. Viele dieser Annahmen basieren aber oft auf Erfahrungswerten, welche mit problematischen und unpassenden Gehölzbe-

<sup>1</sup> Institut für Ingenieurbioologie und Landschaftsbau, Universität für Bodenkultur Wien, Peter Jordan-Straße 82, A-1190 WIEN

\* Ansprechpartner: DI Walter Lammeranner, walter.lammeranner@boku.ac.at

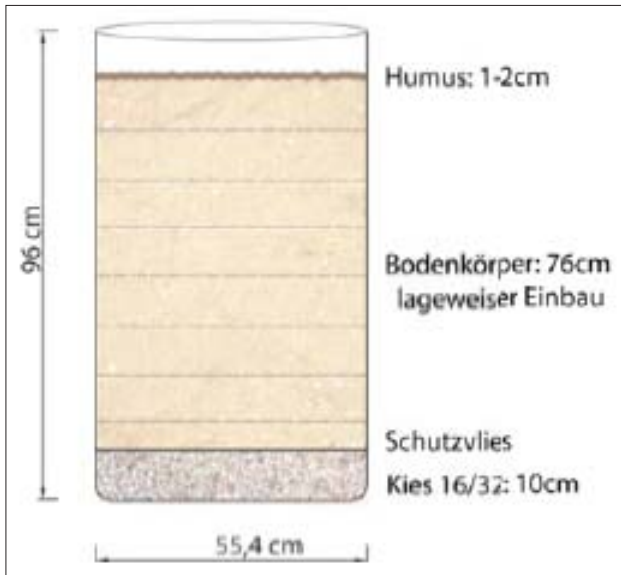


Abbildung 1: Dimensionen der Versuchsbehälter und Aufbau des Bodens.

ständen, wie großen Einzelbäumen und einzelnen Baumgruppen gemacht wurden. Aufgrund der Langwierigkeit und der Abhängigkeit von spezifischen Standortbedingungen sind die wissenschaftlichen Untersuchungen und Erkenntnisse auf diesem Gebiet rar.

Die vorliegenden Untersuchungen leisten deshalb einen Beitrag hinsichtlich Durchwurzelung und Bodenwasserhaushalt von Gräser-Kräuter Vegetationen sowie von Gehölzbeständen aus Weiden (*Salix sp.*). Die Ergebnisse sind dabei auch im Hinblick auf andere Formen von geschütteten (verdichteten) Dämmen und Böschungen von Bedeutung. Des weiteren liefern diese weiterführend auch Erkenntnisse über die Auswirkungen von ingenieurb biologischen Bauweisen unter Einsatz von Weiden.

Material und Methoden

Die Lysimeterversuche wurden im Frühjahr 2009 auf einem Gelände der Betriebsgesellschaft Marchfeldkanal in

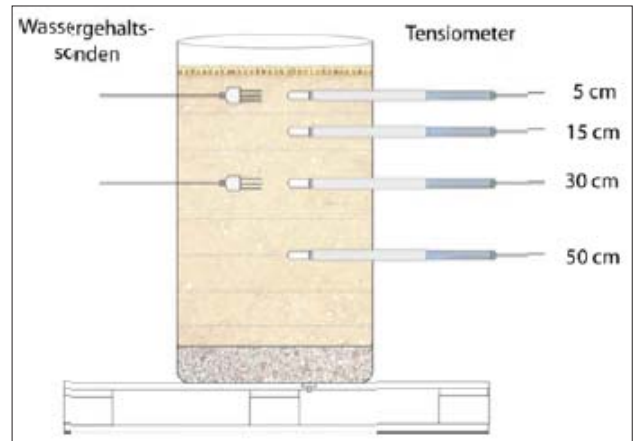


Abbildung 2: Lage der Bodenwassergehaltssonden und Tensiometer.

Deutsch-Wagram (Niederösterreich) angelegt. Dazu wurden 20 zylindrische Behälter (Fässer) mit einer Höhe von 95 cm, einem inneren Durchmesser von 55,4 cm und einem Volumen von 220 l verwendet. Die Behälter wurden an ihrer Unterseite mit einem Abfluss versehen, auf Holzpaletten aufgestellt und mit einer 10 cm hohen Schicht Drainkies gefüllt. Um zu vermeiden, dass feine Bodenbestandteile aus dem darüber liegendem Bodenkörper ausgeschwemmt werden wurde über dem Drainkies noch ein Schutzvlies angebracht. Das für den Bodenkörper verwendete Material wurde lageweise geschüttet und mit einem Verdichtungsgerät auf eine Trockenrohdichte ( $\rho_D$ ) von 1,86 g/cm<sup>3</sup> verdichtet. Das Bodenmaterial besteht aus einem weitgestuften Sand-Kies-Gemisch. Im Labor durchgeführte Durchlässigkeitsversuche (fallende Druckhöhe) ergaben bei der verwendeten Einbaudichte Durchlässigkeitsbeiwerte ( $k_{10}$ ) im Bereich von 10<sup>-8</sup> m/s bis 10<sup>-7</sup> m/s (siehe Abbildungen 1 und 2).

Von den 20 Lysimetern wurden entsprechend den Vegetationsformen auf den Dammböschungen ein Teil mit Weiden (*Salix purpurea* L.) bepflanzt sowie ein anderer Teil mit Gräsern und Kräutern begrünt. Die Weidenvegetation wurde dabei nach Art der ingenieurb biologischen Bauweise

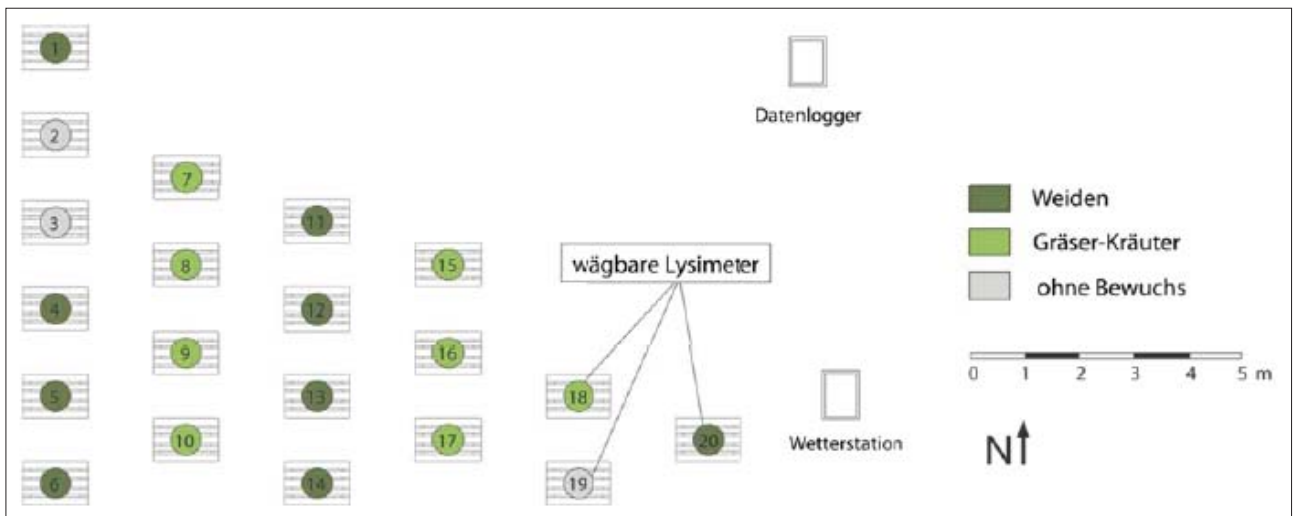


Abbildung 3: Übersicht über die Versuchsanlage (schematische Aufsicht).

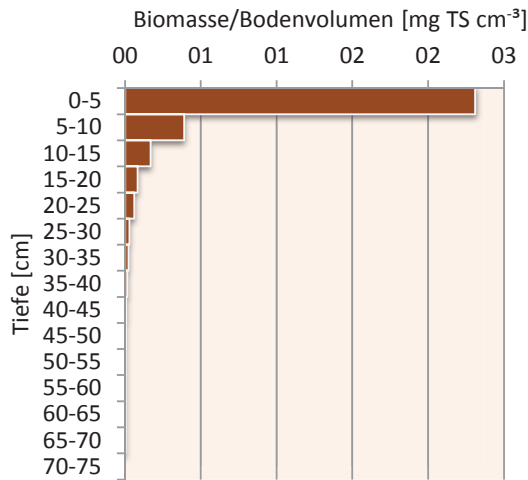


Abbildung 4: Gräser-Kräuter Vegetation, Erste Vegetationsperiode: Biomasse (Trockensubstanz) pro Volumeneinheit Boden.

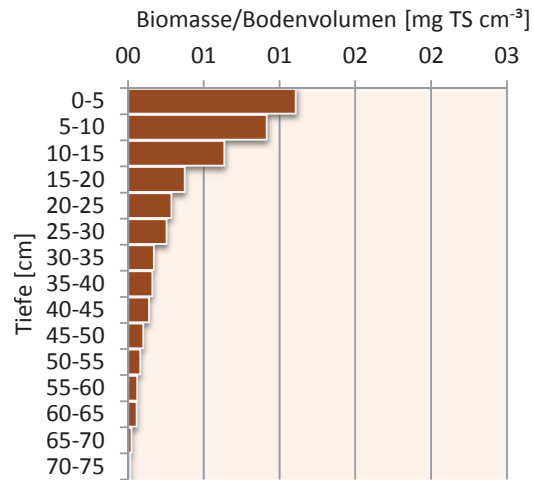


Abbildung 5: Weidenvegetation, Erste Vegetationsperiode: Biomasse (Trockensubstanz) pro Volumeneinheit Boden.

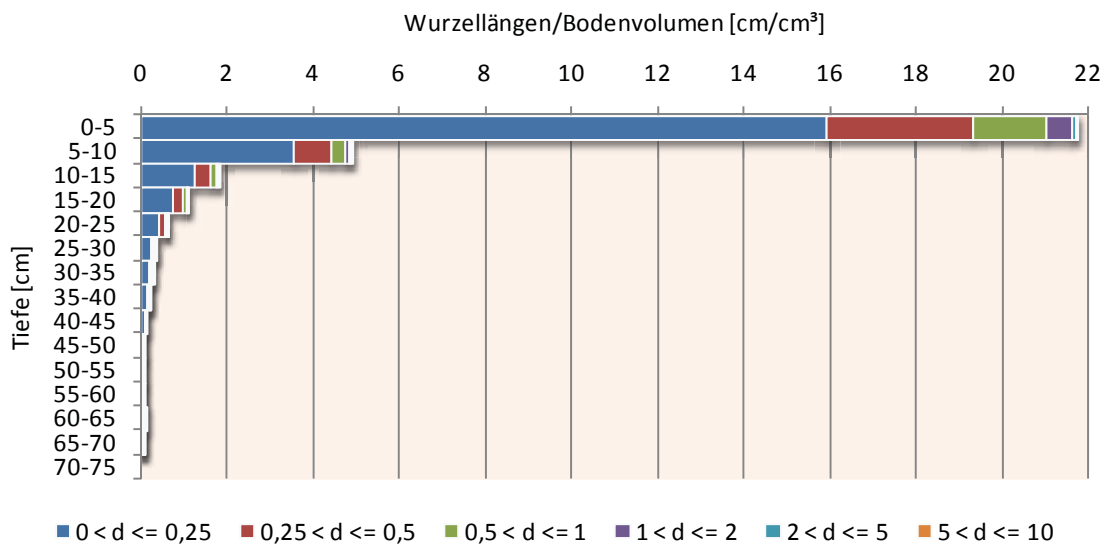


Abbildung 6: Gräser-Kräuter Vegetation, Erste Vegetationsperiode: Wurzellängen pro Volumeneinheit Boden, Wurzeln aufgeteilt in Durchmesserklassen (siehe Legende).

der Weidenspreitlage aufgebracht indem fingerdicke Weidenäste auf die Oberfläche aufgelegt und gering mit Humus überdeckt wurden (2 cm). Die Gräser-Kräuter Ansaat wurde als Trockensaat ausgeführt. Als Nullvariante blieben drei Behälter vegetationslos. Eine Übersicht über die Anordnung der Behälter ist in *Abbildung 3* zu sehen.

Während bei 17 von 20 Versuchsbehältern nur die, die Behälter durchlaufende Sickerwassermenge mittels manuell zu entleerender Sammelbehälter gemessen wird, sind drei der Versuchsbehälter mit Messinstrumentierung ausgestattet und zu wägbaren Lysimetern ausgebaut. Diese drei Behälter stehen auf einer Wägezelle und sind in vier verschiedenen Tiefen mit je 2 Bodenwassergehaltssensoren (Hydra Probe

II der Firma Stevens) und je 4 Tensiometern (T4 der Firma UMS) ausgestattet. Die Sickerwassermenge wird mittels Kippwaagen (KIPP004 der Firma UMS) gemessen. Um die Wasserhaushaltsbilanz bestimmen zu können, werden auch die meteorologischen Parameter (Niederschlag, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Strahlung) erfasst. Die gemessenen Parameter werden alle 10 Minuten vom Datenlogger abgerufen und gespeichert.

Jedes Jahr wird ein Behälter jedes Vegetationstyps auseinander genommen. Dabei wird zuerst die gesamte oberirdische Biomasse abgeerntet. Bei den Weiden erfolgt die Messung von Durchmesser und Länge der Sprosse, danach werden die Blätter von den Zweigen getrennt. Die Blätter

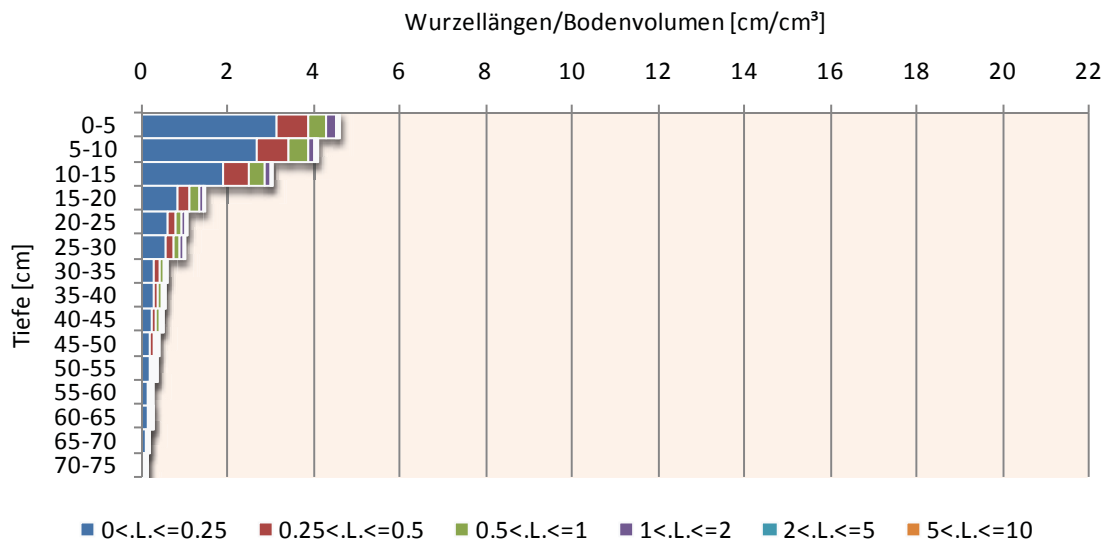


Abbildung 7: Weidenvegetation, Erste Vegetationsperiode: Wurzellängen pro Volumeneinheit Boden, Wurzeln aufgeteilt in Durchmesserklassen (siehe Legende).

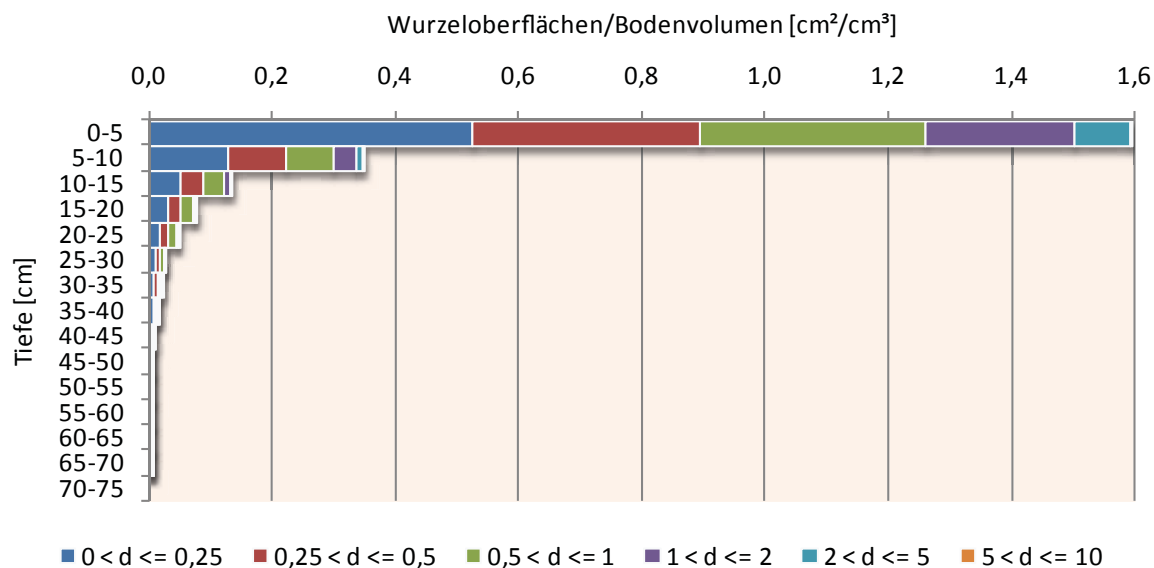


Abbildung 8: Gräser-Kräuter Vegetation, Erste Vegetationsperiode: Wurzeloberflächen pro Volumeneinheit Boden, Wurzeln aufgeteilt in Durchmesserklassen (siehe Legende).

werden eingescannt um den Blattflächenindex (BFI) oder Leaf Area Index (LAI) zu bestimmen. Danach werden die einzelnen Pflanzenteile sowie auch die oberirdischen Teile der Gräser-Kräuter Vegetation bei 80 °C bis zur Trockenkonstanz getrocknet. Bei den wägbaren Lysimetern wird zerstörungsfrei Durchmesser und Länge der Sprosse der Weiden bestimmt. Bei der Gräser-Kräuter Begrünung erfolgt die Charakterisierung durch die Trocknung und Wägung des einmal im Jahr gewonnenen Mahdgutes.

Zur Untersuchung des Wurzelwachstums werden die Behälter nach und nach in Ringen von 5 cm aufgeschnitten,

das Bodenmaterial samt Wurzeln abgetragen und in Säcken verwahrt. Dieses Bodenmaterial wird danach in Wasser aufgelöst und die Wurzeln sorgfältig heraus gesiebt. Danach wurden die Wurzeln schichtweise eingescannt und mittels der Software WinRHIZO ausgewertet.

## Ergebnisse

Nachfolgend ist ein Teil der Ergebnisse aus der ersten Vegetationsperiode angeführt. Dabei wird vor allem auf die Wurzeluntersuchungen (Biomasse, Wurzellängen, Wurzel-

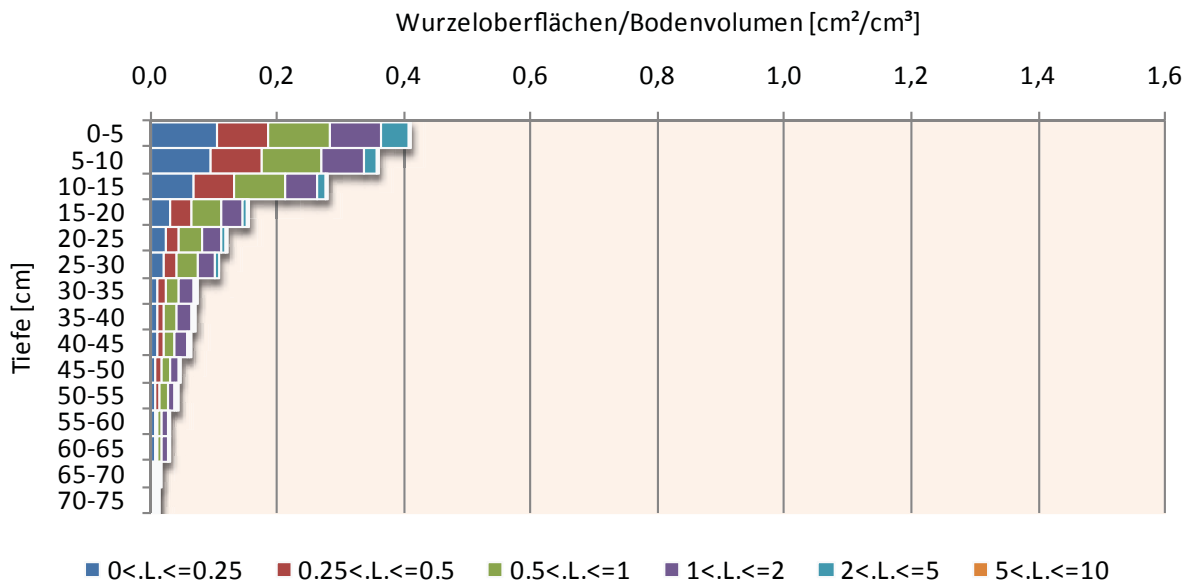


Abbildung 9: Weidenvegetation, Erste Vegetationsperiode: Wurzeloberflächen pro Volumeneinheit Boden, Wurzeln aufgeteilt in Durchmesserklassen (siehe Legende).

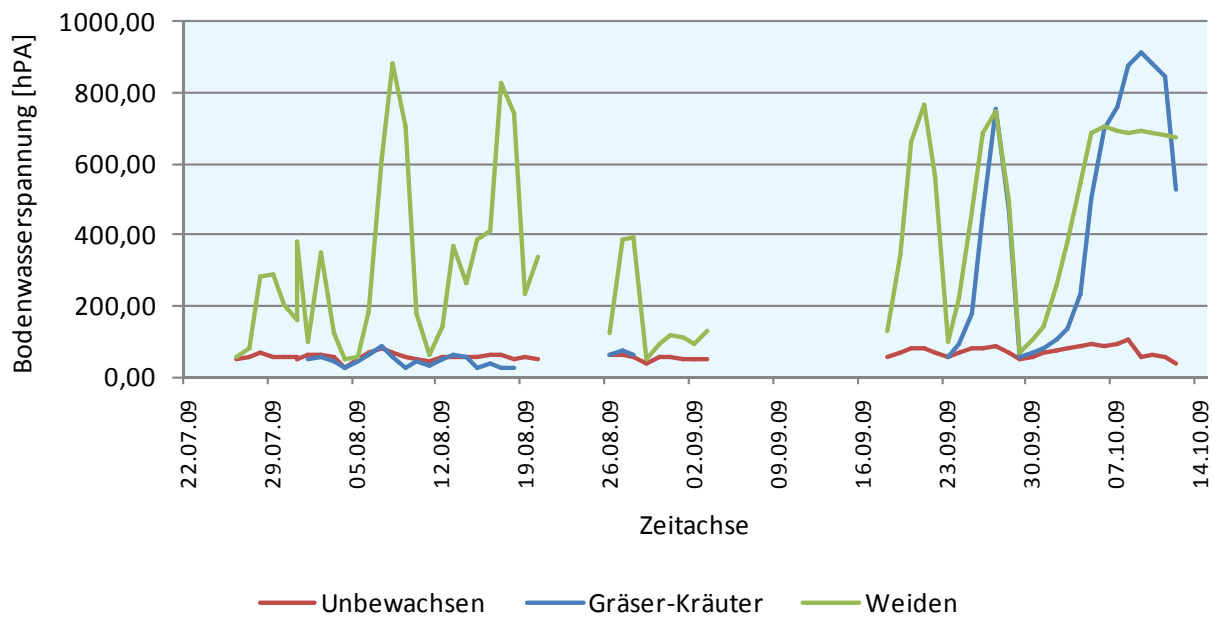


Abbildung 10: Bodenwasserspannungen in der ersten Vegetationsperiode in einer Messtiefe von 5 cm.

oberflächen) und die Bodenwasserhaushaltsuntersuchungen (Bodenwasserspannungen) näher eingegangen.

Bei der Weidenvegetation wurde in der ersten Vegetationsperiode eine oberirdische Biomasse von 98 g Trockensubstanz produziert. Dabei entfielen auf die Zweige 63 g und auf die Blätter 35 g. Bei der Gräser-Kräuter Begrünung betrug die oberirdische Biomasse weniger als ein Drittel der der Weiden nämlich 29 g Trockensubstanz. Betrachtet man die Wurzeln so wurde bei den Weiden eine Wurzelbiomasse von 53 g und bei der Gräser-Kräuter Vegetation von 37 g Trockensubstanz gemessen. In den *Abbildungen 4* und *5* ist

die Wurzelbiomasse nach den einzelnen Tiefenschichten von 5 cm aufgeteilt und auf das Bodenvolumen in mg Trockensubstanz pro  $\text{cm}^3$  Bodenvolumen bezogen. Deutlich zu sehen ist die starke Konzentration der Wurzelbiomasse in den ersten 5 cm bei der Gräser-Kräuter Vegetation. Bei der Weidenvegetation erfolgt die Abnahme der Wurzelbiomasse über die Tiefe gleichmäßiger.

Betrachtet man die Wurzellängen in den einzelnen Tiefenschichten zeigt sich, dass bei der Gräser-Kräuter Vegetation in den ersten 5 cm etwa 22 cm Wurzeln auf  $1 \text{ cm}^3$  Bodenvolumen zu finden waren wobei der größte Anteil (etwa 16 cm)

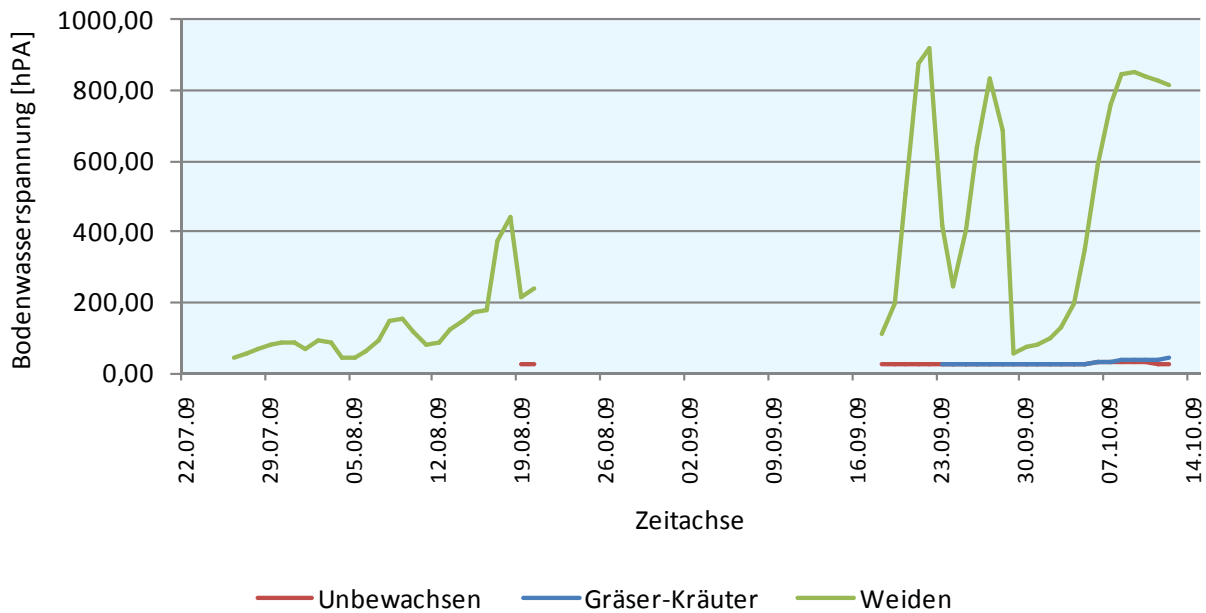


Abbildung 11: Bodenwasserspannungen in der ersten Vegetationsperiode in einer Messtiefe von 30 cm.

auf Wurzeln kleiner gleich 0,25 mm entfiel (siehe *Abbildung 6*). Bei den Weiden waren es in den ersten 5 cm Tiefe nur knapp über 4 cm Wurzeln pro  $\text{cm}^3$  Bodenvolumen, danach nehmen die Wurzellängen über die Tiefe relativ gleichmäßig ab. Auch bei den Weidenwurzeln entfällt der größte Anteil an den Wurzellängen auf Wurzeln kleiner gleich 0,25 mm (siehe *Abbildung 7*). Betrachtet man die Wurzellängen über das gesamte Bodenvolumen der Behälter so waren bei der Gräser-Kräuter Vegetation Wurzellängen von 31 cm und bei den Weiden von 18 cm pro  $\text{cm}^3$  Bodenvolumen zu beobachten.

Die Auswertung hinsichtlich Wurzeloberflächen ergibt ein ähnliches Bild. Bei der Gräser-Kräuter Vegetation konzentrierte sich die Oberfläche in den ersten 5 cm wo sie fast  $1,6 \text{ cm}^2$  pro  $\text{cm}^3$  Bodenvolumen erreicht. Danach nahmen die Wurzeloberflächen aber recht rasch mit der Tiefe ab. Im Vergleich dazu waren die Wurzeloberflächen bei den Weiden in der ersten Tiefenschicht (0-5 cm) mit  $0,4 \text{ cm}^2$  eher gering. Erst in einer Tiefe von 10-15 cm sind die Wurzeloberflächen der Weiden größer als die der Gräser-Kräuter Vegetation. Betrachtet man die Wurzeloberflächen über das gesamte Bodenvolumen der Behälter so waren bei der Gräser-Kräuter Vegetation Wurzellängen von  $2,36 \text{ cm}^2$  und bei den Weiden von  $1,76 \text{ cm}^2$  pro  $\text{cm}^3$  Bodenvolumen zu beobachten.

Betrachtet man nun den Verlauf der Bodenwasserspannungen in der ersten Vegetationsperiode erkennt man, dass die Weiden bereits ein Monat nach der Bepflanzung (22.06.2009) Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt zeigen. So waren die Bodenwasserspannungen nach nur einem Monat Wachstum deutlich höher als bei den Lysimetern mit Gräser-Kräuter Vegetation. Gegen Ende der ersten

Vegetationsperiode zeigten sich dann in einer Messtiefe von 5 cm bereits ähnliche Bodenwasserspannungen bei beiden Vegetationsformen. Hingegen konnte in einer Messtiefe von 30 cm bei der Gräser-Kräuter Vegetation noch keine Beeinflussung durch die Vegetation festgestellt werden, die Messwerte zeigen hier den gleichen Verlauf wie bei dem unbewachsenen Lysimeter (siehe *Abbildungen 10 und 11*).

## Resümee und Ausblick

Die Ergebnisse der ersten Vegetationsperiode zeigen wie rasch ingenieurbio-logische Bauweisen unter Einsatz von Weidengehölzen (*Salix sp.*) zu einer gleichmäßigen und tiefreichenden Durchwurzelung und erhöhten Bodenwasserspannungen sowie geringeren Bodenwassergehalten führen. Andererseits konnte aber auch festgestellt werden, dass Gräser-Kräuter Vegetationen einen sehr dichten Wurzelfilz in den obersten Bodenschichten ausbilden. Die Ergebnisse leisten einen Beitrag zur Bewertung der bodenstabilitätsfördernden Eigenschaften der beiden Vegetationstypen. Weiterführende Aussagen sind aber erst nach Betrachtung weiterer Vegetationsperioden möglich.

## Danksagung

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des Projekts „Gehölzstrukturen an Dämmen und Deichen“ durchgeführt. Dieses wurde vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, dem Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und dem Amt der niederösterreichischen Landesregierung (Abteilung Wasserwirtschaft sowie Abteilung Wasserbau) gefördert.

# A split-root system to study biochar effects on root growth, root distribution and assimilate translocation

Gerhard Soja<sup>1\*</sup> und Bernhard Wimmer<sup>1</sup>

## Abstract

Soil is the largest terrestrial carbon pool. In face of soaring atmospheric carbon dioxide concentrations a combination of many different mitigation methods will be necessary to slow the increase and stabilize the levels of greenhouse gases. Taking advantage of the carbon sink potential of soil is one of the promising strategies that could support the international efforts to combat climate change.

Pyrolysis of biomass results in gaseous, liquid and solid products. Whereas syn-gas and syn-oil are energy-rich by-products with potential uses as renewable fuels, the solid residues are called biochar and can be used for amending agricultural soils. Adding biochar to soil has several indirect positive effects apart from removing carbon from a fast geochemical turn-over cycle. On the one hand biochar is assumed to remain stable in the soil

from several decades to several centuries, on the other hand its properties favor the enrichment of poor soils with organic carbon with positive effects on soil microbiology, delay the rapid migration of plant nutrients or pollutants to the groundwater and enhance the water holding capacity of the soil.

The methodological approach presented in this study is designed to investigate the suspected positive effects of biochar on plant growth within vertical soil columns. The key element of this method is the composition of the columns by differently amended soils in a vertical orientation. Thereby plants growing on top of the columns have the potential to grow their roots in the differently composed vertical segments of the columns without physical barriers in-between. When harvesting the plants, the vertical segments can be analyzed separately for root growth, density or assimilate translocation. Results from a pilot study with cover plants are presented.

<sup>1</sup> AIT Austrian Institute of Technology GmbH, A-2444 SEIBERSDORF

\* Ansprechpartner: Dr. Gerhard Soja, gerhard.soja@ait.ac.at

## *Thlaspi goesingense* Hálácsy root plasticity in serpentine soils contradicts the metal foraging behavior

Ingrid Langer<sup>1\*</sup>, Paul Riedmann<sup>1</sup>, Markus Puschenreiter<sup>1</sup> und Walter W. Wenzel<sup>1</sup>

### Zusammenfassung

Der Ni Hyperakkumulator *Thlaspi goesingense* Hálácsy ist auf den Serpentinböden des südlichen Burgenlandes heimisch und speichert bis zu 12000 mg Ni kg<sup>-1</sup> in der oberirdischen Biomasse. Mechanismen die zu diesem außerordentlichen Aufnahme- und Speicherverhalten führen sind noch nicht zur Gänze geklärt. Aktuelle Studien räumen dem „metal foraging“, einer metallorientierten Wurzelplastizität, eine wesentliche Bedeutung bei der Zn-Hyperakkumulation von *Thlaspi caerulescens* ein.

Die vorliegende Studie untersucht (1) die Bodenheterogenität von Serpentinböden als Voraussetzung für morphologische Wurzelplastizität sowie (2) das Wurzelwachstum von *T. goesingense* hinsichtlich veränderter morphologischer Eigenschaften als Antwort auf eine unregelmäßige Verteilung von Ni und Cr. Dazu werden eine Reihe von *T. goesingense* Pflanzen auf zwei unterschiedlichen Serpentinstandorten ausgewählt und jeweils durch vier systematisch gezogene Boden- und Wurzelproben charakterisiert.

Die bodenchemische Untersuchung zeigt eine deutliche Heterogenität in Bezug auf die Verteilung von Ni und Cr, sowohl zwischen den Standorten als auch innerhalb einzelner Wurzelsysteme. *T. goesingense* reagiert deutlich auf unterschiedliche Ni Konzentrationen vor allem durch eine Anpassung der Wurzellänge, während der durchschnittliche Wurzeldurchmesser keine signifikante Veränderung aufweist. Diese morphologische Wurzelplastizität belegt jedoch eine Strategie der Vermeidung hochkontaminierten Bodenregionen und widerspricht damit der Hypothese dass diese Form der Wurzelplastizität grundlegend zur Hyperakkumulation von Ni beiträgt.

**Schlagwörter:** Bodenheterogenität, Ni Hyperakkumulation, *Thlaspi goesingense*, Wurzelmorphologie, metallorientierte Wurzelplastizität

### Summary

*Thlaspi goesingense* Hálácsy indigenous to a serpentine habitat in Redlschlag is known to hyper-accumulate Ni up to 12000 mg kg<sup>-1</sup>. Recently root metal foraging has been proposed as one key mechanism involved in the hyperaccumulation of *Thlaspi caerulescens* expressing metallophilic root proliferation associated with increased Zn capture. This phenomenon is closely related to the heterogeneous distribution of metals typically found in natural field soils.

We aimed to verify the metal heterogeneity of serpentine soils postulated for plant foraging response and to assess *T. goesingense* root growth potentially indicating metallophilic root proliferation and morphological response. Two locations of a serpentine site in Redlschlag were selected differing in plant vegetation and soil characteristics. Soil cores containing root subsamples of *T. goesingense* were systematically taken at the edge of the plant rosettes. Ni (Cr) concentrations were examined and root growth and morphology assessed in the context of soil metal properties.

The evaluation of soil metal concentrations indicated variability of Ni and Cr concentrations, both between plots and within individual root systems. However metal variability was more stressed in scarcely vegetated soil on top of the quarry than in the woody sampling area. Morphological root characteristics of *T. goesingense* reflected soil metal heterogeneity particularly adapting root length. *T. goesingense* exhibited the ability to discriminate between soil patches of different metal concentrations by mechanisms of avoidance. Thus nickelophilic root foraging could not be observed in the current field study.

**Keywords:** heterogeneous soil, Ni hyperaccumulation, *Thlaspi goesingense*, root morphology, metal foraging

### Introduction

Soil pollution by toxic levels of trace metals (heavy metals) and metalloids may derive from anthropogenic inputs such as atmospheric deposits and waste disposal from metal mining and processing industries as well as from geogenic sources, metalliferous parent material such as calamine ores (Cd, Pb, and Zn) or ultramafic rocks (Co, Cr, and Ni) (BAKER et al. 2000). These habitats are known to host a variety of metal hyperaccumulating plant species that characteristically accu-

mulate metals more than 100 times larger than background concentrations in normal plant species (BAKER et al. 2000). Most common hyperaccumulator species belong to the *Brassicaceae* family including 23 *Thlaspi* species. For instance *Thlaspi goesingense* Hálácsy indigenous to serpentine soils in the area of Redlschlag is known to hyperaccumulate Ni concentrating up to 12000 mg kg<sup>-1</sup> in shoot tissues.

Recently root foraging for Zn and Cd has been proposed as one key mechanism involved in the hyperaccumulation

<sup>1</sup> Department of Forest- and Soil Sciences, University of Natural Resources and Life Sciences (BOKU), Konrad Lorenz-Straße 24, A-3430 TULLN

\* Ansprechpartner: DI Ingrid Langer, ingrid.langer@boku.ac.at



of *Thlaspi caerulescens* (HAINES 2002, WHITING et al. 2000) and *Sedum alfredii* (LIU et al. 2010). Root foraging is defined as “the process whereby an organism searches, or ramifies within its habitat, which enhances its acquisition of essential resources” (HUTCHINGS and JOHN 2003) and presupposes the ability of plants to discriminate between soil patches of different element concentrations. This trait is closely related to the heterogeneous distribution of metals typically found in natural field soils (DICKINSON and PULFORD 2005).

Hyperaccumulating plant species have initially inspired scientists to develop non-destructive *in-situ* phytoremediation technologies and to clean up metal affected soils by means of a phytoextraction approach (SALT et al. 1998, WENZEL et al. 1999). The metal extraction efficiency particularly depends on the accumulation potential and the biomass yield of the involved plant species. Moreover non-uniform pollutant distribution is known to affect the availability of metals to plant roots and thus alters the phytoextraction efficiency (KELLER et al. 2003). The ability of metal accumulators to discriminate between soil patches of different metal concentration levels and to express metalophilic root growth would reappraise their suitability for metal extraction processes.

In this study we aim to verify (1) metal heterogeneity of serpentine soils generally postulated for plant foraging response and (2) root growth and morphology of the hyperaccumulating *Thlaspi* species *T. goesingense* Hálácsy potentially indicating nickelphilic root proliferation. Soil Ni concentration levels will be examined in the root area of individual plants and root growth and morphology assessed in the context of total and extractable soil Ni (Cr) concentrations.

## Materials and Methods

To this end a serpentine quarry in Redlschlag (WENZEL and JOCKWER 1999) naturally hosting *Thlaspi goesingense* Hálácsy was sampled selecting two plots obviously differing in soil vegetation. The first plot (Quarry, Q) on top of the quarry showed poor additional vegetation due to anthropogenic disturbance whereas the second one (Wood,

W) was loosely wooded with pines and oaks. Soil was generally characterized as an Eutric Leptosole due to the ultramafic parent material.

End of May overall 20 *T. goesingense* plants were sampled, systematically taking four soil cores at the edge of each plant rosette (depth 25 cm; section 5 cm). Roots were carefully removed from the excavated soil cores, weighed and stained for root scanning according to HIMMELBAUER et al. (2005). Data were finally processed with the WinRhizo (Regents Instruments; Canada) program to evaluate root length (RL) and the average root diameter (avgRD). Soil samples were sieved to < 2 mm and further processed to evaluate total (HCl:HNO<sub>3</sub>-digest) and extractable (1 M NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>-extract) Ni and Cr concentrations. Analytes were measured by means of ICP-MS (Elan 9000 DRCe, Perkin Elmer).

Statistical analyses based on t-Tests to evaluate significant differences between means ( $p \leq 0.05$ ) particularly in respect to differences between the sample plots Quarry and Wood. To verify the variance of root parameters of individual plants and soil metal concentrations within root systems coefficients of variation (CV %) were calculated. The whole data set was further examined using a basic correlation matrix (Statistica 6).

## Results and Discussion

Soil Ni concentrations considerably differed between the sampled plots and generally higher concentrations were found for the Quarry (Q) compared to Wood (W) (Figure 1). Similar to Ni, serpentine soil in Redelschlag concentrated high levels of Cr (total concentration values of 2033 (Q) and 2642 mg kg<sup>-1</sup> (W) and 0.012 (Q) and 0.032 mg kg<sup>-1</sup> (W) in soil extracts). However Cr concentrations in Wood soils significantly exceeded soil concentration values of the Quarry (Q) soil samples. These differences were particularly shown for the NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> extractable Cr concentrations (data not shown).

Mean coefficients of variance (CV %) calculated for Quarry and Wood soils did not differ remarkably (Table 1). However, the variability of metal concentrations within individual root systems was more pronounced on top of the quarry compared to the woody sampling plot.

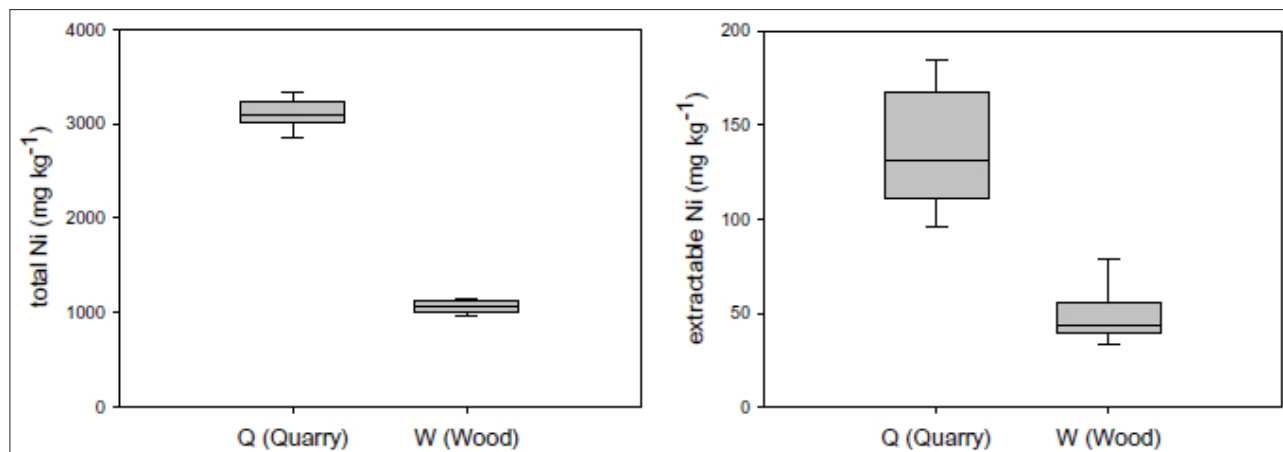
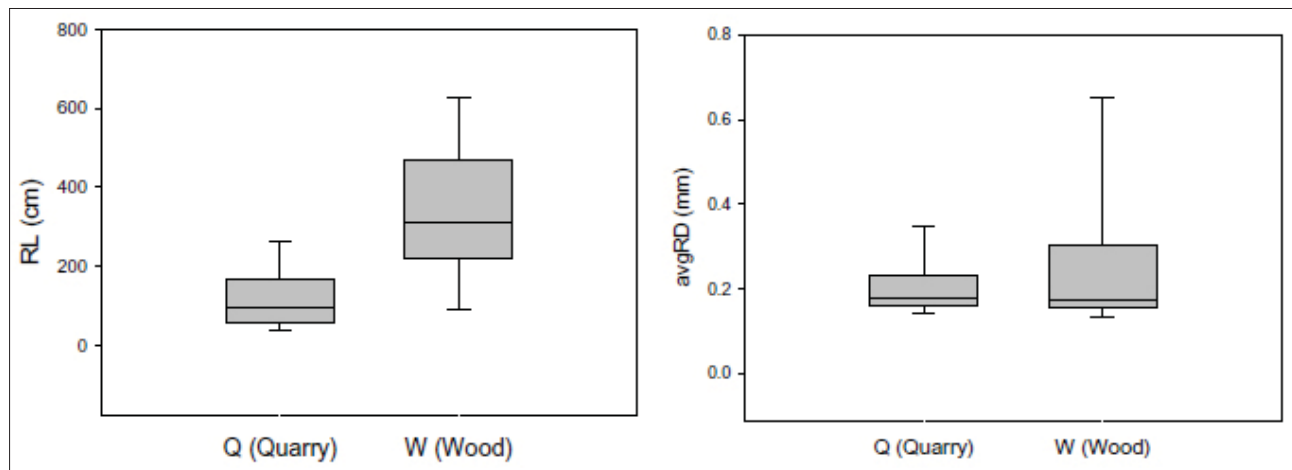


Figure 1: Boxplots of total and extractable soil Ni concentrations of the sampling plots Quarry and Wood.

**Table 1: Mean CV % values (coefficient of variance) of soil metal concentrations and root properties calculated for the experimental plots "Quarry" and "Wood" based on CVs (%) of individual plants.**

CV [%]	Soil metal concentrations				Root properties		
	Ni		Cr		BM	RL	avgRD
	total	extractable	total	extractable	biomass	root length	average root diameter
Quarry	5.11	23.04	6.17	29.13	113.70	78.72	40.09
Wood	3.75	11.73	5.92	15.41	107.79	47.50	59.07



**Figure 2: Boxplots of root length (RL) and average root diameter (avgRD) of the sampling plots Quarry and Wood.**

Data on root biomass removed from soil cores (data not shown) and respective morphological characteristics did not significantly differ between sample plots (Figure 2) even so root characteristics were more variable within individual root systems than chemical soil properties (Table 1).

The variability of root morphological parameters may have been induced by the genetic diversity of *T. goesingense* or the heterogeneity of various parameters in natural field situation. However our experimental data suggest non-uniform distribution of Ni and Cr that affected root morphological variability. Statistical analyses significantly revealed correlations between plant parameters dry weight and root length with soil Ni and Cr concentrations. Correlations were particularly stressed for RL in regard of total Ni ( $R^2 = -0.52$ ;  $R^2 = -0.46$ ) and extractable Ni ( $R^2 = -0.53$ ;  $R^2 = -0.53$ ) indicating *T. goesingense* to reduce root proliferation towards highly Ni enriched soils patches.

The comparison of root lengths and Ni concentrations observed in soil cores of individual plants revealed highest root lengths in soil cores with lowest Ni concentration levels. These data suggest *T. goesingense* to discriminate between soil patches of different Ni concentrations, however, expressing an avoidance mechanism. Thus root morphology obviously contradicts the metallophilic foraging behavior as observed for *T. caerulescens* in response to non-uniform Zn distribution (HAINES 2002).

Plant root parameters were occasionally correlated with Cr indicating increased root length with reduced metal concentrations ( $+0.41 < R^2 < +0.50$ ). Statistical analyses further proved the significance of correlations between root biomass

and soil metal concentrations. However coefficient values were below those observed for root length. Moreover *T. goesingense* average root diameter was hardly correlated with soil metal concentrations.

### Conclusions

The evaluation of soil metal concentrations of a serpentine habitat in Redlschlag indicated variability of Ni and Cr concentrations, both between plots (Quarry and Wood) and within individual root systems. Metal variability was more stressed in scarcely vegetated soil on top of the quarry (Quarry) than in forest soil (Wood). Morphological root properties of the Ni hyperaccumulator *T. goesingense* indigenous to this sampling site reflected soil metal heterogeneity particularly adapting root length. *T. goesingense* showed discrimination properties between soil patches of different metal concentrations but expressed mechanisms of avoidance. Thus nickelphilic root foraging could not be observed in the current field study.

### References

BAKER, A.J.M., S.P. MCGRATH, R.D. REEVES and J.A.C. SMITH, 2000: Metal Hyperaccumulator Plants: A Review of the Ecology and Physiology of a Biological Resource for Phytoremediation of Metal-Polluted Soils. In Phytoremediation of Contaminated Soil and Water. Eds. N Terry and G Banuelos. pp 85-108. Lewis Publishers, Boca Raton.

DICKINSON, N.M. and I.D. PULFORD, 2005: Cadmium phytoextraction using short-rotation coppice Salix: the evidence trail. Environmental International 31, 609-613.

- HAINES, B.J., 2002: Zincophilic root foraging in *Thlaspi caerulescens*. *New Phytologist*, 363-372.
- HIMMELBAUER, M.L., M. PUSCHENREITER, A. SCHNEPF, W. LOISKANDL and W.W. WENZEL, 2005: Root morphology of *Thlaspi goesingense* Hálácsy grown on a serpentine Soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 168, 138-144.
- HUTCHINGS, M.J. and E.A. JOHN, 2003: Distribution of roots in soil, and root foraging activity. In *Root ecology*. Eds. H d Kroon and E J W Visser. pp 33-60. Springer, Berlin, Heidelberg.
- KELLER, C., D. HAMMER, A. KAYSER, W. RICHNER, M. BRODBECK and M. SENNHAUSER, 2003: Root development and heavy metal phytoextraction efficiency: comparison of different plant species in the field. *Plant and Soil* 249, 67-81.
- LIU, F., Y. TANG, R. DU, H. YANG, Q. WU and W. QIU, 2010: Root foraging for zinc and cadmium requirement in the Zn/Cd hyperaccumulator plant *Sedum alfredii*. *Plant Soil* 327, 365-375.
- SALT, D.E., R.D. SMITH and I. RASKIN, 1998: Phytoremediation. In *Annual Review of Plant Biolog.* pp 643-668.
- WENZEL, W.W. and F. JOCKWER, 1999: Accumulation of heavy metals in plants grown on mineralized soils of the Austrian Alps. *Environmental Pollution* 104, 145-155.
- WENZEL, W.W., D.C. ADRIANO, D. SALT and R. SMITH, 1999: Phytoremediation: A Plant-Microbe-Based Remediation System In *Bioremediation of Contaminated Soils*. Eds. D C Adriano, J-M Bollag, W T F Jr and R C Sims. pp 457-508. Agronomy Madison, USA.
- WHITING, S.N., J.R. LEAKE, S.P. MCGRATH and A.J.M. BAKER, 2000: Positive responses to Zn and Cd by roots of the Zn and Cd hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *New Phytologist* 145, 199-210.

# Wasseraufnahme im Wurzelbereich junger Weinreben

Reinhard Nolz<sup>1\*</sup> und Peter Cepuder<sup>1</sup>

## Zusammenfassung

Weinreben zählen zu den Pflanzen mit der höchsten Trockenresistenz, vor allem wegen ihres tief reichenden Wurzelsystems. Dennoch ist eine ausreichende Wasserversorgung die Voraussetzung für die Produktion von Weintrauben mit konstant hoher Qualität. Die Bilanzierung des Wasseranteils in der Wurzelzone von Weinreben ist eine gute Methode für bedarfsorientierte Bewässerungssteuerung. In diesem Zusammenhang wurden Bodenwasseranteilmessungen durchgeführt, um bessere Informationen über die Wasseraufnahme junger Weinreben zu erhalten. Die Messdaten stammen von zwei Feldmessstellen – Weingärten in den ersten beiden Jahren nach der Pflanzung – im Osten Österreichs. Kapazitative Sensoren lieferten den Bodenwasseranteil in verschiedenen Tiefen. Jeder Sensor hat einen vertikalen Messbereich von etwa 10 cm. Die aufsummierten Messwerte zeigen die Änderungen des Bodenwasseranteils in einem definierten Bodenprofil. In ausgewählten trockenen Perioden im Jahr nach der Pflanzung konnte eine Wasseraufnahme über die gesamte Profiltiefe, 100 cm bzw. 70 cm für den jeweiligen Standort, festgestellt werden. Man kann daraus folgern, dass junge Weinreben das Bodenwasser in Tiefen von mehr als 1 m nutzen können – abhängig vom Boden und von der Witterung!

*Schlagwörter:* Weingarten, Bewässerung, Bodenwasseranteil, Wasserbilanz, FDR-Sensoren

## Summary

Grapevines rank among the plants with the highest drought tolerance, mainly because they develop a deep rooting system. However, sufficient water supply is a precondition for the production of grapes with a high and stable quality. Balancing the soil water content within the rooting depth of grapevines is a proper method for managing demand-oriented irrigation. In this regard, soil water content measurements were studied in order to gain better information about the root water uptake of young grapevines. The data originate from two research sites – vineyards during their first two years after planting – in the East of Austria. Capacitance sensors measured the soil water content in different depths. Each sensor has a vertical measuring range of about 10 cm. Hence, the summed sensor readings illustrate the water changes within a defined soil profile. In selected dry periods in the year after planting, a root water uptake over the entire measuring profile, 100 cm and 70 cm for each respective study site, could be determined. It can be deduced that young grapevines can withdraw soil water from depths of more than 1 m – depending on soil and weather conditions!

*Keywords:* vineyard, irrigation, soil water content, water balance, capacitance/FDR sensors

## Einleitung

Weinreben zählen zu den Pflanzen mit der höchsten Trockenresistenz, vor allem wegen ihres tief reichenden Wurzelsystems. Andererseits ist eine ausreichende Wasserversorgung die Voraussetzung für die Produktion von Weintrauben mit konstant hoher Qualität. Junge Reben bilden die Basis für die weitere Entwicklung eines Weingartens und sollten dementsprechend gut mit Wasser und Nährstoffen versorgt werden. In Bezug auf eine optimale Wasserversorgung existieren zahlreiche Möglichkeiten, wie die Bewässerung gesteuert werden kann. Eine Möglichkeit ist die Bilanzierung des Bodenwasseranteils in der Wurzelzone, wobei dafür für ausgewachsene Weinreben in der Regel Tiefen von 1-2 m angenommen werden (Mc-CARTHY et al. 2002, WAMPLE und SMITHYMAN 2002, WILLIAMS und AYARS 2005). Die Bilanzierung selbst kann unter anderem mittels Bodenwasserhaushaltsmodellen, oder mittels Bodenwasseranteilmessungen erfolgen. Daten von kontinuierlichen Messungen des Bodenwasseranteils

auf zwei Wein-Versuchsflächen wurden herangezogen, um Informationen über die Wasseraufnahme junger Weinreben im Jahr nach ihrer Pflanzung zu erhalten und daraus Rückschlüsse auf einen aktuell laufenden Versuch ziehen zu können.

## Material und Methoden

Ein Datensatz stammt von einem kleinen Weingarten im Versuchsobstbau der Universität für Bodenkultur (BOKU) in Wien Jedlersdorf (JD), am nordöstlichen Stadtrand. Die Reben (Gutedel; Tafeltraube) wurden 2006 gepflanzt. Der Boden ist in der Tiefe sehr homogen, die Korngrößenanalyse ergab sandigen Lehm (Sand 31 %, Schluff 53 %, Ton 17 %) ohne Grobkornanteil und mit 2,5 % Humus. Der zweite Datensatz stammt von einem Weingarten in Andau (AN), im östlichsten Teil des Burgenlandes, nahe der Grenze zu Ungarn. Der Weingarten wurde 2010 zur Qualitätsweinproduktion (Chardonnay) angelegt. Die Bodenart ist sandiger Lehm (41 % Sand, 38 % Schluff, 21 % Ton) mit einem ge-

<sup>1</sup> Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft, Universität für Bodenkultur, Wien, Muthgasse 18, A-1190 WIEN

\* Ansprechpartner: DI Reinhard Nolz, reinhard.nolz@boku.ac.at

Tabelle 1: Bodencharakteristiken und bodenhydraulische Eigenschaften beider Standorte

	Sand	Schluff	Ton	Grobkorn	Humus	FK	WP
Jedlersdorf	31 %	53 %	17 %	0 %	2,5 %	28,8 %	11,6 %
Andau	41 %	38 %	21 %	5 %	2,0 %	27,4 %	13,2 %

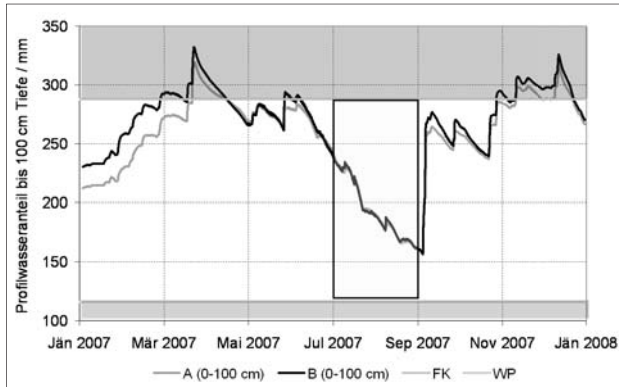


Abbildung 1: Weingarten Jedlersdorf; Profilwasseranteil bei FDR-Messungen (Messstellen A und B) bis 100 cm Tiefe, sowie mittels Pedotransferfunktion abgeschätzte Werte für Feldkapazität (FK) und Welkepunkt (WP)

schätzten Grobkornanteil von 5 % und einem Humusanteil von 2 % in den oberen Schichten.

An beiden Standorten wurden EnviroSCAN® Sensoren der australischen Firma Sentek Pty Ltd zur Messung des Bodenwasseranteils installiert. Diese Sensoren haben sich in der Praxis der Bewässerungssteuerung vielfach bewährt (CEPUDER und NOLZ 2007). Mehrere Sensoren wurden auf einem Sensorträger montiert und in ein zuvor eingebautes Kunststoffrohr abgesenkt. Jeder Sensor misst mit Hilfe eines elektromagnetischen Feldes den Wasseranteil im umgebenden Boden. Um die notwendigen Umrechnungsfaktoren zu erhalten, wurde jeder Sensor normalisiert (Messung in Luft und Wasser). Als Kalibrierfunktion wurde die Sentek Standardkalibrierung (Sentek EnviroSCAN® Default) für Sand/Lehm/schluffigen Lehm verwendet (PALTINEANU und STARR 1997). Durch die Anordnungen der Sensoren im Abstand von 10 cm – was in etwa dem vertikalen Messbereich entspricht – kann je nach Anzahl der Sensoren der Wasseranteil in einem Bodenprofil gewünschter Tiefe gemessen werden. In Jedlersdorf wurden zwei Sonden (A und B) mit je 10 Sensoren installiert (1 m Bodenprofil), in Andau wurde eine Sonde mit 8 Sensoren installiert, wobei der unterste Sensor defekt war und deshalb nur 7 Sensoren (70 cm Bodenprofil) verwendet werden konnten.

Feldkapazität (FK) und Welkepunkt (WP) stellen die obere und untere Grenze des pflanzenverfügbaren Bodenwassers dar und bilden die Basis für gängige Ansätze zur Bewässerungssteuerung (DOORENBOS und PRUITT 1977, DOORENBOS et al. 1979). Beide Parameter sind als Bodenwasseranteil bei einem bestimmten Matrixpotential definiert; es sind jedoch theoretische, schwer erfassbare Größen. Um dennoch eine Vergleichsbasis zwischen den beiden Standorten zu haben, wurden FK und WP mittels Pedotransferfunktionen nach BAUMER (1989) abgeschätzt. Als Eingangsparameter diente neben den bereits erwähnten

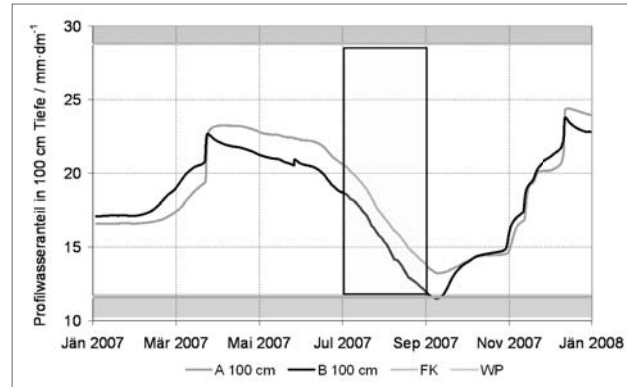


Abbildung 2: Weingarten Jedlersdorf; Wasseranteil beider FDR-Messungen (Messstellen A und B) in 100 cm Tiefe (tiefer Sensor), sowie mittels Pedotransferfunktion abgeschätzte Werte für Feldkapazität (FK) und Welkepunkt (WP)

Bodeneigenschaften auch die Tonaktivität, welche sich aus dem Anteil der anorganischen Kationenaustauschkapazität an der gesamten Kationenaustauschkapazität multipliziert mit dem Tongehalt ergibt. Für den Standort Jedlersdorf wurde von TULLER (1996) der Wert 0,45 ermittelt, für Andau wurde entsprechend dem höheren Tongehalt 0,50 angesetzt, was einem durchschnittlichen Wert entspricht. Entsprechend den gemessenen Trockendichten wurde für die Berechnung ein „Compaction Factor“ 3 gewählt (TULLER 1996).

## Ergebnisse und Diskussion

Die Bodencharakteristiken und die daraus ermittelten bodenhydraulischen Eigenschaften sind in *Tabelle 1* zusammengefasst.

Daraus errechnen sich für den Profilwasseranteil in Jedlersdorf (bis 100 cm Tiefe) 288 mm für die FK und 116 mm für den WP (*Abbildung 1*). Für Andau (bis 70 cm Tiefe) ergeben sich dementsprechend 192 mm und 93 mm (*Abbildung 3*).

Für die Interpretation der kontinuierlichen Wasseranteilmessungen wurde jeweils eine trockene Periode im Jahr nach der Pflanzung herangezogen. Aufgrund von Temperatureinflüssen wiesen beide Zeitreihen einen wellenförmigen Verlauf mit dem Maximum in der Nacht sowie dem Minimum am Tag auf. Die typische Treppenfunktion, welche Messreihen derartiger Sensoren normalerweise zeigen (SENTEK 2001), war leider nicht erkennbar. Aus diesem Grund konnten auch keine Tagesbilanzen der Verdunstung erstellt werden.

*Abbildung 1* zeigt den Verlauf des Profilwasseranteils im Weingarten Jedlersdorf im Jahr nach der Pflanzung. Von Juli bis September trat eine trockene Periode mit sinkendem Bodenwasseranteil auf. Während dieser Periode fand in allen Tiefen ein Wasserentzug durch die Wurzeln

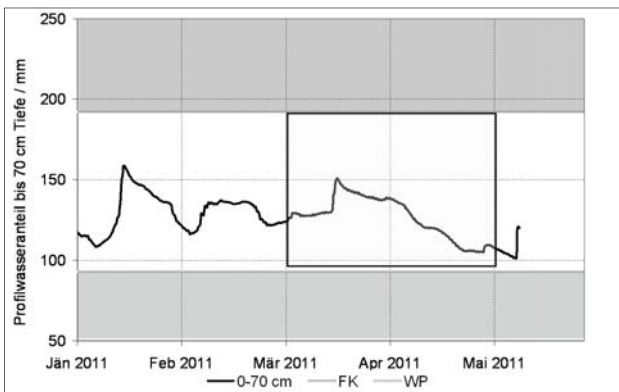


Abbildung 3: Weingarten Andau; Profilwasseranteil der FDR-Messung bis 70 cm Tiefe, sowie mittels Pedotransferfunktion abgeschätzte Werte für Feldkapazität (FK) und Welkepunkt (WP)

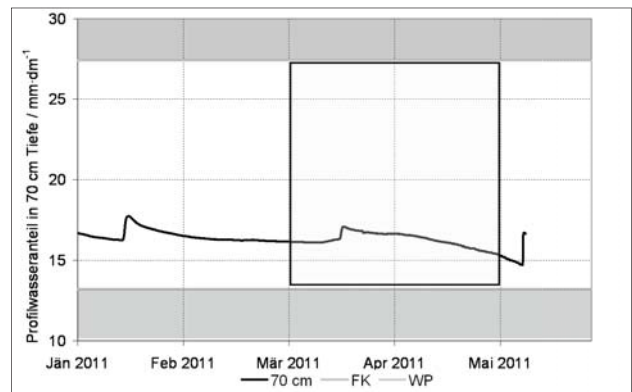


Abbildung 4: Weingarten Andau; Wasseranteil der FDR-Messung in 70 cm Tiefe (tiefster Sensor), sowie mittels Pedotransferfunktion abgeschätzte Werte für Feldkapazität (FK) und Welkepunkt (WP)

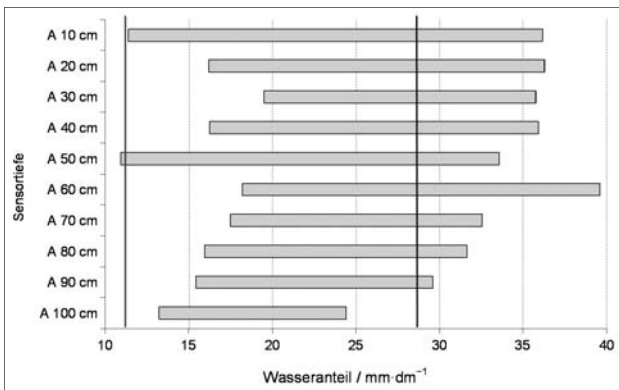


Abbildung 5: Weingarten Jedlersdorf; Schwankungsbereich der Wasseranteilmessungen in 10 Tiefen, sowie mittels Pedotransferfunktion abgeschätzte Werte für Feldkapazität und Welkepunkt; 2007, Messstelle A

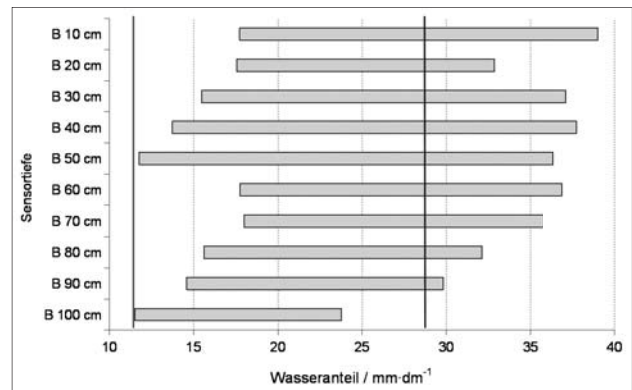


Abbildung 6: Weingarten Jedlersdorf; Schwankungsbereich der Wasseranteilmessungen in 10 Tiefen, sowie mittels Pedotransferfunktion abgeschätzte Werte für Feldkapazität und Welkepunkt; 2007, Messstelle B

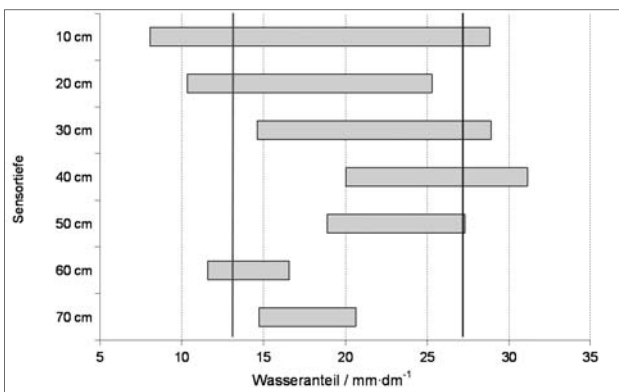


Abbildung 7: Weingarten Andau; Schwankungsbereich der Wasseranteilmessungen in 7 Tiefen; Juli 2010 bis Mai 2011

statt, selbst der unterste Sensor in 1 m Tiefe zeigte einen deutlichen Abfall des Wasseranteils (Abbildung 2). Daraus lässt sich ableiten, dass in Bezug auf die Wasserentnahme bzw. die Wassernachlieferung auch noch tiefere Schichten betroffen waren.

Die Wasseranteilmessungen im Weingarten Andau zeigen ein ähnliches Bild (Abbildung 3). Da die aktuellen Messun-

gen nur bis Mai reichen, wurde eine trockene Periode am Anfang des Jahres gewählt. Es ist eine Wasseraufnahme bis in 70 cm Tiefe ablesbar, wenngleich aufgrund der geringeren Verdunstungsraten weniger ausgeprägt (Abbildung 4).

Die Schwankungsbereiche der Wasseranteilmessungen in Jedlersdorf lassen ebenfalls auf eine Wasserentnahme in allen Tiefen schließen (Abbildung 5 und Abbildung 6).

Abbildung 7 zeigt die Wasseranteilsschwankungen in 7 Tiefen am Standort Andau über die gesamte Messperiode – Juli 2010 bis Mai 2011. Da diese Periode auch das erste Jahr der Rebenentwicklung umfasst sind die Schwankungsbereiche naturgemäß geringer, vor allem in Tiefen unter 40 cm. Daraus kann geschlossen werden, dass die Wasseraufnahme von neugepflanzten Weinreben verstärkt in den oberen Bodenschichten (bis etwa 50 cm Tiefe) erfolgt. Dies ist natürlich stark von den Boden- sowie den Witterungsverhältnissen abhängig.

### Schlussfolgerungen

Zur Bilanzierung des Wasseranteils in einem Bodenprofil ist es notwendig, eine bestimmte Grenztiefe – etwa die effektive Wurzelzone – zu kennen. Im Falle der untersuchten Weinreben zeigten die Bodenwassermessungen,

dass junge Pflanzen bereits ein Jahr nach ihrer Pflanzung Bodenschichten von mehr als 1 m Tiefe für die Wasseraufnahme nutzen können. Bodenwasseranteilssensoren sind zwar gut interpretierbar, liefern aber keine Aussagen über die Wasserbewegung im Boden. Zur Absicherung der Ergebnisse wären Messungen des Matrixpotentials in tieferen Schichten notwendig, um eventuell auftretende Tiefensickerung bzw. Kapillaraufstieg zu erfassen. Es wäre auch vorteilhaft, den Bodenwasseranteil über größere Profiltiefen zu erfassen. Zur Kontrolle sollte der Bodenwasserhaushalt in den analysierten trockenen Perioden basierend auf der berechneten Referenzverdunstung bilanziert werden.

## Literatur

- BAUMER, O.W., 1989: Predicting Unsaturated Hydraulic Parameters. In: van Genuchten, M., Th. und F.J. Leij. Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils. Proceedings of the International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils, Riverside, California, October 11-13.
- CEPUDER, P. and R. NOLZ, 2007: Irrigation management by means of soil moisture sensor technologies. In: Polish Academy of Science, Committee for Land Reclamation and Environmental Engineering in Agriculture, Journal of Water and Land Development 11, 79-90; Wyda Wnictwo Imuz, Poland.
- DOORENBOS, J. and W.O. PRUITT, 1977: Guidelines for predicting crop water requirements. In: FAO Irrigation and Drainage Paper 24 / Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome (Italy).
- DOORENBOS, J., A.H. KASSAM, C.L.M. BENTVELSEN, V. BRANSCHEID and J.M.G.A. PLUSJE, 1979: Yield response to water. In: FAO Irrigation and Drainage Paper 33 / Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome (Italy). Land and Water Development Div., 1979, 200 p.
- McCARTHY, M.G., B.R. LOVEYS, P.R. DRY and M. STOLL, 2002: Regulated deficit irrigation and partial rootzone drying as irrigation management techniques for grapevines. In: Water Reports 22. Deficit irrigation practices. ISBN 92-5-104768-5. Rome.
- PALTINEANU, I.C. and J.L. STARR, 1997: Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: Laboratory calibration. Soil Sci. Soc. Am. J. 61:1576-85.
- SENTEK, 2001: Calibration of Sentek Pty Ltd Soil Moisture Sensors.
- TULLER, M., 1996: Stickstoffumsetzung und -verlagerung im Boden einer bewässerten Obstanlage im Hinblick auf Grundwasserschutz. Dissertation, Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft; Universität für Bodenkultur Wien.
- WAMPLE, R.L. and R. SMITHYMAN, 2002: Regulated deficit irrigation as a water management strategy in Vitis vinifera production. In: Water Reports 22. Deficit irrigation practices. ISBN 92-5-104768-5. Rome.
- WILLIAMS, L. and J. AYARS, 2005: Grapevine water use and the crop coefficient are linear functions of the shaded area measured beneath the canopy. Agric. Forest Meteor. 132(3-4): 201-211.

# Einfluss des Wurzelsystems auf den Bodenwasserhaushalt ackerbaulich genutzter Flächen

Peter Scholl<sup>1,2,\*</sup>, Gernot Bodner<sup>1</sup>, Andreas Schwen<sup>2</sup>, Willibald Loiskandl<sup>2</sup> und Hans-Peter Kaul<sup>1</sup>

## Zusammenfassung

Mit dem Ziel, den Einfluss des Wurzelsystems verschiedener Zwischenfrüchte auf den Bodenwasserhaushalt und Bodenstrukturveränderungen auf landwirtschaftlichen Kulturflächen im nahgesättigten Bereich der Makroporen zu charakterisieren, wurden seit Beginn der Vegetationsperiode 2009/10 mehrmals jährlich Tensionsinfiltrationsmessungen auf einem Versuchsfeld in Raasdorf/ Groß Enzersdorf durchgeführt. Basierend auf diesen Messungen lassen sich jeweils die ungesättigte Leitfähigkeit sowie verschiedene Porenparameter (flussgewichteter Porenradius, Makroporosität) berechnen. Da die bisherigen Messergebnisse auf den Zwischenfruchtvarianten Senf, Roggen und Brache keiner statistischen Signifikanz unterliegen, beschränkt sich die Darstellung der Ergebnisse auf die ungesättigte Leitfähigkeit im zeitlichen Verlauf. Um den Einfluss der räumlichen Variabilität auf Tensionsinfiltrationsmessdaten in Zukunft besser charakterisieren zu können, sind gezielte Messungen vorgesehen.

*Schlagwörter:* Wurzel, Bodenwasser, Zwischenfrucht

## Summary

With the objective to assess the impact of the root system of different cover crops on the soil water budget and soil structure changes, especially for the range of macro pores, several tension infiltration measurements per year are performed on an experimental field site in Raasdorf/ Groß Enzersdorf since the beginning of the vegetation period 2009/10. Based on these data the unsaturated conductivity and different pore parameters (flow-weighted pore radius  $R_0$ , macroporosity  $\epsilon$ ) can be derived. As the present results show no significant differences between the three cover crop variants only the data for the unsaturated conductivity are presented in their temporal course. In order to characterize the impact of spatial heterogeneity on tension infiltration data specific measurements are previewed.

## Einleitung

Der Wasserhaushalt unserer Böden unterliegt einer Vielzahl von Einflüssen, welche unter anderem durch das Wurzelsystem einer Pflanze bestimmt werden. Bodenstruktur und Porosität werden in ihrer Ausprägung wesentlich durch das Wurzelsystem beeinflusst. Besonders bei den in jüngster Zeit vermehrt auftretenden Starkregenereignissen sind große, tief dränende Poren von entscheidender Bedeutung, um die einwirkenden Wassermengen schnell und effizient in den Boden abzuleiten und so den Oberflächenabfluss zu reduzieren. Andererseits ist ausschließlich das bei einem Niederschlag in den Boden infiltrierte Wasser für die Pflanzenversorgung und somit Ertragssicherung relevant. Vor diesem Hintergrund steht das Ziel dieser Arbeit, die Bedeutung des Wurzelsystems auf den Bodenwasserhaushalt zu charakterisieren und Bodenstrukturveränderungen auf landwirtschaftlichen Kulturflächen abzuschätzen.

## Material und Methoden

Im vorliegenden Beitrag werden Ergebnisse von Tensionsinfiltrationsmessungen an der Versuchswirtschaft Groß-Enzersdorf aus zwei aufeinanderfolgenden Vegetationspe-

rioden (2009/10 und 2010/11) präsentiert. Diese werden zur Erfassung des Einflusses unterschiedlicher Wurzelsysteme auf die bodenhydraulischen Eigenschaften, speziell im nahgesättigten Bereich der Makroporen, herangezogen. Unterschiedliche Eigenschaften können unter anderem durch die hydraulische Leitfähigkeit, den flussgewichteten Porenradius und die Makroporosität charakterisiert und dargestellt werden. Der Boden am Versuchsstandort ist ein Tschernosem auf schottrigem Untergrund mit der Bodenart schluffiger Lehm (23% S, 57% U und 20% T). Eine Direktsaat-Parzelle eines Langzeit-Bodenbearbeitungsversuchs (> 10 Jahre) wird jährlich mit zwei unterschiedlichen Zwischenfrüchten in jeweils dreifacher Wiederholung begrünt. Der mit Grünroggen, als ein Vertreter aus der Familie der *Gramineae*, und Senf (*Brassicaceae*) bestellten Varianten wird eine Brachewirtschaft zur Vergleichbarkeit gegenübergestellt. Auf dem Feldversuch wird der Bodenwasseranteil kontinuierlich über kapazitive CProbe-Sonden ermittelt.

Während des Vegetationsverlaufs wurden an fünf (2009/10) bzw. vier (2010/11) Terminen Messungen mittels Tensionsinfiltrationsmeter (*Abbildung 2*) durchgeführt. Das Infiltrationsverhalten wurde dabei bei vier Wasserspannungsstufen

<sup>1</sup> Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Universität für Bodenkultur Wien, Gregor-Mendel-Straße 33, A-1180 WIEN

<sup>2</sup> Institut für Hydraulik und Landeskulturelle Wasserwirtschaft, Universität für Bodenkultur Wien, Muthgasse 18, A-1190 WIEN

\* Ansprechpartner: DI Peter Scholl, peter.scholl@boku.ac.at



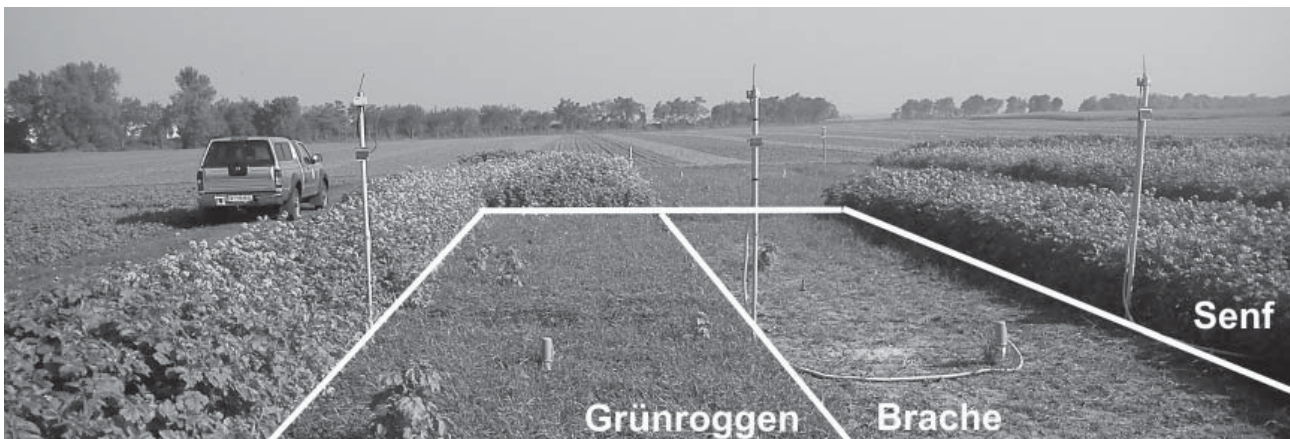


Abbildung 1: Feldversuch Raasdorf / Groß Enzersdorf, November 2010.

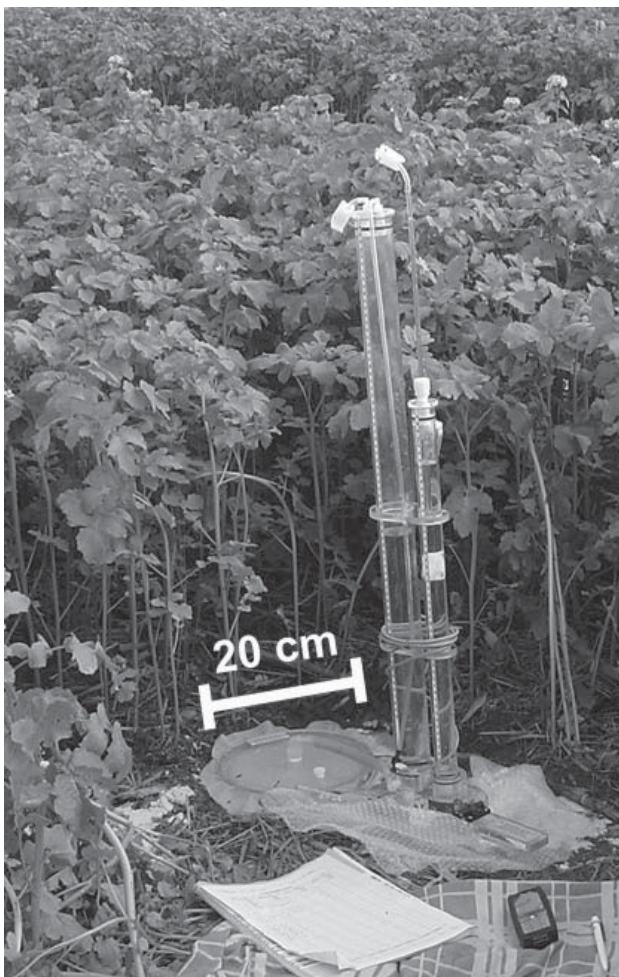


Abbildung 2: Tensionsinfiltrrometer

(-10 cm, -4 cm, -1 cm, 0 cm) erhoben (REYNOLDS 1991). Im Anschluss daran erfolgte die Bestimmung der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit ( $K_h$ ) durch die Wooding-Methode (WOODING 1968). Die statistische Auswertung aller Daten erfolgte mittels Varianzanalyse mit der Prozedur PROC MIXED des Statistikpakets SAS und anschließendem Mittelwertvergleich (PIEPHO et al. 2004).

## Ergebnisse und Diskussion

Nachfolgend wird eine Auswahl der bisher gewonnenen Daten im Vegetationsverlauf präsentiert. So ist im oberen Teil der *Abbildung 3* die Bodentemperatur in 5 cm Tiefe dargestellt. Diese wurde kontinuierlich in allen Wiederholungen mittels spezieller, autark arbeitender Bodentempersensoren (Watch Dog Button) aufgezeichnet. Der Verlauf der erhobenen Werte zeugt von einer rascheren Reaktion (Erwärmung, Abkühlung) der Variante Brache auf sich ändernde Lufttemperaturen gegenüber den Zwischenfrucht-Varianten. Dieser Umstand begünstigt vor allem unter kurzfristig wechselnden Temperaturbedingungen die Entstehung von Schrumpfrissen, welche sich wiederum strukturwirksam auf den Boden und dessen hydraulische Eigenschaften auswirken. Zusätzlich zeigt die *Abbildung 3* Tagesniederschlagssummen. Jedoch mussten aufgrund eines Defektes der Wetterstation die Niederschlagsdaten für den hydraulisch besonders interessanten Zeitraum April bis August 2010 als unplausibel eingestuft und auf deren Darstellung verzichtet werden.

Im unteren Teil der *Abbildung 3* ist die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit für die Tensionsstufen  $t = -2,5$  cm;  $-0,5$  cm;  $0$  cm für sämtliche Beprobungstermine dargestellt (September 2009 bis April 2011). Auf eine Präsentation der übrigen Tensionsstufen ( $t = -7$  cm;  $-10$  cm) wird an dieser Stelle zu Gunsten der Übersichtlichkeit verzichtet. Für die jeweiligen Beprobungstermine zeigt sich für sämtliche Tensionsstufen weitgehend der selbe Trend, wobei die Absolutwerte für  $K_h$  mit zunehmender Wasserspannung für  $K_h$ -Werte während der Zwischenfrucht 2009/10 nach Winterweizen insgesamt niedriger ausgefallen sind, als bei Durum bzw. der anschließend angebauten Zwischenfrucht (2010/11).

Der Vergleich der Varianten Brache, Senf und Roggen untereinander ergibt für die verschiedenen Termine ein uneinheitliches Bild. Es konnten keine statistisch signifikanten variantenbedingten Unterschiede ( $\alpha = 0,05$ ) der ermittelten Leitfähigkeiten ( $K_h$ ) nachgewiesen werden. Somit muss festgehalten werden, dass die aktuelle Datengrundlage keine eindeutigen Schlussfolgerungen zulässt.

Die statistische Absicherung ist ein generelles Problem vieler in situ Messungen, da es speziell unter Feldbedin-

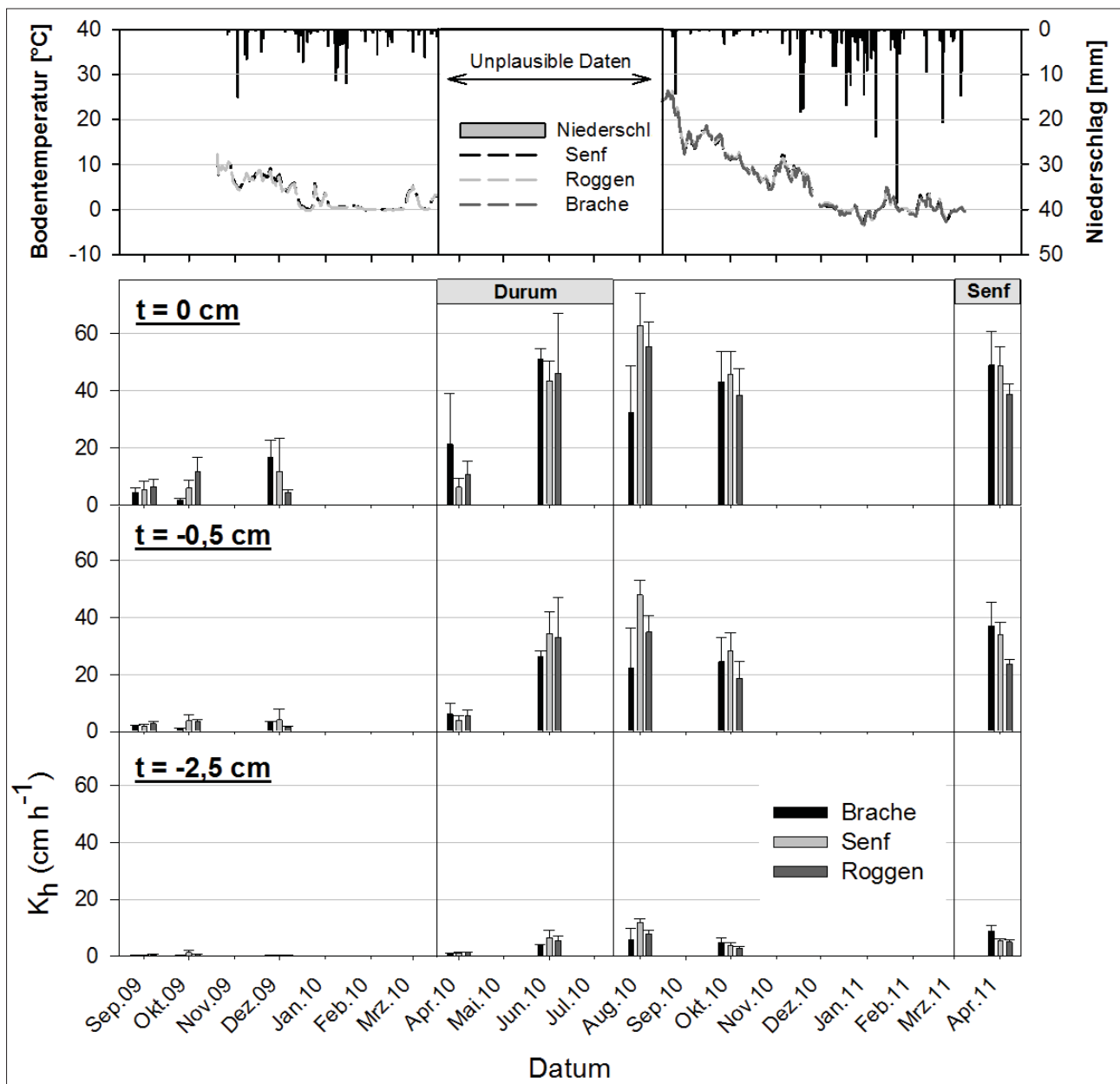


Abbildung 3: Übersicht über die ermittelten hydraulischen Leitfähigkeiten ( $K_h$ ) der Zwischenfrucht-Varianten Senf und Grünroggen sowie der Brache-Vergleichsflächen bei unterschiedlichen Tensionsstufen ( $t$ ), Vegetationszeitraum September 2009 bis April 2011, VF 2009: Winterweizen; HF 2010: Durum; HF 2011: Senf. Ebenfalls angeführt als Tagesmittelwerte: Niederschlagsmengen [mm] und Bodentemperatur [°C], gemessen in 5 cm Bodentiefe.

gungen zur Überlagerung von Effekten kommen kann, deren exakte Quantifizierung schwierig bis unmöglich ist. Bei den vorliegenden Tensionsinfiltrationsmessdaten ist davon auszugehen, dass sich der als eher schwach ausgeprägt einzuschätzende Faktor der Bodendurchwurzelung offenbar mit der verwendeten Infiltrationsscheibe ( $d = 20$  cm) nur schwer identifizieren und differenzieren lässt. Einerseits unterliegen sämtliche Feldmessungen einer räumlichen Variabilität, andererseits ist die Variante Brache nicht völlig bewuchsfrei, sondern von Beikräutern und Ausfallgetreide besiedelt. Diese tragen naturgemäß ebenfalls zur Durchwurzelung und dadurch entsprechend zur Strukturveränderung des Bodens bei. Durch eine Erhö-

hung der Anzahl der Messungen je Parzelle ist zu erwarten, dass sich variantenbedingte Unterschiede eher statistisch absichern lassen. Zur Charakterisierung des Einflusses der räumlichen Variabilität auf Messdaten, welche mittels Tensionsinfiltrationsmeter erhoben wurden, sind in der näheren Zukunft gezielte Messungen geplant.

## Literatur

PIEPHO, H.P., A. BÜCHSE and C. RICHTER, 2004: A Mixed Modelling Approach for Randomized Experiments with Repeated Measures; Institut für Pflanzenbau und Grünland, Universität Hohenheim, Stuttgart, Germany. In: J. Agronomy & Crop Science 190, Blackwell Verlag, Berlin. 230-247.

REYNOLDS, W.D. and D.E. ELRIK, 1991: Determination of hydraulic conductivity using a tension infiltrometer. *Soil Sci Soc Am J* 55, 633-639.

WOODING, R.A., 1968: Steady infiltration from a shallow circular pond. *Water Resour. Res.* 4. 1259-1273. In: SMS, 2009: Soil Measurement

Systems, SMS (Handbuch der Herstellerfirma des Tensionsinfiltrometers); Tucson, USA. 12 - 13 und In: REYNOLDS, W.D., E.G. GREGORICH und W.E. CURNOE, 1994: Characterisation of water transmission properties in tilled and untilled soils using tension infiltrometers. In: *Soil & Tillage Research* 33, Elsevier. 118-120, 123-128.

# Root growth of turfgrass grown on amended sand-based profiles

Margarita L. Himmelbauer<sup>1\*</sup>, Ilse Kogelbauer<sup>1</sup> and Willibald Loiskandl<sup>1</sup>

## Zusammenfassung

Die Rasengräser gehören zu den flachwurzelnden Pflanzenarten und sind daher anfällig auf Dürreerscheinungen. Der Bodenwassermangel beeinflusst die Transpiration, das Pflanzenwachstum als auch die ästhetischen Eigenschaften der Rasengräser. Große Mengen an Bewässerungswasser werden eingebracht, um die Rasenqualität auf den Golfplätzen zu gewährleisten, da das übliche Golfgrünprofil aus reinem Sand besteht. Um die Bewässerungsmengen zu reduzieren, werden Unterflurbewässerungssysteme, die Wasser direkt zu den Pflanzenwurzeln transportieren und Bodenhilfsstoffe zur Erhöhung des Wasserspeichervermögens empfohlen. Dieser Beitrag stellt die Ergebnisse einer laufenden Studie dar, die eine Kombination von Unterflurbewässerung und einem Bodenhilfsstoff auf Tonmineralbasis erforscht. Zwei Modifikationen des konventionellen Grün-Profiles mittels Einbringung unterschiedlicher Anteile an Bodenhilfsstoffen zum Sand, wurden erprobt. Spezielle Boxen wurden konstruiert um die Wasserbewegung und das Wurzelwachstum im Profil zu beobachten und zu messen. Eine Mischung aus Grün-Rasengräser wurde in die Boxen eingepflanzt. Die Experimente untersuchen die kombinierten Effekte der Sandprofil-Modifikation und der Bewässerung auf die Wurzelentwicklung unter kontrollierten Bedingungen in einer Klimakammer.

*Schlagwörter:* Golfplatz, Wurzelzone, Rasengräser, Wurzelwachstum, Unterflurbewässerung

## Summary

Turfgrasses have shallow root systems and therefore are susceptible to droughts. Water deficiency affects transpiration, plant growth and visual quality of grasses. A large amount of irrigation water is spent for keeping turfgrass quality on golf courses since the common method of the putting green construction is with sands. In order to minimize water demands, soil amendments for increasing water retention capacity, and subsurface drip irrigation (SDI), which conveys water directly to the rooting zones, are recommended. This paper presents results of an ongoing study aiming to evaluate a performance of combination of a SDI system and a mineral amendment on clay mineral basis. Two modifications of the conventional green-profile using amendment mixtures with sand are examined. For this, special boxes, equipped with TDR and pressure probes, were constructed. A mixture of cool-season grass species was grown on them under controlled conditions in a climate chamber. The experiments were designed to study the combined effects of the modified golf green profiles and irrigation regimes on root and shoot development.

*Keywords:* golf courses, green rooting zone, turfgrass root growth, SDI irrigation

## Introduction

Golf courses are great consumers of irrigation water, especially during the seasonal peaks in summer. Turfgrasses for golf green areas generally have shallow root systems. For this reason, they are highly susceptible to soil water shortages. Permanent water deficiency affects visual quality (colour), rate of shoot and root growth, evapotranspiration demands, etc. At the same time, it has been reported that turfgrasses may tolerate certain levels of soil drought with insignificant quality failure. Drought resistant cultivars can overcome soil water shortage by either minimised transpiration needs via physiological adaptations or extending the root growth in moist soil regions (CARROW 2006, GITHINJI et al. 2009). For cool-season grasses with low mowing heights as on golf greens it was observed that the differences in water consumption are negligible (LEINAUER et al. 2004). Owing to a growing interest in water saving

measures in recreation areas including golf courses, the question of how to maintain good quality turfgrass cover applying less irrigation water rises.

Alternative water saving strategies offer advanced irrigation techniques along with more precise irrigation scheduling based on plant or soil water status measurements. Subsurface drip irrigation (SDI) is assumed to be a very efficient irrigation approach which conveys water directly to the roots. More over, the subsurface water application supports deep rooting. The extended rooting depth in turn ensures that turfgrasses are able to take water and nutrients from greater soil volume and thus helps the plants to resist soil surface droughts. Putting green profiles are usually constructed using coarse and medium size sands. The sands provide favourable conditions for root growth in terms of good aeration, enhanced hydraulic properties and drainage, etc. (BILELOW et al. 2004). On the other hand, they have low

<sup>1</sup> Institute of Hydraulics and Rural Water-Management, University of Natural Resources and Life Sciences Vienna (BOKU), Muthgasse 18, A-1190 WIEN

\* Ansprechpartner: DI Margarita Himmelbauer, margarita.himmelbauer@boku.ac.at

retention capabilities leading to water and nutrient leaching and subsequent stress for the grasses. Adding organic and inorganic soil amendments is a promising method of increasing plant available water capacity of the sands (WALTZ et al. 2003, LEINAUER and MAKK 2007, GITHINJI et al. 2009). At present, many inorganic soil amendments have been marketed, i.e. porous ceramics, diatomaceous earth, zeolites, clay minerals, etc. Combining the advantages of subsurface drip irrigation and soil amendments, irrigation water can be saved along with keeping the grass cover green.

The main objective of the ongoing study is to examine the multiple effects of inorganic amendment mixtures with sands and subsurface drip irrigation (SDI) on turfgrass growth and root development under different climate conditions.

## Materials and methods

An inorganic amendment on a clay mineral basis called Betasoil (Bt) was evaluated. First, a detailed study of soil physical characteristics of the amendment was carried out in order to determine optimal amendment-sand mixtures. Two mixtures of 2 % (Bt2) and 5 % (Bt5) amendment with sand (by mass) were selected with regard to the water storage and hydraulic properties as well as some economic aspects (SINAPSIS Interim report, 2010). The effect of Bt2 and Bt5 mixtures on plant and root growth was also tested in preliminary short-time tests with garden cress (*Lepidium sativum*). These tests are usually used to inspect germination of cress plants on growing substrates or waste materials for toxic effects. Following parameters were measured and compared to sand: germination, shoot and root production. Next, the amendment mixtures along with a SDI system were examined in specially constricted boxes in a climate

chamber. The boxes (50 x 55 x 6 cm) were made from hard plastic or PVC combined with clear acrylic (Plexiglass) front (Figure 1). The plexiglass face was covered with a removable black cloth to protect roots from light exposure. The sand green-profiles were constructed using sands over drainage gravel following the United State Golf Association instructions (USGA 1993). The drip irrigation tube was positioned 26 cm beneath the soil surface. The Bt2 and Bt5 mixtures incorporated in the soil layer adjacent to the irrigation emitter. The conventionally build putting green sand profile without amendment, i.e. Sd treatment, served as a control. Six boxes (two replications per treatment) were constructed for simultaneous observation of water movement, plant and root growth. The boxes were equipped with regularly spaced TDR and pressure probes to monitor changes in soil water content and in matric potential through the rooting zone. Sensor readings and boxes outflows collected in water tanks on weighing scales were recorded in 3-minute steps.

A turfgrasses mixture of Bentgrasses: Browntop bent (*Agrostis capillaris*) and Creeping bent (*Agrostis stolonifera*), and Fescues: Chewings fescue (*Festuca rubra commutata*) and Red fescue (*Festuca rubra trichophylla*), was grown on the boxes for a duration of 9 to 11 weeks. These cool-season grass species are widely used for golf green areas in Austria (FLL Richtlinien 2008). Sod pieces (ca. 2 cm dick) were collected from two-year old putting greens plot in a golf course near Linz. Sod's downside (roots) was washed free of soil before planting. Next, the sods were placed on the top of the preliminary saturated and drained for 3 days boxes, gently pressed and watered from above to facilitate the initial rooting. Controlled-release fertilizer (18N-24P-12K) was top dressed before the watering.

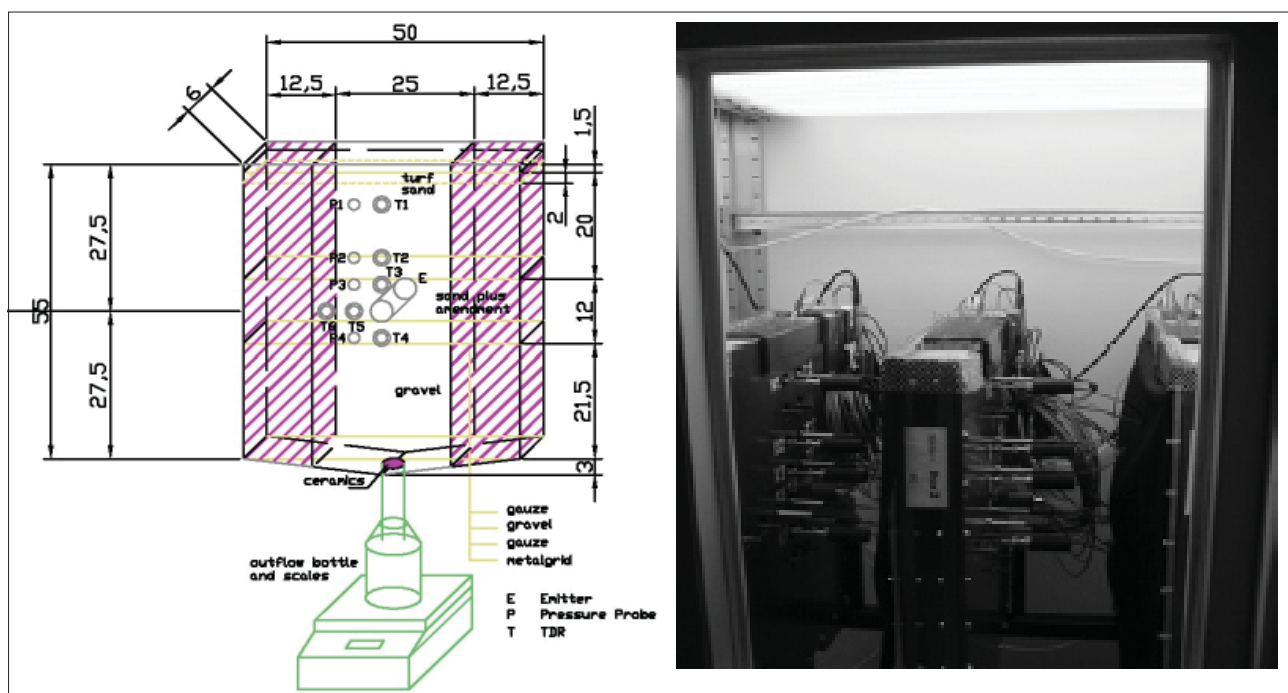


Figure 1: Experimental boxes scheme and in a climate chamber

The turfgrass boxes were irrigated based on the estimated potential turfgrass evapotranspiration (ET<sub>c</sub>). The well known method for the estimation of ET<sub>c</sub>, involving a calculation of the reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) and then applying a suitable crop coefficients (K<sub>c</sub>), was used in this study. The ET<sub>o</sub> was estimated on a basis of weather conditions of an study area near Linz, using Penman-Monteith equation (ALLEN et al. 1998). The weather parameters averaged for the last then seasons (i.e. irrigation periods) from May to September were used for a humid climate adaptation in the climate chamber (see below). The potential turfgrass ET<sub>c</sub> was calculated by multiplying the reference ET<sub>o</sub> with the proposed crop coefficient for cool-season turfgrasses of 0.8 (ALLEN et al. 1998, CARROW 2006). Three irrigation levels corresponding to 100 % (100 SDI, full irrigation), and deficit irrigations of 75 % (75 SDI), and 50 % (50 SDI) replacement of ET<sub>c</sub> are examined. The irrigation levels were first applied on a daily basis and then 3 times per weak, one after another. Irrigation water was pumped out from the underground tube at a rate of 1 l h<sup>-1</sup>, the water sums were controlled on a balance. Just after sod planting, the boxes were also watered from above to ensure turfgrass rooting into the test profiles, accounted as “rainfall events“. For the experiments under humid conditions presented here, the turfgrasses were grown with maximum/ minimum (day/night) temperatures of 24/15 °C and relative humidity of 56/80 % achieved gradually. The lights were turned on at 6 h and off at 20 h. The light regime was supplemented by metal halide lamps placed 0.5 m above the turf canopy. Photosynthetically active radiation (photosynthetic photon flux density) on a horizontal plane just above the canopy approximated 400 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>.

Turfgrass growth and visual quality were monitored. Turf was hand clipped weekly at 1.5 cm height; clippings are collected, dried (60 °C) and analyzed for N contents. In each experimental box, turfgrass color (color number) was determined by comparing the canopy and the clips with a RAL color chart. Root growth was examined at the end of the experiment. Rooting depth was controlled; root bulk samples were taken at different soil depths and analyzed for morphological parameters following HIMMELBAUER et al. (2004).

## Results and Discussion

An overview of the soil physical investigations based on the results of HAGER and HAMPL (2010) and SCHWEN and

GLASER (2010) are presented in *Table 1*. The amendment-sand mixtures Bt2 and Bt5 showed higher clay and silt content, but less sand fraction than the control Sd. Nevertheless, all materials were in a in the range of the USGA classification (1993). The results showed also that the amendment-sand mixtures retained more water and exhibited higher plant available water sums than the sand. Plant available water was defined as a difference between the permanent wilting point (WP), the water held at -1.5 kPa, and water at field capacity (FC) assumed to be -4 kPa here as proposed for sand root zones by BIGELOW et al. (2004). At the same time, the amendment-sand mixtures showed lower values of total and macro porosity compared to pure sands, but higher percentage for the capillary pores. All estimated porosity values followed the USGA recommendations (1993).

The results of the garden cress- tests are presented in *Figure 2*. Better shoot growth (germination, shoot biomass and height) was observed on the amended Bt2 and Bt5 mixtures than on the sand with equivalent investment in root length and mass growth. In general, the cress plants developed very well in all treatment.

The experimental results under humid conditions in the climate chamber showed that the amendment-sand mixtures considerably decreased water losses via drainage, while the preservation of water increased. The results for the water storage in the soil profile and soil water content distributions for the Sd, Bt2 and Bt5 treatments are presented in *Figure 3*. Soil water content measurements in the modified profiles were higher than in the controls in both the amended layer close to the emitter at 26 cm depth and in the upper non-amended 20 cm sand layers, containing the largest part of the roots. This trend was to be observed at the beginning as well as at the end of the experiment, though the high variability between the single replications (*Figure 3*). The control Sd treatment exhibited an initial water storage of 0.9 mm, which halved to 0.45 mm after 11 weeks experimental period. The initial water storage of the Bt2 treatment approximated 1.05 mm, decreasing to 0.62 and for the Bt5 treatment was 1.16 mm dropping to about 0.64 mm until the end of the experiment.

Plant available soil water (AW) is essential for plant and root growth. The plant available water capacity denotes the difference between the water at field capacity (FC) and the permanent wilting point (WP) water held at -1500 kPa. Classically the field capacity is defined as the water left in soil after the gravitational water has been drained and

**Table 1: Selected soil physical characteristics of sand and amendment-sand mixtures**

Variant	Particle size distribution					Field capacity (FC) 4kPa vol. %	Wilting point (WP) 1500kPa vol. %	Plant avail. water vol. %	Macro porosity vol. %	Total porosity vol. %
	Sand Coarse 2-0.63mm %	fractions Medium 0.63-0.2mm %	Fine 0.2-0.063mm %	Silt 0.063-0.002mm %	Clay <0.002mm %					
Sd	15.3	68.0	12.3	4.4	0.0	12.2	3.0	9.2	29.7	41.9
Bt2	14.7	55.7	23.1	6.0	0.5	15.9	4.1	11.8	24.8	40.7
Bt5	28.5	50.9	10.0	6.9	3.6	18.3	5.0	13.3	22.8	41.1

Sd- Sand; Bt2 and Bt5 are amendment- sand mixtures corresponding to 2% and 5% percentage of amendment by mass

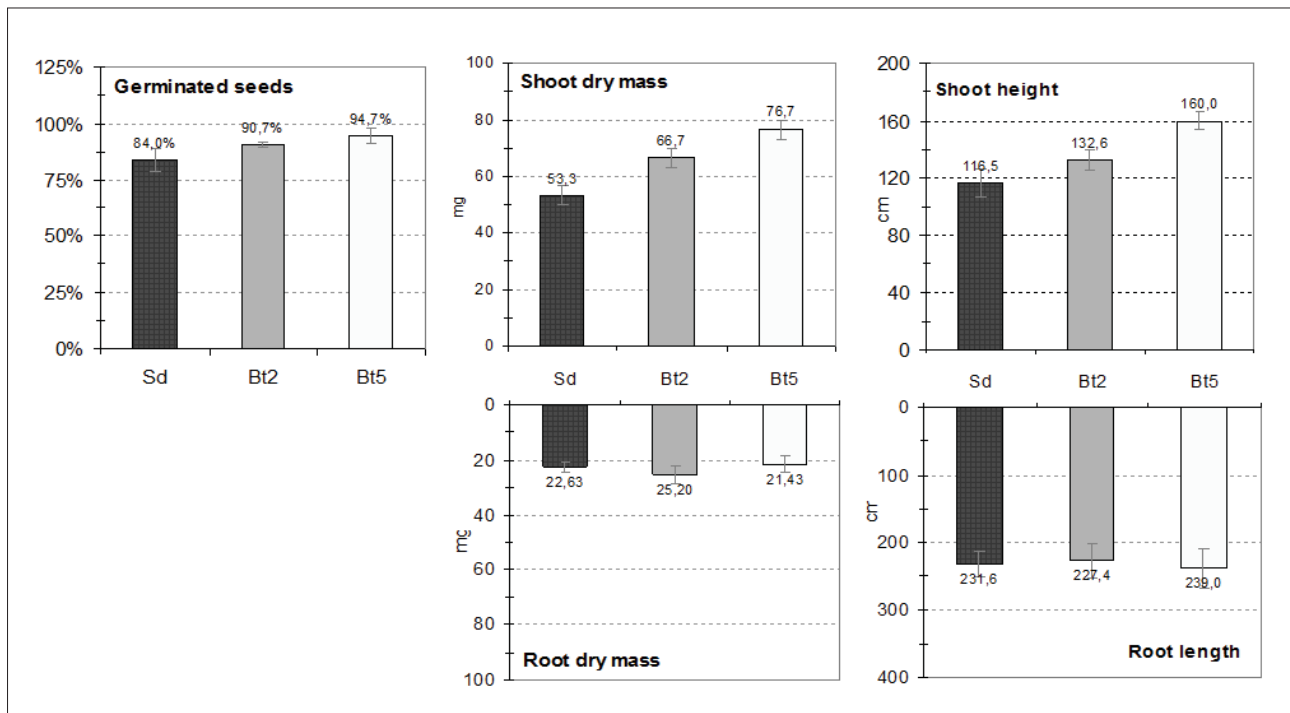


Figure 2: Results of the garden cress test. Sd is sand; Bt2 and Bt5 are amendment- sand mixtures

a downward movement became insignificant. FC is most common associated with water content at a threshold matric potential of -10 kPa to -30 kPa. Some studies with inorganic amendment reported FC threshold matric potential of -4 to -30 kPa (e.g. BIGELOW et al. 2004, GITHINJI et al. 2009). For the boxes conditions, the FC threshold values were higher and approximating -2 kPa. Such readings were measured 3 days after the full saturation and drainage of the boxes. According to the retention curves, this corresponded to 20.2, 24.5 and 25.6 volumetric water contents for Sd, Bt2 and Bt5 treatments, respectively. Subsequent, the estimated water content at matric potential of -2 kPa was defined as a box field capacity (bFC in Figure 3, left hand site).

The plant available water in the 32 cm profile for each box was calculated. After 11 experimental weeks, the plant available water in the Sd boxes almost depleted, while the water reserves in Bt2 and Bt5 treatments dropped below 50 % of the available water (50AW). According to DOORENBOS et al. (1986), a threshold value used for irrigation timing called "onset of stress" is defined when 50 % of the available water remains. In the Sd and Bt2 treatments, the 50AW level is already reached at -5 kPa, while at this matric potential there is still 70 % of AW offered in the Bt5 treatment. For golf turfgrasses and sand root zones, BIGELOW et al. (2004) stated that even water content at -50 kPa should be considered as water unavailable for the plants, while after GITHINJI et al. (2010) this water is not easily but moderate plant available. After elf weeks of experiment, the unavailable water (uAW) reference level was approached only in the control Sd treatment (Figure 3). In summary, the amended (Bt2 and Bt5) profiles generally exhibited higher proportion of stored as well as of plant available water reserved over longer periods compared with the pure sand profile.

The actual turfgrass evapotranspiration (ETa) was estimated using a balance method as a difference between the daily water supply and the outflow, and changes in the volumetric water storage using TDR readings in each Box. The soil evaporation was assumed to be negligible, since the grass was well established keeping 100 % coverage of the box surface during the experiment. The results for the ETa weekly sums were calculated and compared with the potential ETc sums and the water supply, total and via SDI (Figure 4a). The actual evapotranspiration ETa' exceed the potential in the third week of the experiment (i.e. full irrigation), but decreased as soon as the irrigation rate was diminished, first in the Sd and Bt2 boxes (at 75SDI, 7th week) and later on in the Bt5 ones, but the variations between the replicates were high. At deficit irrigation of 50SDI (last two weeks), no significant differences were found either between the treatments or between the boxes. The shoot growth rate of the turfgrasses also diminished with the time. In one of the Bt2- boxes, the grassed grew even worse than in the controls, attributed also to the low shoot nitrogen content. The turfgrass growth rate on the Bt5-amended boxes was mostly higher. During the last week of experiment (50SDI) no treatment-related differences were any longer observed (Figure 4b). The decrease in the irrigation and in the ETa rates also resulted in a decrease in a turf quality, since a change in a turfgrass color was observed in all boxes as time progressed. Turfgrass color was determined weekly, color numbers were determined by comparing the canopy and the clips with a RAL color chart. The color number changed from dark (RAL 6010- Emerald green to RAL 6001- Grass green) to light green (RAL 6017- May green to RAL 6025- Fern green) in all treatments. As well known, the ETc reflects the climate conditions, while the crop coefficient represents the plant growth status on account of management and irrigation practices. In this study, the estimated crop

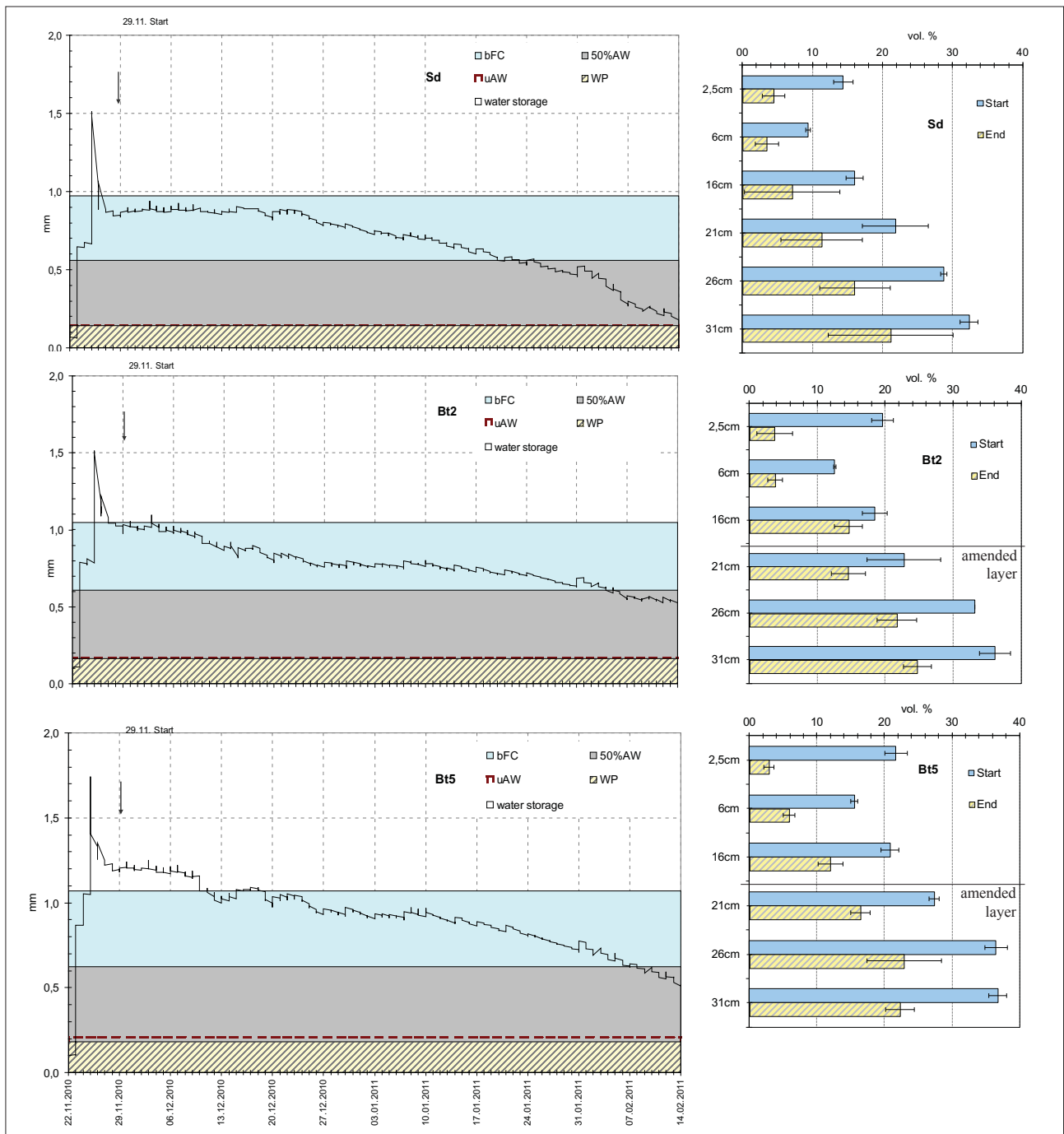


Figure 3: Changes in the water storage (left) and profile distributions of the water content at the beginning and the end of the experiment (right). Sd- control with sands, Bt2 and Bt5- treatments using amendment-sand mixtures with 2 % and 5 % amendment, respectively; bFC- “box Field Capacity“ matching an ascertain value of -2 kPa, 50%AW- half of the plant available water, uAW- water, at -50kPa defined as unavailable after BUGALOW et al. (2004),WP- permanent wilting point at -1500kPa.

coefficients for the first weeks (full irrigations) were mainly higher than the proposed value of 0.8 (ALLEN et al., 1998). Then after the  $K_c$  values dropped to 0.4 suggesting grass adaptations to drought conditions (Figure 4c). The highest values were calculated for the Bt5-boxes, with a maximum of 1.24, while the values for the Box1 (Sd) remained even below 0.8. The estimated transpiration efficiency was slightly higher for Sd and Bt5, with non-significant differences between the treatments.

Results of the root sampling at the end of the experiment showed that the roots in all boxes reached a depth of 20 cm (Figure 5). In the soil layers between 0 and 20cm depths were the largest fluctuations in the water content observed mainly owing to the root water uptake. In parallel to the cress tests results, the amended Bt2 and Bt5 boxes developed less roots (mass, length and surface density) with no significant differences between the treatments. In a view of the higher biomass production, this suggested higher root uptake ef-



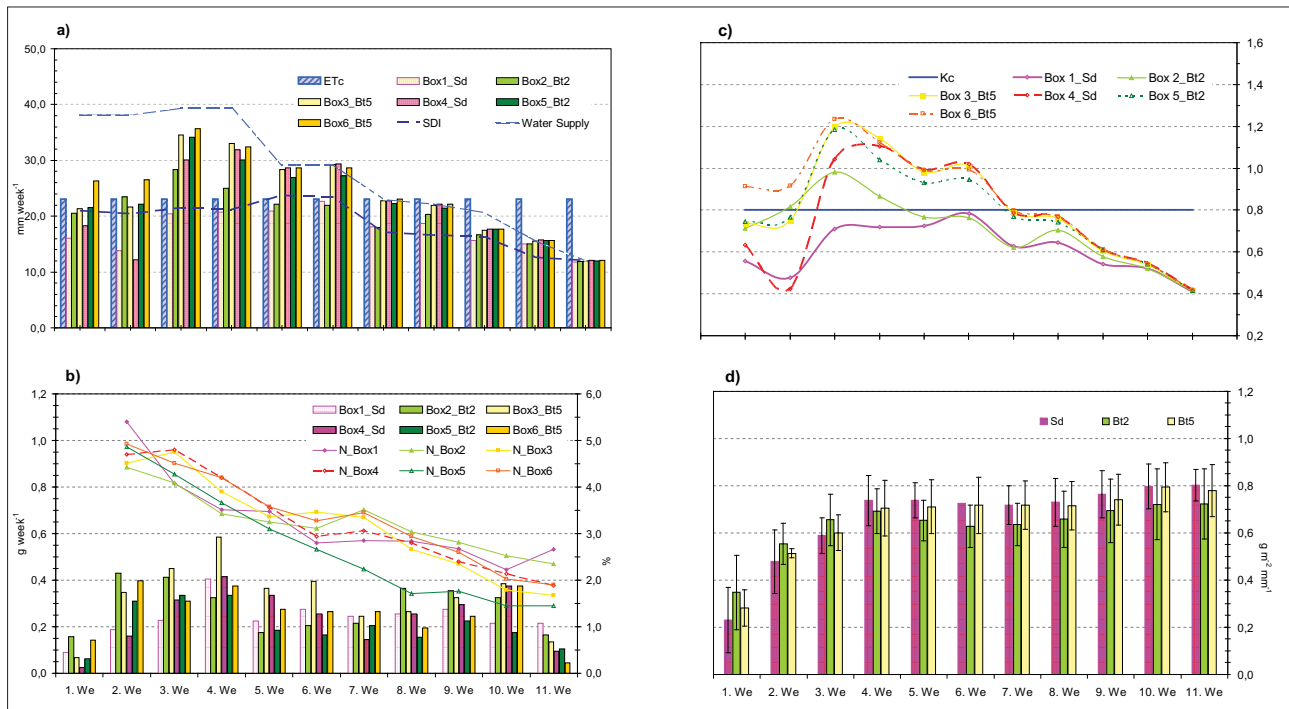


Figure 4: Comparison between a) potential crop evapotranspiration (ETc), actual evapotranspiration per box, subsurface drip irrigating (SDI) and total water supply; b) biomass growth rates and shoot nitrogen content per box; c) potential crop coefficients Kc and actual crop coefficients per box, and d) transpiration efficiency per treatment. The parameters are estimated on a weekly basis.

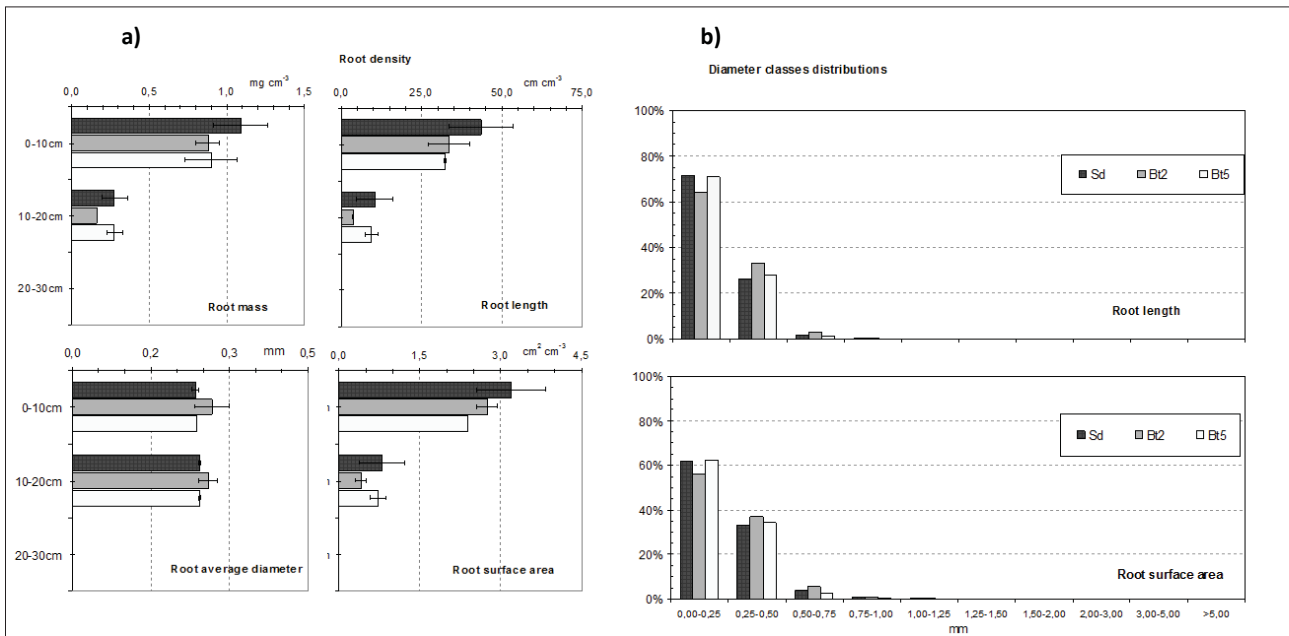


Figure 5: Result of root analyses at the end of the experiment of a) root densities and b) diameter classes distributions. Sd- control, Bt2 and Bt5- treatments using 2 % and 5 % amendment-sand mixtures, respectively.

iciency for water and nutrients. The profile distribution in the Bt5 amendment-sand mixture showed a slight shift in the root density to the deeper 10 to 20 cm depth, where 30 % of the roots developed, against 15 % and 25 % for the Bt2 and the Sd - treatments, respectively. Results for the average diameter and diameter classes distribution were comparable

for all boxes, with more than 95 % of the length and surface area thinner than 0.5 mm, i.e. very fine roots. In order to clarify to which extend the soil amendments and reduced irrigation rates can be introduced in the praxis, further experiments in climate chamber and in the field are in progress.

## Dedication

This is a collaboration study (Project SINAPSIS; PN 822826) with HYDRIP GmbH financed by the COIN Program of the Austrian Research Promotion Agency (FFG).

## References

- ALLEN, R.G., L.S. PEREIRA, D. RAES and M. SMITH, 1998: Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements." Irrigation and Drainage Paper 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- BASTUG, R. and D. BUYUKTAS, 2003: The effects of different irrigation levels applied in golf courses on some quality characteristics of turfgrass. *Irrigation Science*, 22: 87-93.
- BIGELOW, C.A., D.C. BOWMAN and K. CASSEL, 2004: Physical properties of three sand size classes amended with inorganic materials or sphagnum peat moss for putting green root zones. *Crop Science*, 44: 900-907.
- CARROW, R.N., 2006: Can we maintain turf to customers' satisfaction with less water? *Agricultural Water Management*, 80:117-131.
- DOORENBOS, J., A.H. KASSAM, C.L.M. BENTVELSEN, V. BRANSCHEID and J.M.G.A. PLUSJE, 1979: Yield response to water. In: *FAO Irrigation and Drainage Paper (FAO)*, no. 33 / FAO, Rome (Italy). Land and Water Development Div. 1979, 200 p.
- FLL Richtlinien für den Bau von Golfplätzen- Golfplatzbaurichtlinie, 2008.
- GITHINJI, L.J.M., J.H. DANE and R.H. WALKER, 2009: Water-use patterns of tall fescue and hybrid bluegrass cultivars subjected to ET-based irrigation scheduling. *Irrigation Science*, 27: 377-391.
- GITHINJI, L.J.M., J.H. DANE and R.H. WALKER, 2010: Physical and hydraulic properties of inorganic amendments and modeling their effects on water movement in sand-based root zones. *Irrigation Science*. DOI 10.1007/s00271-010-0218-4
- HAGER, M. und A. HAMPL, 2010: Untersuchungen zur Wirksamkeit von wasserspeichernden Bodenhilfsstoffen, Bakkalaureatsarbeit, Universität für Bodenkultur Wien.
- HIMMELBAUER, M., I. KOGELBAUER, A. SCHWEN, R. NOLZ and W. LOISKANDL, 2010: Sinapsis Project, Interim Report.
- HIMMELBAUER, M., W. LOISKANDL and F. KASTANEK, 2004: Estimating length, average diameter and surface area of roots using two different Image analyses systems. *Plant and Soil*, 260 (1-2), 111-120.
- HYDRIP GmbH (Information available at <http://hydrip.at/>)
- LEINAUER, B. and J. MAKK, 2007: Establishment of Golf Greens under Different Construction Types, Irrigation Systems, and Rootzones. In: J. Nus (Ed.): *United States Golf Association (USGA): Turfgrass and Environmental Research Online*, Vol. 6, Nr. 7, April 2007. ISSN 1541-0277.
- LEINAUER, B., R. SALLENAVE and H. SCHULZ, 2004: A comparison of construction types and their associated irrigation systems: Effect on turfgrass quality, drought avoidance, and irrigation water use. *Acta Horticulturae* 661 (Nov.): 123-129 (TGIF Record 101828).
- SCHWEN, A. und S. GLASER, 2010: Bericht über die Ergebnisse des Innovationsschecks 823535 zur Erforschung der Wirksamkeit von wasserspeichernden Bodenhilfsstoffen, Universität für Bodenkultur, HYDRIP GmbH, Wien, 1. Juni 2010.
- UNITED STATES GOLF ASSOCIATION, 1993: USGA recommendations for a method of putting green construction. *USGA Green Section. Agronomy Journal*, 52: 569-572.
- WALTZ, FC JR, V.L. QUISENBERRY and L.B. MCCARTY, 2003: Physical and hydraulic properties of root zone mixes amended with inorganics for golf putting green. *Agronomy Journal*, 95: 395-404.

# Reaktionen des Wurzelsystems auf bodenphysikalische Bedingungen

Margarita Himmelbauer<sup>1\*</sup>, Monika Sobotik<sup>2</sup> und Willibald Loiskandl<sup>1</sup>

## Zusammenfassung

Das Pflanzenwurzelwachstum wird von bodenphysikalischen Eigenschaften stark beeinflusst. Insbesondere der Eindringwiderstand, die Lagerungsdichte des Bodens, die Bodenstruktur und das Porensystem des Bodens wirken sich auf den Wachstumszustand und die räumliche Verteilung der Wurzeln im Boden aus. Dies wird besonders auf landwirtschaftlichen Flächen bei Bodenverdichtungen und anderen bodenphysikalischen Belastungen durch die Hemmung der Wasser- und Nährstoffaufnahme deutlich. Die Auswirkungen variieren je nach Pflanzenstadium, Alter und Lage der Wurzel, Bodenwasser- und Klimabedingungen. Die Ergebnisse zweier Fallstudien mit Mais, die unter verschiedenen Boden- und Klimabedingungen durchgeführt wurden, werden dargestellt. Das Klima in Andau, Ostösterreich ist kontinental bis semi-arid, während es in Surnevo, Südbulgarien kontinental bis mediterran ist. In beiden Fällen wurden unterschiedliche Bodenbearbeitungsmethoden auf ihren Einfluss einiger bodenphysikalischer Parameter wie Lagerungsdichte, Porengrößenverteilung und Bodenwasserkapazität untersucht. Die Wurzelsystementwicklung wurde sowohl an tiefen Bodenprofilen als auch durch Bohrkernuntersuchungen zur quantitativen Bewertung der Wurzelmorphologie durchgeführt. Eine quantitative Bewertung der Wurzelmorphologie wurde anhand der Bodenmonolithe durchgeführt. Die Ergebnisse werden in Bezug auf die wichtigsten bodenphysikalischen Parameter und der ortsspezifischen Bedingungen diskutiert.

*Schlagwörter:* Mais, bodenphysikalische Eigenschaften, Wurzelentwicklung, räumliche Wurzelverteilung und -morphologie

## Summary

Plant root growth is highly influenced by soil physical conditions. In particular, spatial distribution and morphology of roots are affected by penetration resistance, bulk density, structure, and pore system of soil. Root growth and uptake are often depressed by a combination of soil physical stresses in agricultural areas, mainly by soil compaction. The impact varies depending on the plant growth stage, root age and location, soil water and climate conditions, etc.

Results of two case studies with maize conducted under different soil and climate conditions in Andau, Eastern Austria and in Surnevo, South Bulgaria are presented. The climate in Andau is continental to semi-arid, while in Surnevo is continental-Mediterranean. In both cases, different soil management systems affecting a series of soil physical parameters such as bulk density, pore size distribution, soil water capacity have been compared. The root system development was evaluated on deep soil profiles as well as by taking bulk soil samples for detailed root morphological analyses. The results on maize root system response are discussed with respect to main soil physical parameters and for different site-specific conditions.

*Keywords:* maize, soil physical parameter, root development, distribution pattern and morphology

## Einleitung

Das Pflanzenwurzelwachstum steht in einem engen Zusammenhang mit bodenphysikalischen Eigenschaften. Insbesondere die räumliche Verteilung und die Morphologie der Wurzeln werden durch den Eindringwiderstand, die Lagerungsdichte, die Struktur und das Porensystem des Bodens und der Wasserverfügbarkeit beeinflusst. Es gibt eine Vielzahl von physiologischen und morphologischen Reaktionsmechanismen von der Zellebene (Sprossmeristem) bis zur Wurzelsystemebene, die in der Literatur erfasst wurden (z.B. TARDIEU et al. 1992, MARSCHNER 1995). Auf landwirtschaftlich genutzten Flächen wird oft die Entwicklung besonders durch verschiedene Funktionen

der Wasser- und Nährstoffaufnahme der Wurzeln durch verschiedene bodenphysikalische Eigenschaften geschwächt. Die Auswirkungen variieren je nach Pflanzenstadium, Wurzelalter und Standort sowie Bodenwasser- und Klimabedingungen.

Bodenverdichtungen, natürlich vorkommend oder als Folge der Bewirtschaftung, sind oft ein Problem auf landwirtschaftlichen Flächen. Dadurch verschlechtert sich vor allem die Bodenstruktur und die Makroporosität bzw. die Luftkapazität. In solchen Böden leiden angesichts des erhöhten mechanischen Eindringwiderstandes die Pflanzenwurzeln durch erschwerte Wasser-, Nährstoff- und Sauerstoffversorgung (HORN et al. 2000). Demzufolge

<sup>1</sup> Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft, Universität für Bodenkultur Wien (BOKU), Muthgasse 18, A-1190 WIEN

<sup>2</sup> Pflanzensoziologisches Institut Klagenfurt, Kempfstraße 12, A-9020 KLAGENFURT

\* Ansprechpartner: DI Margarita Himmelbauer, ml.himmelbauer@boku.ac.at

sind die Wurzelsysteme auch anfällig für Krankheiten. Eine Rekultivierung verdichteter Böden bietet die physikalische Bodenmelioration an, die durch Optimierung des Bodenwasser- und Bodenluftgehaltes eine Verbesserung anstrebt. Allerdings sind diese Maßnahmen kostspielig und die positiven Effekte sind zeitlich beschränkt.

Fortschrittliche landwirtschaftliche Maßnahmen wie etwa die bodenschonende Bewirtschaftung, die auf den Pflugeinsatz verzichtet und meist mit Direktsaat zusammengeführt wird, können bodenphysikalische Bedingungen positiv beeinflussen. Grund dafür liefern vor allem die positiven Auswirkungen auf die Ökologie des Bodens und die damit verbundene Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit, die Verminderung der Erosion sowie Kosten-, Energie- und Zeitersparnisse. Zu den Bodeneigenschaften, die mit einer verbesserten Bodenqualität gekoppelt sind, zählen Aggregatstabilität, erhöhte Wasserspeicherung, erhöhter Gehalt an organischen Substanzen, verbesserte hydraulische Eigenschaften, etc. Verbesserungen der Bodenqualität können die Entwicklung und die Funktionen der Wurzeln sowie die Pflanzenproduktivität begünstigen. Durch Minimierung der Bodenbearbeitung können höhere Erträge aufgrund der optimierten Nutzung von Bodenwasser und -nährstoffen gewonnen werden. Wurzelparameter wie Durchwurzelungstiefe, Wurzelichte und Wurzelmorphologie sind kritische Charakteristika in Bezug auf Wasser- und Nährstoffaufnahme sowie -verluste während und nach der Vegetationsperiode. Darüber hinaus spielt die räumliche Anordnung der Wurzeln im Boden für die Pflanzenernährung eine wesentliche Rolle (DROOGERS et al. 1997, AMATO und RITCHIE 2002).

Das Hauptziel dieser Studie war die Auswirkung verschiedener bodenphysikalischer Eigenschaften auf die Bewurzelungsweise, Wurzeltiefe, Wurzelichtverteilung und Morphologie von Mais an zwei Standorten bei unterschiedlichen Boden- und Klimaverhältnissen zu untersuchen und zu evaluieren. Ein weiteres Ziel war ein Vergleich der Auswirkung verschiedener Bodenbearbeitungssysteme und meliorative Maßnahmen auf die Wurzelentwicklung und die Produktivität der Kulturen.

## Material und Methoden

Zwei Fallstudien mit Mais (*Zea mays L.*) wurden durchgeführt, eine in Andau, Ostösterreich, und eine in Surnevo, Südbulgarien. Der Boden in Andau ist heterogener Tschernosem (FAO Bodenklassifikation), Subtyp Feuchtschwarzerde (Österreichische Bodenklassifikation) mit einem stark entwickelten humusreichen A-Horizont über Schotter. Das pannonische Klima bildet einen Übergang von semi-arid zum kontinental beeinflussten Klima mit kurzem Frühling, heißem Sommer, trockenem Herbst und relativ kaltem Winter.

Der Boden in Surnevo im thrakischen Tiefland ist als Dystric Planosol (FAO Bodenklassifikation) bezeichnet und verfügt über einen tiefen eluvial-illuvialen Bodenhorizont mit starker struktureller Differenzierung (BOYADGIEV 1994, DILKOVA et al. 1998). Das kontinentale mediterrane Klima ist durch milde Winter und heiße Sommer mit langen Trockenperioden gekennzeichnet. In beiden Fallstudien wurden verschiedene Bodenmanagementsysteme, die wesentliche

bodenphysikalische Eigenschaften beeinflussen, erforscht. In Andau, wurde eine konventionelle Bodenbearbeitung (KV) und eine pfluglose Bodenbearbeitung (DS) auf benachbarte Fläche mit Mais (Sorte PR37No1 Poncho) verglichen. Die DS-Fläche wurde seit über zehn Jahren pfluglos bewirtschaftet. Bei der konventionellen KV-Fläche wurden Wendepflug, Zweischichtenpflug und Schichtengrubber bis zu einer Bearbeitungstiefe von 25-30 cm eingesetzt. Eine Beobachtung des Wurzelverlaufs, der Wurzeltiefe und Seitenausdehnung wurde mittels Wurzelfreilegung ermöglicht, d.h. ein Bodenprofil wurde perpendicular zu den Maisreihen bis zu einer Tiefe von ca. 2 m ausgehoben. Auf diese Weise wurden die Wurzelsysteme von mehreren Pflanzen beobachtet und bewertet. Außerdem wurden Proben für eine quantitative Analyse der Wurzeln entnommen. Die Probenentnahme erfolgte mittels Bohrkern-Methode bis zu einer Tiefe von 0,5 m, die Bohrkern wurden in 10 cm lange Stücke (Boden-Wurzel-Proben) geschnitten. Im Labor wurden die Wurzeln ausgewaschen, gereinigt und mittels Bildanalysesoftware analysiert (HIMMELBAUER et al. 2004). Für die Ermittlung der Bodencharakteristika wurden gestörte und ungestörte Bodenproben entsprechend den Bodenhorizonten in unmittelbarer Nähe zu den beprobten Wurzelsystemen entnommen. Nachfolgende bodenphysikalische Parameter wurden erfasst: Korngrößenanalyse, Aggregatstabilität, Lagerungsdichte, Porenanteil und Porengrößenverteilung, Bodenwasserretention und Wasserdurchlässigkeit sowie eine Reihe bodenchemische Parameter.

Die zweite Studie umfasste eine Untersuchung der physikalischen Bodenmelioration, die zur Beseitigung von Unterbodenverdichtungen in Surnevo, Südbulgarien vor ein paar Jahren durchgeführt wurde. Hauptziel dieser Maßnahmen war eine Bodenverbesserung durch Optimierung der Durchlässigkeit und des Luftgehaltes des Bodens. Zwei Varianten wurden in Bezug auf das Wurzelwachstum erforscht: eine komplexe Bodenmelioration durch eine 60cm Tiefenlockerung in Kombination mit Drainage (Mel) und eine Kontrollfläche ohne Meliorationen (NMel) (HIMMELBAUER et al. 2010). Folgende bodenphysikalische Parameter wurden bis zu einer Tiefe von 1 m in beiden Varianten erfasst: Korngrößenanalyse, Feststoff- und Lagerungsdichte, Porenanteil und Luftkapazität, Bodenwasserretention und hydraulische Eigenschaften. Die Parzellen wurden mit Mais der Sorte "Kneza" bestellt. Herbizide wurden kurz nach der Pflanzung angewendet, das Restunkraut wurde mechanisch entfernt. Die räumliche Verteilung der Maiswurzeln wurde mit Hilfe der Bodenprofilwandmethode kurz nach der Blütezeit, untersucht. Wurzelspitzen wurden auf vertikalen und übereinander positionierten horizontalen Plänen, die mit einem Raster von 2 × 2 cm bedeckt wurden, angezeigt. Die Wurzeln in jedem Quadrat wurden gezählt und Indexe der Wurzelichte wurden daraus ermittelt, die sich auf die Anwesenheit und Abwesenheit von Fein- und Grobwurzeln beziehen. Die Indexe wurden auch mit der Wurzelrockenmasse pro Bodenvolumen verknüpft. Für die Analyse der Verteilungsmuster der Wurzeln wurde ein Varianz / Mittelwert Verhältnis (VMR)-Test eingesetzt, der für die Bewertung der räumlichen Punkteanordnung in ökologischen Studien bekannt ist (GRIEG SMITH 1983).

## Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse der bodenphysikalischen Untersuchungen in Andau, Ostösterreich sind in den *Tabellen 1* und *2* und der *Abbildung 1* dargestellt. Signifikante Unterschiede konnten vor allem in den oberen 10 bis 20 cm Bodentiefe beobachtet werden. Insbesondere waren die Messwerte des Bodenwasseranteils und des pflanzenverfügbaren Wassers, der Lagerungsdichte und der Aggregatstabilität, der Wasserdurchlässigkeit, des Anteils an Grob- und Mittelporen bei Direktsaat im Vergleich zu der konventionellen Bodenbearbeitung höher. Größere Poren sind für Konvektion- und Diffusionsprozesse im Boden für die Bodenatmung als auch für die Wurzel ausbreitung sehr wichtig. Der Mittelporenanteil ist wiederum mit dem Wasser, das für die Pflanzenwurzel verfügbar ist, assoziiert. Das Wasser in den Feinporen dagegen kann über lange Zeit festgebunden bleiben und ist durch die meisten Pflanzen nicht aufnehmbar. Der gemessene Feinporenanteil war bei der KV verglichen mit der DS Fläche deutlich höher. Die Aggregatstabilität ist ein Resultat vieler Faktoren, wie bodenbiologische Aktivität, organische und mineralische Zusammensetzung des Bodens, Bodenbedeckung etc. Verschiedenen Literaturquellen zufolge geht eine erhöhte Aggregatstabilität mit

einer höheren Widerstandsfähigkeit des Bodens gegenüber mechanischer Belastung einher, wie z.B. Wassererosion. Die Ergebnisse dieser Studie zeigten, dass der Anteil an stabilen Aggregaten bei DS deutlich über denen von der KV-Bodenbearbeitung lag. Dieser Anstieg wird als eine Folge des Verzichts auf den Pflugeinsatz über mehrere Jahre gesehen. Die Ergebnisse der weiteren ermittelten Bodenparameter zeigten keine wesentlichen Unterschiede hinsichtlich der verschiedenen Bodenbearbeitung. Dies könnte wohl eine Folge der hohen Bodenheterogenität sowie bestimmter Randeffekte sein, da die Proben aus benachbarten Profilen entnommen wurden.

Die Wurzelfreilegungen von Mais ergaben auf der ungepflügten Direktsaat-Fläche eine um 15-20 cm größere Wurzeltiefe als auf der gepflügten Fläche. Andererseits war die Seitenausdehnung geringer zugunsten eines rascheren, mehr senkrechten Verlaufes (*Tabelle 2*). Stark gewundene Wurzeln mit Verdünnungen und Verdickungen kamen fast nur auf der KV-Fläche vor. Dort fielen auch zahlreiche längere Seitenwurzeln auf. Zum Zeitpunkt der Wurzelprobenahme im September konnten keine signifikanten Unterschiede in der Wurzeldichteverteilung zwischen den beiden Versuchsfeldern festgestellt werden. Die Wurzellänge- und Wurzel-

**Tabelle 1: Ergebnisse der bodenphysikalischen Eigenschaften, Sept. 2009, Andau**

DS Tiefe cm	Textur			K-Wert cm d <sup>-1</sup>	Aggregat- stabilität %	Wasseranteil		Pflanzenverfügb. Wasser vol %	Poren- anteil vol %	Grobporen (>10µm) vol %	Mittelporen (10-0.2µm) vol %	Feinporen (<0.2µm) vol %	
	Sand 2-0.063mm %	0.063-0.002mm %	Ton <0.002mm %			0.3b (FK) vol %	15b (WP) vol %						
0-10					22,31								
10-20	34,1	40,8	25,1	sL-L	1,55E+03	16,89	33,4	22,9	10,5	50,9	17,5	10,5	22,9
20-30													
30-40													
40-50	33,5	37,6	28,9	L	5,47E+02		26,3	18,1	8,2	37,5	11,2	8,2	18,1
50-85	56,7	26,7	16,6	IS									
85-170	78,6	18,8	2,6	S									

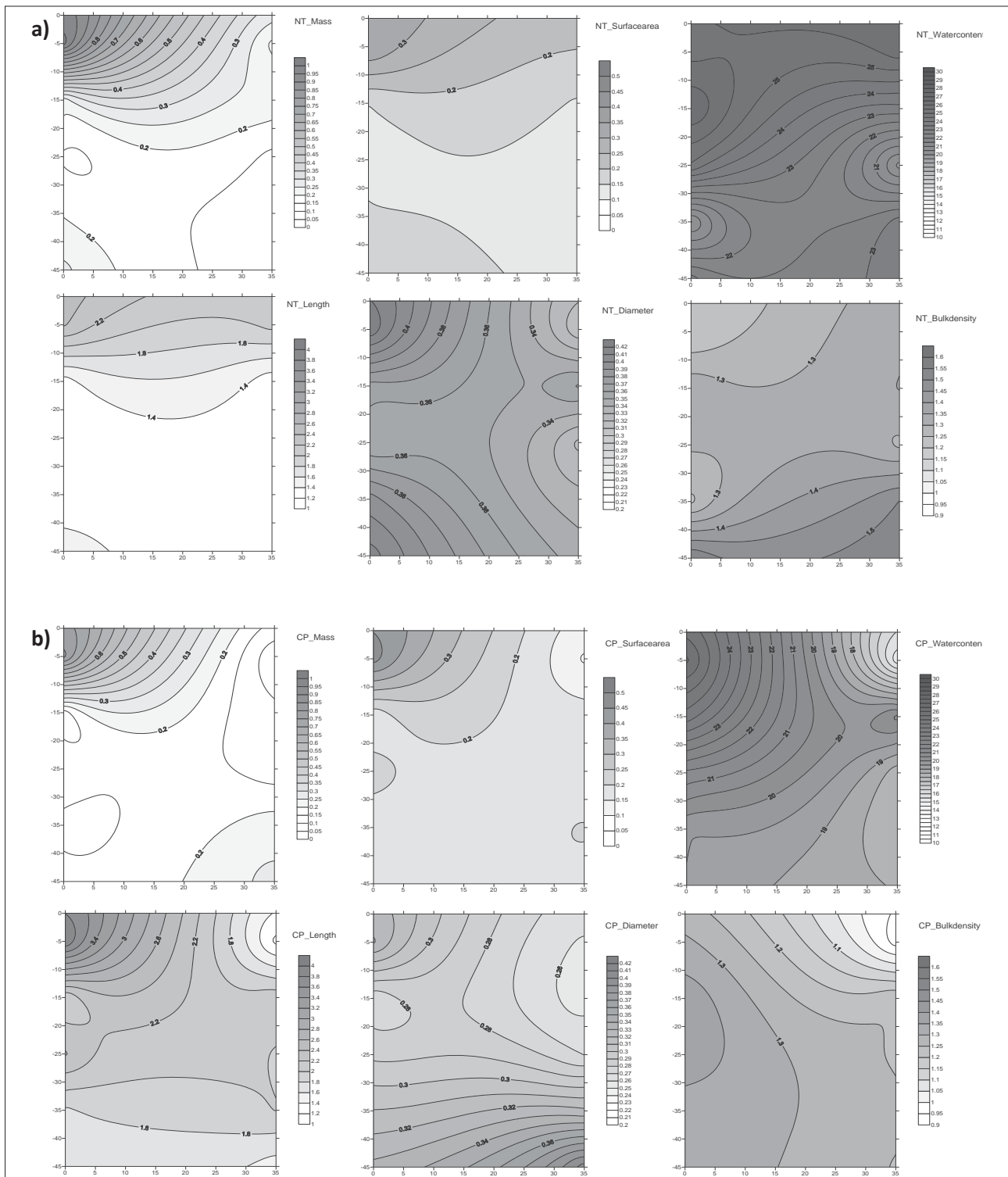
  

KV Tiefe cm	Textur			K-Wert cm d <sup>-1</sup>	Aggregat- stabilität %	Wasseranteil		Pflanzenverfügb. Wasser vol %	Poren- anteil vol %	Grobporen (>10µm) vol %	Mittelporen (10-0.2µm) vol %	Feinporen (<0.2µm) vol %	
	Sand 2-0.063mm %	0.063-0.002mm %	Ton <0.002mm %			0.3b (FK) vol %	15b (WP) vol %						
0-10					11,13								
10-20	31,5	43,2	25,3	sL-L	1,04E+03	11,46	33,5	25,6	7,9	47,4	14,0	7,9	25,6
20-30													
30-40													
40-50	29,1	43,2	27,7	L	2,36E+02		30,3	21,0	9,3	43,5	13,2	9,3	21,0
50-85	63,7	22,2	14,1	IS									
85-170	82,5	12,5	5,0	S									

DS-Direktsaat; KV- Konventionelle Bodenbearbeitung; K-Wert- Wasserdurchlässigkeitsbeiwert

**Tabelle 2: Spross- und Wurzelsystemgrößen, Maisertrag für die Direktsaat (DS) und die konventionelle Bodenbearbeitung (KV), Andau**

Variante	2007		2008		2009	
	DS	KV	DS	KV	DS	KV
Aussaat	22.05.	25.04.	27.04.	27.04.	19.04.	19.04.
Maissorte	PR37No1 Poncho	KWS 380	PR37No1 Poncho	PR37No1 Poncho	PR37No1 Poncho	PR37No1 Poncho
Wuchshöhe, cm	220	212	270	268	230	220
Ertrag, t	8,0	6,8	12,8	10,5	8,4	8,3
Wurzel						
Seitenausdehnung, cm	50	100	50-75	90	50-75	90
Tiefe, cm	130	110	140 (210)	115 (125)	130	115



**Abbildung 1: Räumliche Verteilung der Wurzelmasse- ( $\text{mg cm}^{-3}$ ), Wurzellänge- ( $\text{cm cm}^{-3}$ ) und Wurzeloberflächendichte ( $\text{cm}^2 \text{cm}^{-3}$ ), mittleren Durchmesser (mm), Bodenwasseranteil (vol. %) und Lagerungsdichte ( $\text{g cm}^{-3}$ ) für a) Direktsaat und b) konventionelle Bodenbearbeitung, Andau**

oberflächendichte war in der obersten Bodenschicht der KV-Fläche etwas höher, während die Wurzelmasse- und die mittlere Durchmesser in der DS größer waren (Abbildung 1a vs. Abbildung 1b). Allgemein war die Streuung einzelner Messungen auf den beprobten Flächen groß. Dies ist typisch für Wurzelbeobachtungen *in situ*.

In den drei Versuchsjahren waren die Maiserträge in der Regel in der DS höher als in der KV-Variante. In den Jahren 2007 und 2008 waren die Unterschiede größer als im Jahr 2009 (Tabelle 2). Im Versuchsjahr 2009 fiel ausreichend Niederschlag, allerdings war die Verteilung während der Vegetationsperiode ungünstig.

Tabelle 3: Wesentliche physikalische Eigenschaften des Bodens in Surnevo

Dystric planosol		Textur*			Feststoffsdichte	Lagerungsdichte at FK	Feldkapazität (FK, 0.3b)	Welkepunkt (WP, 15b)	Pflanzenverfügbares Wasser	Porenanteil	Luftkapazität**	Wasserdurchlässigkeit
Horizont	Tiefe cm	Ton %	Schluff %	Sand %	g cm <sup>-3</sup>	g cm <sup>-3</sup>	vol. %	vol. %	vol. %	Vol. %	Vol. %	cm d <sup>-1</sup>
<b>NMel</b>												
A <sub>1</sub> A <sub>2</sub> (0-22)	10-15	27.1	42.7	30.2	2.63	1.46	42.08	13.80	28.28	44.49	2.41	105.5
B <sub>1(0)</sub> (22-42)	35-40	40.2	32.3	27.5	2.68	1.46	40.57	20.54	20.03	45.52	4.95	0.00
B <sub>2(0)</sub> (42-72)	50-55	48.0	30.5	21.5	2.68	1.45	39.59	17.41	22.17	45.90	6.31	0.00
B <sub>3(0)</sub> (72-95)	80-85	44.9	31.2	23.9	2.70	1.47	39.23	19.37	19.86	45.56	6.32	0.36
<b>Mel</b>												
A <sub>1</sub> A <sub>2</sub> (0-28)	10-15	32.8	44.9	22.3	2.56	1.35	34.48	13.57	20.91	47.27	12.79	42.03
B <sub>1(0)</sub> (28-55)	40-45	53.8	29.9	16.3	2.73	1.47	42.14	30.30	14.76	46.15	4.01	5.04
B <sub>2(0)</sub> (55-78)	65-70	53.1	26.7	20.2	2.74	1.45	42.64	31.40	16.31	47.08	4.44	2.01
B <sub>3(0)</sub> (78-100)	85-90	51.8	33.9	14.3	2.79	1.53	41.46	29.27	15.87	45.16	3.70	10.05

\* Textur Fraktionen: Ton (<0,002 mm), Schluff (0,002 bis 0,05 mm), Sand (0,05-2 mm); \*\* Luftkapazität berechnet nach VOMOCIL (1965).

Zusammenfassend zeigten die Ergebnisse der bodenschonenden Bewirtschaftung ein tieferes und schnelleres Wurzelwachstum und eine höhere Pflanzenproduktion.

Die Ergebnisse der bodenphysikalischen Untersuchungen und der Wurzeluntersuchungen für meliorierte (Mel) und nichtmeliorierte (NMel) Parzellen in Surnevo, Südbulgarien sind in der Tabelle 3 und den Abbildungen 2 und 3 dargestellt. Mit Ausnahme der Oberschicht in der meliorierten Parzelle, lag der Grobporenanteil (Luftkapazität) unterhalb des kritischen Grenzwertes von 10 % für Lehmböden (RUSSEL 1980, HAKANSSON und LIPIEC 2000), was ein Risiko für die Atmung und die Wasser- und Nährstoffaufnahme der Pflanzenwurzeln darstellt. Parallel dazu war der Wasserdurchlässigkeitswert im Unterboden wesentlich höher in der meliorierten Parzelle. Überraschenderweise zeigten die Messungen der Lagerungsdichte (beim FK) in beiden Parzellen nur geringe Unterschiede. Bis zum Beobachtungstermin im August kam es jedoch in der NMel-Variante dem kritischen Wert von 1,64 g cm<sup>-3</sup> ganz nahe während sich die Werte in der Mel-Parzelle bis zu einer Tiefe von 50 cm (d.h. meliorierten Bodenschichten) kaum verändert haben. Auf diese Weise wurde eine Nachwirkung der hydro-technischen Meliorationen zur Beseitigung der Unterbodenverdichtungen erkennbar. Der Rest der bodenphysikalischen Parameter brachte keine wesentlichen Unterschiede in Bezug auf die Bodenbearbeitung.

Bis zum Zeitpunkt der Wurzelbeobachtung haben die Maiswurzeln in beiden Parzellen bereits eine Bodentiefe von 1 m erreicht. Für der vertikalen Pläne waren die Wurzelwertwerte (Index > 0 oder der Anteil an "vollen" Quadraten mit mindestens einer sichtbaren Wurzel) in im Oberboden in beiden Varianten weitgehend ähnlich (Abbildung 2 oben, a) vs. b)), signifikant höher waren sie in der meliorierten Parzelle im Unterboden. Im Unterschied dazu waren in der nichtmeliorierten Parzelle mehrere Wurzelgruppierungen (Anteil an Quadraten mit Index >4) am Übergang zum

Unterboden sichtbar. Die horizontalen Pläne (Abbildung 2 unten) der nichtmeliorierten Parzelle zeigten generell weniger "volle" Quadrate (Index > 0). Die große Fläche ohne Wurzeln besagen große Entfernungen für Wasser- und Nährstofftransmission, was zur Wurzelkonkurrenz führen kann. Es wurde beobachtet, dass die Wasserentnahme durch die Wurzeln im Unterboden gehemmt wurde. Auf der nichtmeliorierten Fläche waren eine Verzögerung der Pflanzenentwicklung und eine geringere Biomasseproduktion mit 25,6 t ha<sup>-1</sup> festzustellen. Auf der meliorierten Fläche wurden 48,0 t ha<sup>-1</sup> erreicht.

Auf die Bedeutung einer gleichmäßigen Wurzelverteilung für die Wasser- und Nährstoffaufnahme weisen mehrere Autoren hin. Einigen Literaturquellen zufolge geht eine gleichmäßige Wurzelverteilung mit einer höheren Aufnahmefähigkeit einher. Laut BALDWIN (1972) verhindert ein unregelmäßig gebildetes Wurzelsystem die Nährstoffaufnahme um etwa 20 %, bei einer Aufnahme über gruppierte Wurzeln kann diese sogar auf 75 % sinken. Ergebnisse der Verteilungsmusteranalyse der Wurzeln haben gezeigt, dass nur bei einem kleinen Raster von 2 cm im Oberboden in der Mel-Variante die VMR- Testergebnisse nah 1 liegen (Abbildung 4). Dies weist auf eine nicht-Cluster, sondern zufällige Art der Wurzelverteilung hin. An allen anderen getesteten Positionen und Skalen waren die VMR-Werte deutlich höhere als 1, das auf unterschiedlich starke Wurzelgruppierungen hinweist.

Zusammenfassend zeigten die Ergebnisse beider Fallstudien, dass vor allem die räumliche Verteilung (Tiefe, Seitenausdehnung, Verteilungsmuster) der Maiswurzeln durch die bodenphysikalischen Bedingungen betroffen wurden.

## Literatur

AMATO, M. and J.T. RITCHIE, 2002: Spatial distribution of roots and water uptake of Maize (*Zea mays* L.) as affected by soil structure. *Crop Science*, 42, 773-780.

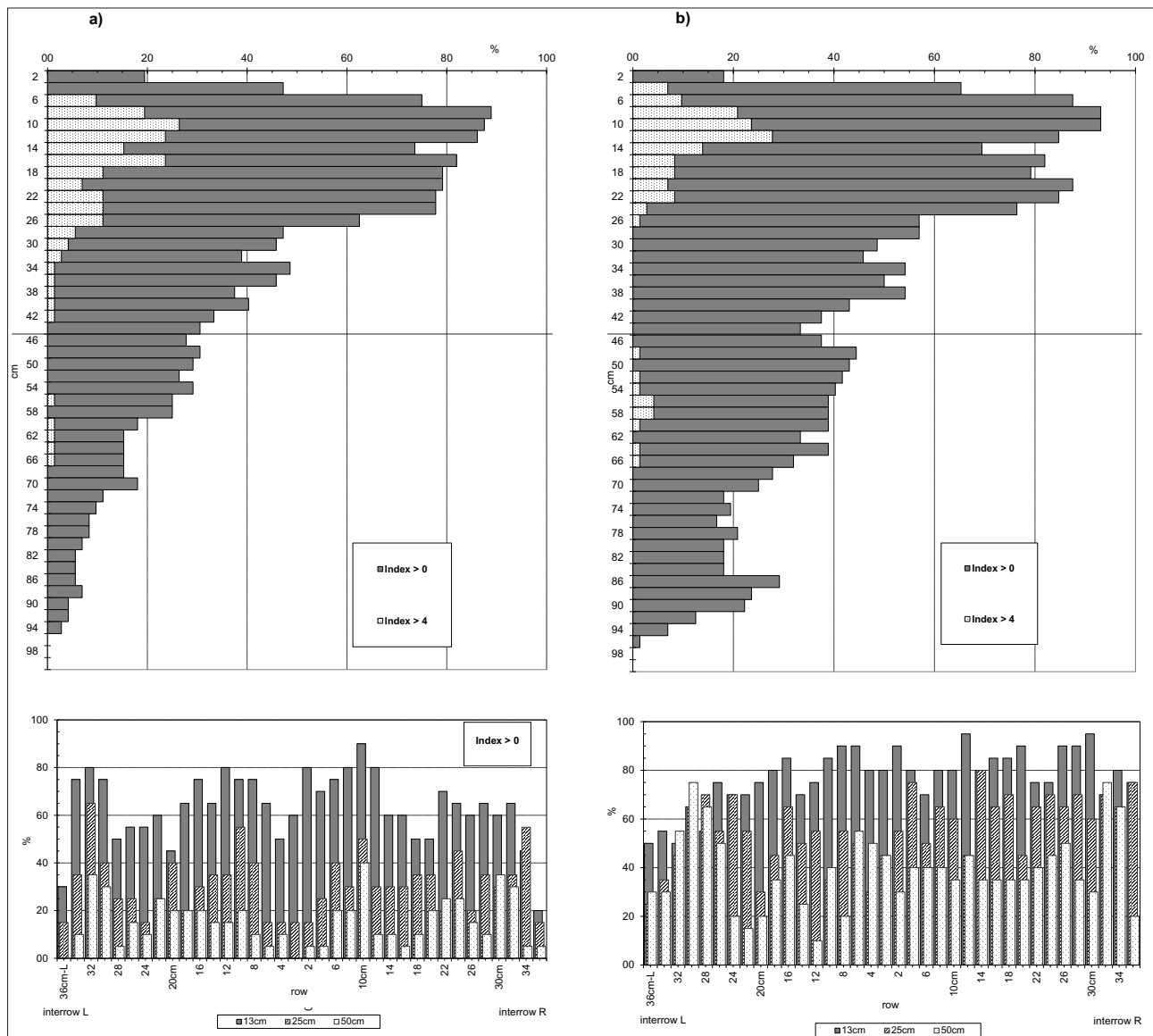


Abbildung 2: Räumliche Verteilung der Wurzelichte in der a) nichtmeliorierten und b) meliorierten Parzelle, dargestellt als Anteil an Quadraten mit mindestens einer Wurzel sichtbar (Index > 0) und mit vielen Wurzeln (Index > 4) gemittelt für die vertikalen Pläne (oben) und die horizontalen Pläne in 13, 25 und 50 cm Tiefe (unten) in Surnevo

BOYADGIEV, T., 1994: Soil map of Bulgaria according to the FAO-UNESCO-ISRIC revised legend explanatory notes. Soil Science, Agrochemistry and Ecology, 4-6, 52-56.

DILKOVA, R., E. FILCHEVA, G. KERCHEV and M. KERCHEVA, 1998: Humus peculiarities of the virgin surface waterlogged soils. In *Congres Mondial de Sci. du sol*, 16e, Montpellier, France, 20-26 aout 1998. Res.. Vol. 1, Symp. 18, p.378.

DROOGERS, P., F.B.W. VAN DER MEER and J. BOUMA, 1997: Water accessibility to plant roots in different soil structures occurring in the same soil type. *Plant and Soil*, 188: 83-91.

GRIEG SMITH, P., 1983: *Quantitative Plant Ecology*. Univ. of Calif. Press, Berkeley, p. 347.

HAKANSSON I. and J. LIPIEC, 2000: A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil & Tillage Research*, 53: 71-85.

HIMMELBAUER, M., W. LOISKANDL and F. KASTANEK, 2004: Estimating length, average diameter and surface area of roots using

two different Image analyses systems. *Plant and Soil*, 260 (1-2), 111-120.

HIMMELBAUER, M., S. ROUSSEVA and W. LOISKANDL, 2010: Spatial root distribution and water uptake of maize grown on field with subsoil compaction. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 58 (3): 163-174.

HORN, R., J.J.H. VAN DEN AKKER, J. ARVIDSSON (Eds.), 2000: Subsoil compaction. *Distribution, Processes and Consequences*, Adv. Geocology, 32, 462 pp.

MARSCHNER H., 1995: *Mineral Nutrition of Higher Plants*, Sec. Edition. Academic Press, pp. 889.

RUSSEL, E.W., 1980: *Soil conditions and plant growth*. Tenth Ed. Longman Group, UK Ltd., p. 849.

TARDIEU, F., L. BRUCKLER and F. LAFOLIE, 1992: Root clumping may affect the root water potential and the resistance to soil-root water on the uptake of ions by roots: I. Soil water content near a plane transport. *Plant and Soil*, 140: 291-301.



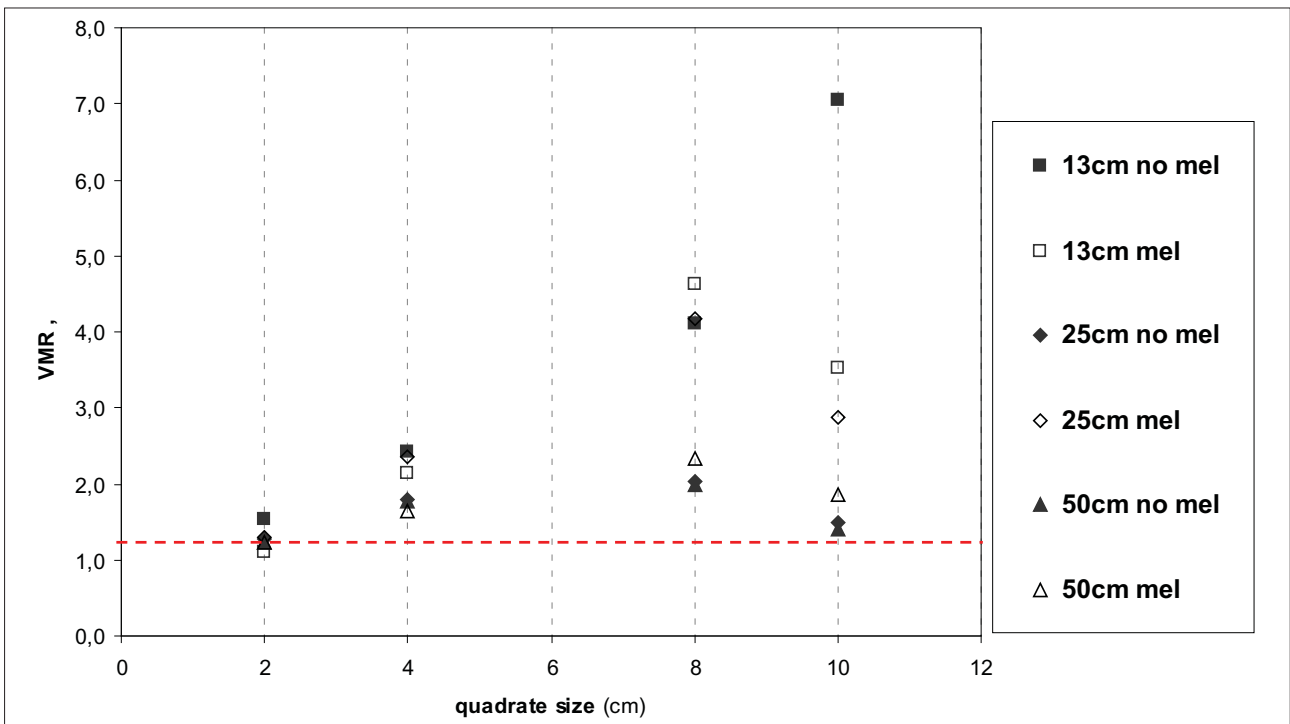


Abbildung 3: Ergebnisse der (VMR)-Analyse für verschiedene Skalen und Positionen der horizontalen Pläne in der nichtmeliorierten (no mel) und in der meliorierten (mel) Parzelle, Surnevo

VOMOCIL, J.A., 1965: Porosity. In C.A. Black (Ed.): Methods of soil analyses. Part 1: Physical and Mineralogical Properties including

Statistics of Measurement and Sampling. Agron. Monogr. 9, ASA and SSSA, Madison, WI, USA, pp. 299-314.

# Assessment of root interactions between linseeds and legumes in mixtures

Agnieszka Klimek-Kopyra<sup>1\*</sup>, B. Kulig<sup>1</sup>, T. Zajac<sup>1</sup> and A. Oleksy<sup>1</sup>

## Abstract

This study focused on root development in different mixture crops. The present research was performed in Poland, (50°07 N: 20°05 E). The assessment of root distribution and root mass of *Pisum sativum* (pea = P), *Vicia sativa* (vetch = V), *Linum usitatissimum* (linseed = L) in pure sown and in mixture; *Pisum sativum* with *Linum usitatissimum* (P(L) and L(P)), *Vicia sativa* with *Linum usitatissimum* (V(L) and L(V)) in a soil profile of 0,30 m depth, aimed at providing new insights into water capture capacity. Perennial crops exhibited different total root biomass, root distribution. Legumes accumulated considerably higher total root biomass, while linseed, being annual, produced clearly lower root biomass. Root dry matter showed diverse patterns of roots system along the soil profile due to different root densities of the crops.

Interspecific relation between linseed and vetch or linseed and pea in mixture depending on species component in mixture and weather conditions in years. Stronger relations between plants were noticed in mixture, regardless of weather conditions in years. Intraspecific relation among indi-

viduals plants of a single vetch and linseed species in pure sow were faint, regardless of vegetation years. Stronger relations among single linseed crop were noticed in 2006. Differentiation in root mass relations depending on water abundance in soil level. Drought, which was observed in flowering stage - July of 2006, resulted in stronger influence intraspecific relations between plants in sole crop. In 2007 drought, which was earlier – in April, affected in weakness influence of intraspecific relations in pea sole crop.

This study shows that crop mixture may greatly differ in terms of water capture and root distribution, a fact that should be taken into great account in optimizing the land use change. According to these factors new mixtures may be classified with respect to the roots mass and term of water consumption. Information on benefits from appropriate plant mixtures regarding root mass and is provided by experimental results. Roots distribution was strictly related on weather conditions link with water content in soil. We can suspect, that different soil conditions and weather conditions, may shown different natural solution for this species.

**Keywords:** mixture crops, competition, root system

## Introduction

Plant cooperation is most evident during a seedling phase, when neighbourhood of more seedlings causes easier overcoming the mechanical resistance of the surface soil layer (ZANNONE et al. 1986), while root competition is not so clear. MALCOLM (1966) believes that the plant competition is observed when the individual biomass production decreases in comparison to the sole crop production. EDWARDS (1969) states that two plants compete with each other when growth of one or both of them is weakened, or the habitus is modified in comparison to the growth or shape of plants that grow in sole crops. Similar or identical water and nutrients demand by all co-existing individuals causes strong competition which results in decrease of biomass of a single plant with increasing number of plants per area unit. On the other hand yield from the area unit increases with the density, but only to a certain limit, beyond which it starts to decrease. The prediction that intraspecific competition must be more intense than interspecific competition is based on the idea that a greater similarity in requirements should occur between conspecific than heterospecific neighbours (MacARTHUR and LEVINS 1967). In general, many studies whose results relate to this prediction have been performed in ecosystems in which both aboveground and below-ground competition are important. KEDDY (1991)

found that intraspecific competition was more intense than interspecific competition. By contrast, in arid and semiarid communities, intense below-ground competition is particularly important (FOWLER 1986). Differences in the dynamics of resources (i.e. soil and water resources) are at the core of understanding interactions among plants in both wet and dry soil conditions. Numerous studies describe interactions between root systems of plants both in sole crops and in mixtures (ATKINSON 1983, CALDWELL 1987).

The aim of this research was to establish inter- and intraspecific relations between roots of legumes; *Pisum sativum* and *Vicia sativa* and non-legumes – *Linum usitatissimum*, depending on type of sowing.

## Material and methods

The experiment was conducted under field conditions at the Field Crop Research station of University of Agriculture in Prusy (50°07 N latitude, 20°05 E longitude, 300 m above mean sea level) in the period of 2006-2007. The experiment in Prusy was established in Umbrisol. Soil ensure good habitat for the analyzed plants. Umbrisol occurs pointwise and is considered the best for demanding crop plants.

During the conducted field experiment in Prusy acute drought was observed in July of 2006, in April of 2007.

<sup>1</sup> University of Agriculture in Krakow, Department of Crop Production

\* Ansprechpartner: Agnieszka Klimek-Kopyra, aklimek@ar.krakow.pl

Drought occurred in Prusy in May. In the remaining months the weather conditions were optimal for growth and development of plants. It needs to be stressed, that soil conditions was more favorable for growth of the analyzed plants and their mixtures.

A split-plot in a randomized complete block design with four replications was used in the experiment. Three species in various methods of sowing were the plot treatment factors. Field pea (*Pisum sativum* L. cv. Ramrod), spring vetch (*Vicia sativa* L. cv. Ina) and flax (*Linum usitatissimum* L. cv. Flanders) were grown in the sole crop and in mixtures with substitutive design in the following years of the experiment. The replacement design involved the replacement of a proportion of one species with another. A 0.5:0.5 replacement design was used: each species was sown at 50% of its sole crop population (Table 2). The size of each plot was 1.25m x 8 m. Weeds, pests and diseases were controlled with appropriate pesticides. Crops were fertilized with 30 kg×ha<sup>-1</sup> N, 56 kg×ha<sup>-1</sup> P and 139 kg×ha<sup>-1</sup> K in 2006, 2007 in each soil type.

The roots were sampled using the soil-core method (BÖHM 1979) in summer, in the flowering stage. The core diameter was 80 mm. The samples were taken from a 30 cm depth and were divided into 2 sections: 0-15 and 15-30 cm. The roots were washed using a hydropneumatic elutriation system (SMUCKER et al. 1993) to remove mineral particles. Before scanning, all organic contaminations were manually removed. Digital images were obtained with an Epson Perfection 4870 Photo scanner. The collected images were saved in the .tiff format with a resolution of 600 dpi. After scanning, roots were dried at 70°C for dry matter determination (RDM).

## Results

The performed analysis of variance suggests differences in root matter of the compared plant species (Figure 1). The root development in Umbrisol was significantly affected by the method of sowing. Pea cultivated in the mixture with linseed developed significantly ( $p < 0.05$ ) lower root matter, whereas the sole crop of pea was more favorable (Figure 1). Furthermore, differences in root matter were observed in various years of the experiment and significant correlation with ( $p < 0.01$ ) the method of sowing was detected. Root matter of pea was very high in 2006 in the sole crop, whereas the mixture of pea and flax in 2007 resulted in low root matter of pea. The lack of production advantages in 2007 was the result of drought in the sowing month.

Competition significantly reduced mass of both species during 2006 and 2007. Plants growing in pure sow (reduce inside crop competition effect) had higher root mass than plants growing with competition ( $P < 0.05$  both years; Figure 1,2). The lack of an effect of neighbour identity on the reduction of mass of targets plants is shown by the equal effects of intra and interspecific competition. Vetch and linseed root development was reduced by competition similar way during vegetations period (Figure 2).

Interspecific relation between two species in crop mixture depending on species component in mixture and weather conditions in years (Figure 1). Stronger relations between

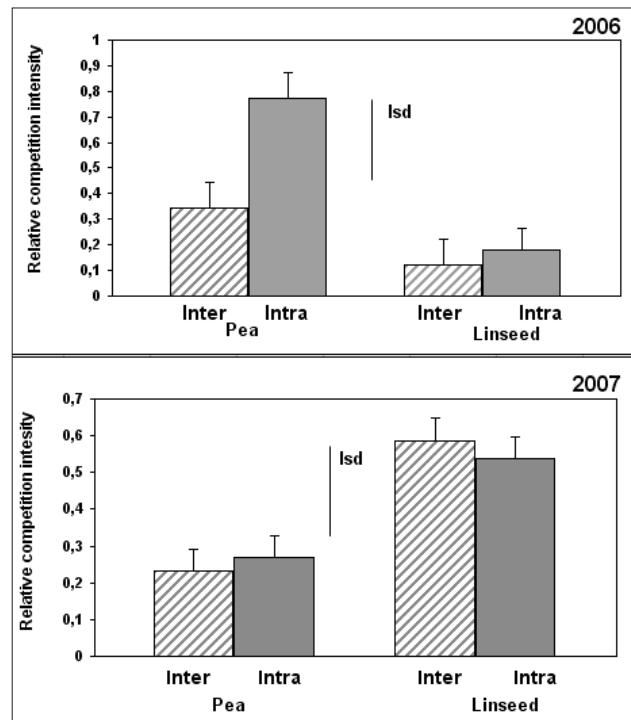


Figure 1: Relative competition intensity for intraspecific (Intra) and interspecific (Inter) competition in *Pisum sativum* and *Linseeds*. Bars represent  $\pm 1$  SE. Lsd bar was calculated with the experimental error for the year ( $P < 0.05$ ).

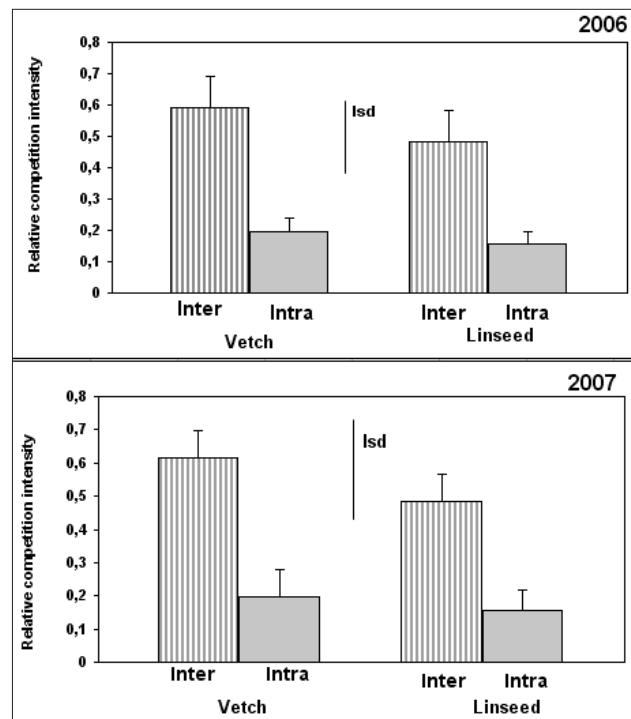


Figure 2: Relative competition intensity for intraspecific (Intra) and interspecific (Inter) competition in *Vicia sativum* and *Linseeds*. Bars represent  $\pm 1$  SE. Lsd bar was calculated with the experimental error for the year ( $P < 0.05$ ).

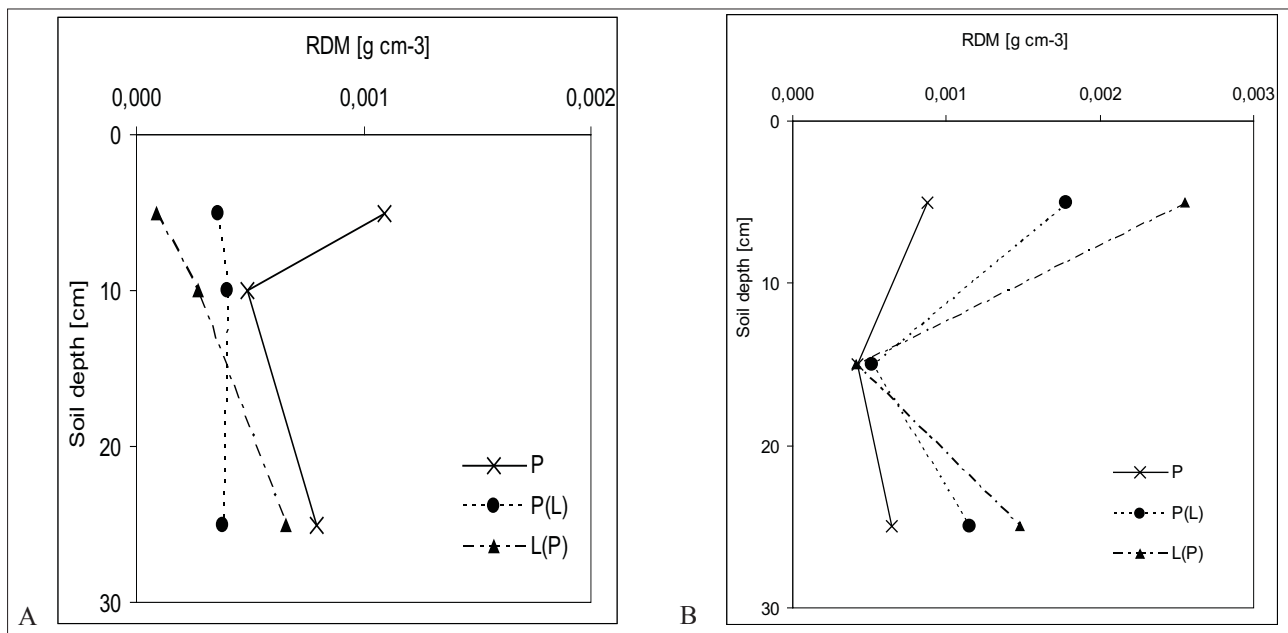


Figure 3: Root dry matter (RDM) of pea development in pure sow (P) and in mixture with linseed (P(L)), during flowering stage in different years; 2006 and 2007

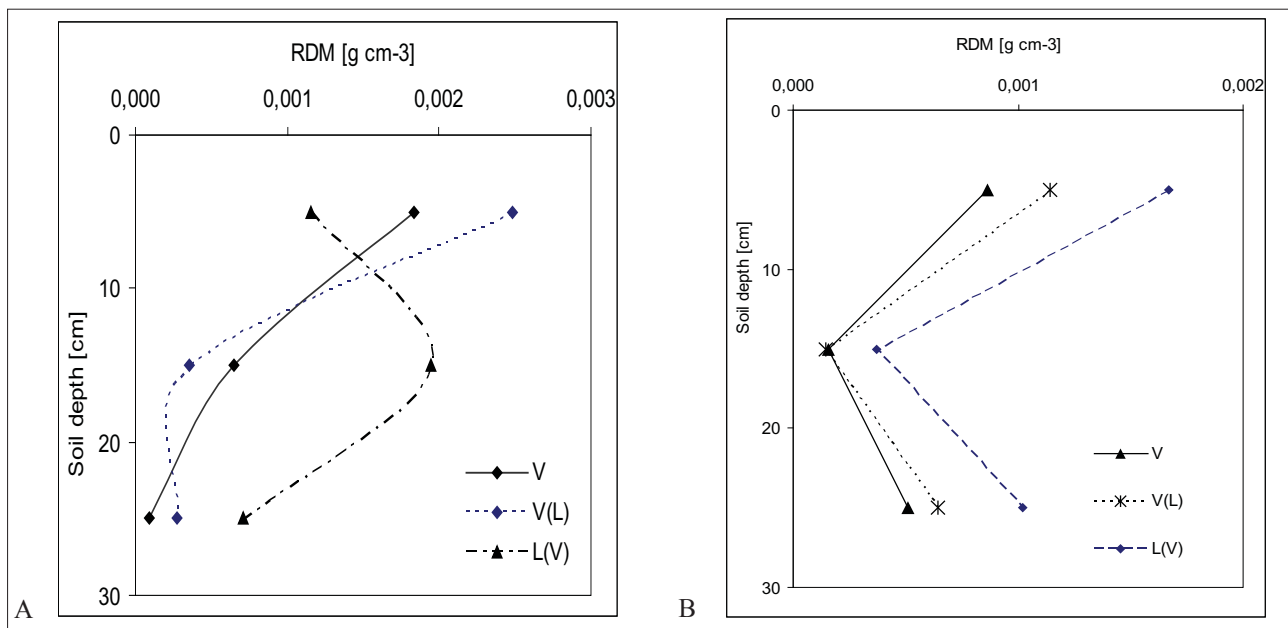


Figure 4: Root dry matter (RDM) of vetch development in pure sow (V) and in mixture with linseed (V(L)), during flowering stage in different years A - 2006 and B- 2007

pea and linseed were noticed in 2007, but linseed developed higher root system, because competed more effectively for water in soil. Intraspecific relation among individuals pea plants in sole crop were faint, regardless of vegetation years, albeit, weakness in 2007. Different situation were occurred among individuals plants of a single linseed species in crop. Stronger relations into single linseed crop were noticed in 2006. Differentiation of root mass depended on water abundance in soil level. Drought, which was observed in flowering stage - July of 2006, resulted in stronger influence intraspecific relations between plats in sole crop. In 2007

drought, which was earlier – in April, affected in weakness influence of intraspecific relations in pea sole crop. Interspecific relation between linseed and vetch in mixture depending on species component in mixture and weather conditions in years (Figure 2). Stronger relations between plants were noticed in mixture, regardless of weather conditions in years. Linseed developed higher root mass each year, which was useful for water capture during vegetation period. Intraspecific relation among individuals plants of a single vetch and linseed species in pure sow were faint, regardless

of vegetation years. Similar situation were noticed among individuals plants of a single species in crop. Weakness relations into single linseed and vetch were noticed in sole crop.

Roots distribution of pea vary in years and depending on type of mixture and species (*Figure 3*). Water requirement of peas are low, but really important during germination - April and flowering stage - June. In 2006 drought was observed in July, hence root distribution of pea and linseed in mixture was different and specific for each species. However, we noticed peculiar roots distribution of pea in the upper layer, what it may indicated moisture stress conditions during germination. In 2007, the rainfall was limited earlier, since April – during plant germination, and created wide range of root system distribution till 15cm depth of soil layer.

Vetch roots mass of distribution vary in years and depending on type of mixture and species (*Figure 4*). In 2006 drought was observed in July, hence that root distribution in soil depth was different and specific for each species in mixture. In 2007, the rainfall was limited earlier, since April – during plant germination. This situation was strongly harsh for vetch roots system, which relocated roots mass in upper soil level.

## Discussion

AGUIAR et al. (2001) were found that intra and interspecific competition had the same effect on the root growth rate. Our results have proved that specific relations between plants in below ground might be able to give a harsh pressure into above ground relation. In spite of the fact that our research was conducted in flowering stages, we can not be sure how root system developed in mixture from the beginning. The studies prove that physical properties of roots change when plants coexist. The performed analysis of variance showed that the root system of the analyzed plants was significantly affected by the method of sowing. Significantly ( $p < 0.05$ ) higher root matter of plants were obtained in sole crops, whereas lower variations of roots mass were obtained in mixtures. The relation of morphological characteristics of roots and soil conditions indicated the species diversity. ITOH et al. (2009) proved, that the root matter of plants depends on soil and water conditions, that change annually. The authors suggest, that compared to heavy soils, moderately rich soils provide better conditions for the development of root matter. The root matter is lower in heavy loamy soils, because plants must also overcome the soil resistance. TREDER et al. (2008), who presented different approach, suggested greater importance of plant competition for the habitat resources in the canopy. The presented research indicated that the soil type significantly affected root mass of legumes, while for the root mass of linseed this impact was smaller. In the presented study significantly higher root matter values were observed for pea and vetch ( $p < 0.001$ ) in Umbrisol and an increase of linseed root matter was observed. The development of root system is particularly important when drought occurs after sowing or during flowering phase (FAGERIA 2004). As a result of drought soil becomes hard which negatively affects the root system morphology and, as a consequence, affects the possibility of water and nutrients uptake (BENGOUGH et al. 2006).

The greater the soil compaction the greater the resistance to roots (GŁĄB 2008). It is believed, that water and nutrient uptake is determined by root morphology and distribution of side branches (FAGERIA 2004). A significant variation in the root matter of pea, vetch and flax was observed in the presented research depending on the water conditions. Pea and flax cultivated in mixtures were more sensitive to drought, which occurred in April, i.e. after sowing and during the plant emergence. On the other hand, the legumes - vetch and pea - in sole crops were more sensitive to the lack of water during the flowering phase. These studies confirm the results obtained by PANDEY et al. (1984) or LIU (2009), indicating that the drought resistance may be improved by better species selection regarding the soil and climatic conditions in the sole crop and in mixtures.

## References

- AGUIAR, M.R., K. WILLIAM and L.D. PETERS, 2001: Intensity of intra- and interspecific competition in coexisting shortgrass species. *J.Ecol.* 89: 40-47.
- ATKINSON, D., 1983: The growth, activity and distribution of the fruit tree root system. *Plant Soil* 71:23-36.
- BENGOUGH, A.G., M.F. BRANSBY, J. HANS, S.J. MCKENN, T.J. ROBERTS and T.A. VALENTINE, 2006: Root responses to soil physical conditions, growth dynamics from field to cell. *J. Exp. Bot.* 57:437-447.
- CALDWELL, M.M., 1987: Competition between root systems in natural communities. In: Gregory PJ, Lake JV, Rose DA (eds.). *Root development and function*. Cambridge University Press, Cambridge, pp 167-186.
- EDDOWES, M., 1969: Physiological studies of competition in *Zea mays* L. II. Effects of competition among maize plants. *J. Agric. Sci. Camb.*, 72: 195-202.
- FOWLER, N., 1986: The role of competition in plant communities in arid and semiarid regions. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 17, 89-110.
- GŁĄB, T., 2008: Effect of tractor wheeling on root morphology and yield of Lucerne (*Medicago sativa* L.). Vol. 63,3:398-406
- GOLDBERG, D.E. and A. NOVOPLANSKY, 1997: On the relative importance of competition in unproductive environments. *Journal of Ecology*, 85, 409-418.
- ITOH, H., S. HAYASHI, T. NAKAJIMA, T. HAYASHI, H. YOSHIDA, K. YAMAZAKI and T. KOMATSU, 2009: Effects of soil type, vertical root distribution and precipitation on grain yield of winter wheat. *Plant Prod. Sci.* 12 (4): 503-513.
- KEDDY, P.A., 1991: Plant competition and resources in old fields. *Trends in Ecology and Evolution* 6: 235-237.
- LIU, L., 2009: Root systems of oilseed and pulse crops – morphology, distribution and growth patterns. Thesis. Saskatoon, SK, pp 136.
- MacARTHUR, R. and R. LEVINS, 1967: The limiting similarity, convergence, and divergence of coexisting species. *American Naturalist*, 101, 377-385.
- MALCOLM, W.M., 1966: Biological interactions. *Bot. Rev.*, 32:243-254.
- PANDEY, R.K., W.A.T. HERRERA and J.W. PENDLETON, 1984: Drought response of grain legumes under irrigation gradient. III. Plant growth. *Agron. J.* 76:557-560.
- TREDER, K., M. WANIC and J. NOWICKI, 2008: Competition between spring wheat and spring barley under conditions of diversified fertilization. Part I. Influence on selected morphological characteristics of plants. *Act. Agrophy.* 11(3): 767-780.
- ZANNONE, L., P. ROTILL, R. PAOLETTI and C. SCOTTI, 1986: Experimental studies of grass-legume associations. *Agronomie* 6(10):931-940.