

Bioporengeneese durch homo- und allorhize  
Kulturpflanzen:  
Einfluss auf das Wurzelwachstum der Nachfrüchte

**Dissertation**

zur

Erlangung des Grades

Doktorin der Agrarwissenschaften

(Dr. agr.)

der

Landwirtschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

von

**Ute Katharina Perkons**

aus

Viersen

Bonn 2018

Referent: Professor Dr. Ulrich Köpke

Korreferent: Professor Dr. Frank Ewert

Tag der mündlichen Prüfung: 22.06.2018

Angefertigt mit Genehmigung der Landwirtschaftlichen Fakultät der Universität Bonn.

## Bioporengeneese durch homo- und allorhize Kulturpflanzen: Einfluss auf das Wurzelwachstum der Nachfrüchte (Kurzfassung)

Im Organischen Landbau ist ein tiefreichendes Wurzelsystem, das die Aufnahme von Wasser und Nährstoffen aus tiefen Bodenschichten ermöglicht, ein wichtiges Element zur Stabilisierung des Ertrags. Bioporen, durch Pflanzenwurzeln oder Bodentiere geschaffene Hohlräume, können Wurzeln den Zugang zum tiefen Boden erleichtern. Zudem können mit Nährstoffen angereicherte Porenwände einen zentralen Bereich der Nährstoffakquisition darstellen.

Zur Untersuchung der Bioporengeneese und der Reaktion von Nachfrüchten auf eine unterschiedliche Vorfruchtprägung wurden zeitversetzt (2007 und 2009) zwei identische Versuche auf einer tiefgründigen Normparabraunerde aus Löss angelegt. In der Vorfruchtphase wurde der Boden durch ein- bis dreijährigen Anbau von Luzerne, Wegwarte und Rohrschwengel geprägt. Dabei wurde der Pflanzenaufwuchs gemulcht und auf der Fläche belassen. Da eine Bodenbearbeitung unterblieb, entspricht die Anbaudauer einer Bodenruhe.

Es wurde ein Einfluss der Pflanzenart und der Anbaudauer auf die erhobenen Wurzelparameter der Vorfrüchte, die Abundanz und Biomasse des Tauwurms *Lumbricus terrestris* und die Bioporendichte erwartet. In der Nachfruchtphase wurde der Einfluss der Vorfruchtnutzung auf das Wurzelwachstum von Sommerweizen, Futtermalve, Wintergerste und Winterraps geprüft. Für diese Arbeit wurden in den Jahren 2010 bis 2012 Wurzeluntersuchungen durchgeführt. Zur Bestimmung der Wurzellängendichte (WLD) in *bulk*-Boden und Bioporen kam neben der Profilwandmethode eine erweiterte Monolithmethode mit anschließender Bildanalyse zum Einsatz. Zur Ermittlung der Bioporendichte wurden Bioporen auf einer freigelegten Fläche in 45 cm bis 145 cm Bodentiefe gezählt.

Die allorhizen Vorfrüchte Luzerne und Wegwarte wiesen höhere Wurzeldurchmesser und Durchwurzelungstiefen auf als der homorhize Rohrschwengel. Die Bioporendichte wurde signifikant von der Vorfruchtart, aber nicht von der Anbaudauer beeinflusst. Nach zweijährigem Wegwarte-Anbau wurde die signifikant höchste Dichte festgestellt. Demgegenüber wurden sowohl Abundanz als auch Biomasse von *L. terrestris* von einer Bodenruhe gefördert, aber nicht von der Vorfruchtart beeinflusst. Die Genese oder Stabilisierung der Bioporen im Versuch ist folglich den Pflanzenwurzeln zuzuschreiben.

Unterhalb von 70 cm Bodentiefe wurde nach zweijährigem Wegwarte-Anbau oft eine erhöhte WLD der Nachfrüchte ermittelt, was mit höheren Bioporendichten einherging. Am Beispiel von Wintergerste konnte gezeigt werden, dass zwischen 45 und 145 cm Bodentiefe im Mittel etwa 20 % der erfassten Wurzeln in Bioporen wuchsen. Der berechnete Anteil von Bioporen an der Bodenoberfläche der entsprechenden Bodentiefen betrug hingegen nur 1,5 %. Es wurden also mehr Wurzeln in Bioporen festgestellt, als bei einer zufälligen Verteilung der Wurzeln zu erwarten wäre. Alle Kulturen zeigten zu einem frühen Untersuchungstermin eine vergleichsweise hohe relative WLD in Bioporen, was darauf hindeutet, dass die Besiedelung tiefer Bodenschichten durch Bioporen erleichtert wird. Der anschließende Rückgang der relativen WLD in Bioporen kann durch aus Bioporen in den *bulk*-Boden wachsende Wurzeln oder eine langsamere Durchdringung des *bulk*-Bodens verursacht worden sein.

Die Ergebnisse zeigen, dass Wurzeln Bioporen bevorzugen. Dadurch kann es zu einer verbesserten Wasser- und Nährstoffaufnahme kommen, was insbesondere bei einer aufgrund des Klimawandels prognostizierten Zunahme von Trockenperioden Bedeutung für die Gestaltung der Fruchtfolge hat.

## Biopore genesis through fibrous and tap root systems: Influence on root growth of subsequent crops (Abstract)

Deep-rooting crops often show a high yield stability, which is one important goal of organic agriculture. Biopores are voids created by plant roots or soil fauna which can facilitate the access of roots to the deep soil. Additionally, biopore walls are enriched with nutrients and can serve as a hot spot for nutrient acquisition.

The scope of this work was to investigate the effect of precrops on biopore genesis and the impact of the altered soil conditions on subsequent crops. Two field experiments with identical design were started in 2007 and 2009 respectively on a deep Haplic Luvisol derived from loess. In the precrop phase the soil was influenced by one, two or three years cultivation of lucerne, chicory and tall fescue. No tillage operation was carried out during fodder cropping, so that cropping duration corresponds to soil rest. The fodder crops were mulched several times and the biomass remained on the field.

It was hypothesized that plant species and cropping duration have an effect on root system parameters of the chosen precrops as well as on the abundance and biomass of the earthworm *Lumbricus terrestris* and on numbers of biopores per unit surface area. In the second phase of the field experiment the influence of the precrop cultivation on the root systems of spring wheat, fodder mallow, winter barley and winter oilseed rape was investigated. Root investigations were carried out from 2010 to 2012. Root-length density (RLD) in bulk soil and in biopores was estimated with the profile wall method and an enhanced monolith method which was followed by image analysis. Biopore density in three diameter classes was determined in 45 cm to 145 cm soil depth on a plane horizontal surface.

The taprooted precrops lucerne and chicory showed higher root diameters and higher rooting depths compared to tall fescue with a fibrous root system. Biopore density was influenced significantly by the precrop but not by the duration of fodder cropping. Chicory with its tap root system cultivated for two years resulted in the highest numbers of biopores per unit surface area. In contrast, abundance and biomass of *L. terrestris* was promoted by soil rest (cropping duration), but not by crop species. Therefore, it was concluded that the formation or stabilization of biopores in the field trial was primarily caused by plant roots.

Below 70 cm soil depth RLD of fodder mallow, winter barley and oil seed rape was often higher after two years chicory precrop, corresponding to the higher biopore density. For winter barley it was shown that 20 % of the total RLD (mean value for 45–145 cm soil depth) was situated in biopores whereas the area of the biopores added up to only 1.5 % of the soil surface in the corresponding soil depths. The amount of roots inside biopores was therefore much higher than expected, assuming a random distribution of roots in the soil. At the beginning of the season all crops showed a comparatively high relative RLD in biopores. This suggests that biopores facilitate roots to reach deeper soil layers. The decline of RLD in biopores later in the season can be attributed to roots growing from the biopore into the bulk soil or the slower growth of roots in the bulk soil.

The results show that the cultivation of taprooted plants can enhance biopore numbers per unit surface area and that roots of following crops show a preference for biopores. Due to improved water and nutrient uptake this may be of particular importance for the design of crop rotations especially when taking into account the increase of dry spells due to climate change.

## Ergebnisse aus dieser Arbeit sind in folgende Veröffentlichungen eingegangen:

- HAN, E., KAUTZ, T., PERKONS, U., LÜSEBRINK, M., PUDE, R. UND KÖPKE, U., 2015: Quantification of soil biopore density after perennial fodder cropping. *Plant Soil*. **394**, 73-85.
- HAN, E., KAUTZ, T., PERKONS, U., UTEAU, D., PETH, S. HUANG, N., HORN, R., KÖPKE, U., 2015: Root growth dynamics inside and outside of soil biopores as affected by crop sequence determined with the profile wall method. *Biol. Fertil. Soils*. **51**, 847-856.
- BAREJ, J.A.M., PÄTZOLD, S., PERKONS, U., AMELUNG, W., 2014: Phosphorus fractions in bulk subsoil and its biopore systems. *Eur. J. Soil Sci.* **65**, 553–561.
- KAUTZ, T., M. LÜSEBRINK, S. PÄTZOLD, D. VETTERLEIN, R. PUDE, M. ATHMANN, P. M. KÜPPER, U. PERKONS & U. KÖPKE, 2014: Contribution of anecic earthworms to biopore formation during cultivation of perennial ley crops. *Pedobiologia* **57** (1), 47–52.
- PERKONS, U., T. KAUTZ, D. UTEAU, S. PETH, V. GEIER, K. THOMAS, K. LÜTKE HOLZ, M. ATHMANN, R. PUDE & U. KÖPKE, 2014: Root-length densities of various annual crops following crops with contrasting root systems. *Soil Till. Res.* **137**, 50–57.
- PERKONS, U., P. M. KÜPPER, T. KAUTZ & U. KÖPKE, 2013: Pflanzenbauliche Nutzung von Bioporen im Unterboden. In: D. NEUHOFF (Hrsg.): *Beiträge zur 12. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau*, Berlin, 206–209. Köster.
- KAUTZ, T., U. PERKONS, M. ATHMANN, R. PUDE & U. KÖPKE, 2013: Barley roots are not constrained to large-sized biopores in the subsoil of a deep Haplic Luvisol. *Biol Fertil Soils* **49** (7), 959–963.
- GAISER, T., U. PERKONS, P. M. KÜPPER, T. KAUTZ, D. U. PUSCHMANN, F. EWERT, A. ENDERS & G. KRAUSS, 2013: Modeling biopore effects on root growth and biomass production on soils with pronounced sub-soil clay accumulation. *Ecol. Model.* **256**, 6–15.
- GAISER, T., U. PERKONS, P. M. KÜPPER, D. U. PUSCHMANN & S. PETH, 2012: Evidence of improved water uptake from subsoil by spring wheat following lucerne in a temperate humid climate. *Field Crops Res.* **126**, 56–62.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Literaturübersicht . . . . .	3
1.1.1. Entstehung von Bioporen . . . . .	3
Bioporengnese durch Wurzelwachstum . . . . .	3
Bioporengnese durch anözische Regenwürmer . . . . .	5
1.1.2. Wurzelwachstum in Bioporen . . . . .	6
1.1.3. Quantifizierung von Wurzelsystemen . . . . .	8
1.1.4. Quantifizierung von Bioporensystemen . . . . .	10
1.2. Hypothesen . . . . .	12
<b>2. Material und Methoden</b>	<b>13</b>
2.1. Versuchsstandort . . . . .	13
2.1.1. Boden . . . . .	13
2.1.2. Klima und Witterung . . . . .	14
2.2. Versuchsanlage . . . . .	15
2.3. Wurzellängendichte mit Profilwandmethode . . . . .	20
2.4. Wurzellängendichte mit Bildanalyseverfahren . . . . .	21
2.4.1. Monolithentnahme . . . . .	21
2.4.2. Auswaschung . . . . .	22
2.4.3. Aufarbeitung . . . . .	22
2.4.4. Scannen . . . . .	22
2.4.5. Anwendung des Computerprogramms WinRHIZO . . . . .	22
2.5. Wurzelmasse . . . . .	23
2.6. Umrechnungsfaktoren . . . . .	23
2.7. Bioporen . . . . .	23
2.7.1. Porengrößenverteilung . . . . .	23
2.7.2. Wurzelwachstum in Bioporen und Porenkontinuität . . . . .	24
2.8. Regenwurmabundanz und -biomasse . . . . .	24
2.9. Statistische Auswertung . . . . .	25
<b>3. Ergebnisse und Diskussion</b>	<b>27</b>
3.A. Vorfruchtphase . . . . .	27
3.A.1. Genese der Bioporen . . . . .	27
Bioporengnese durch Wurzeln . . . . .	27
Bioporengnese durch Regenwürmer . . . . .	38

3.B. Nachfruchtphase . . . . .	44
3.B.1. Vorfruchtnutzung und Wurzelwachstum der Nachfrüchte . . . . .	44
Sommerweizen . . . . .	44
Futtermalve . . . . .	49
Wintergerste . . . . .	52
Winterraps . . . . .	54
3.B.2. Wurzelwachstum in Bioporen . . . . .	59
Einfluss von Bodentiefe und Entwicklungsdauer . . . . .	59
Vergleich von Sommerungen und Winterungen . . . . .	67
Vergleich der Vorfrucht-Varianten Ww2 und Rs1 . . . . .	69
3.B.3. Wurzeldurchmesser . . . . .	74
3.B.4. Wurzelmasse . . . . .	77
3.B.5. Regenwürmer . . . . .	78
3.C. Methodenkritik . . . . .	80
3.C.1. Profilwand- und Monolithmethode . . . . .	80
3.C.2. Färbemonolithmethode . . . . .	84
3.C.3. Erfassung der Bioporen . . . . .	85
<b>4. Generaldiskussion</b>	<b>86</b>
<b>5. Zusammenfassung</b>	<b>92</b>
<b>6. Verzeichnisse</b>	<b>96</b>
6.1. Literaturverzeichnis . . . . .	96
6.2. Abbildungsverzeichnis . . . . .	115
6.3. Tabellenverzeichnis . . . . .	119
<b>Anhang</b>	<b>122</b>

# Abkürzungsverzeichnis

<b>WL</b>	Wurzellänge [ $\text{km}\cdot\text{m}^{-2}$ ]
<b>WLD</b>	Wurzellängendichte [ $\text{cm}\cdot\text{cm}^{-3}$ ]
<b>WLE</b>	Wurzellängeneinheit [Anzahl Wurzellängeneinheiten à 5 mm]
<b>Lu</b>	Luzerne ( <i>Medicago sativa</i> L.)
<b>Ww</b>	Wegwarte ( <i>Cichorium intybus</i> L.)
<b>Rs</b>	Rohrschwingel ( <i>Festuca arundinacea</i> SCHREB.)
<b>Lu1</b>	Luzerne 1. Nutzungsjahr
<b>Lu2</b>	Luzerne 2. Nutzungsjahr
<b>Lu3</b>	Luzerne 3. Nutzungsjahr
<b>Ww1</b>	Wegwarte 1. Nutzungsjahr
<b>Ww2</b>	Wegwarte 2. Nutzungsjahr
<b>Ww3</b>	Wegwarte 3. Nutzungsjahr
<b>Rs1</b>	Rohrschwingel 1. Nutzungsjahr
<b>Rs2</b>	Rohrschwingel 2. Nutzungsjahr
<b>Rs3</b>	Rohrschwingel 3. Nutzungsjahr
<b>BBCH-Skala</b>	von Biologischer Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemischer Industrie entwickelte Skala, die das morphologische Entwicklungsstadium einer Pflanze digitalisiert beschreibt
<b>Ind.</b>	Individuen
<b>ns</b>	nicht signifikant



# 1. Einleitung

Ein ausgedehntes und tief reichendes Wurzelsystem hat für die Versorgung der Pflanze mit Wasser und Nährstoffen besondere Relevanz (FLEIGE et al. 1983, KUHLMANN & BAUMGÄRTEL 1991). Dies ist insbesondere der Fall, wenn der Oberboden trocken ist oder geringe Nährstoffkonzentrationen aufweist. Darüber hinaus wird durch die Aufnahme von Stickstoff aus tieferen Bodenschichten der Verlagerung von Nitrat in das Grundwasser entgegengewirkt (DUNBABIN et al. 2003). Zusätzlich ist der tiefe Boden eine Senke für in der Wurzel gebundenen atmosphärischen Kohlenstoff. Schätzungen zufolge können auf diese Weise 50 t CO<sub>2</sub> je Hektar und Jahr gebunden werden, so dass dies eine mögliche Strategie zur Abschwächung des Klimawandels darstellt (SILVER et al. 2010, KELL 2011).

Zur Erreichung einer tieferen Durchwurzelung, die durch hohen Eindringwiderstand und Sauerstoffmangel behindert sein kann, gibt es für Kulturpflanzen zwei Ansatzpunkte (BENGOUGH et al. 2011). Zum einen besteht die Möglichkeit, Sorten mit angepassten Wurzelsystemen durch Züchtung zu entwickeln (KELL 2011). Zum anderen können durch geeignete Bewirtschaftungsmaßnahmen limitierende Bodeneigenschaften verändert werden (LYNCH & WOJCIECHOWSKI 2015). Angepasste Bodenbearbeitungsverfahren wie Reduzierte Bodenbearbeitung, der Aufbau von organischer Substanz im Boden und die Vermeidung von Verdichtungen tragen dazu bei.

Eine andere Möglichkeit, die im Rahmen dieser Arbeit verfolgt wurde, ist die Schaffung eines Porensystems, in dem Wurzeln ohne Limitationen durch den Eindringwiderstand und Sauerstoffmangel wachsen können. Strategien zur Schaffung von Bioporen (von Wurzeln oder Bodentieren geschaffene Poren) beinhalten den Anbau von tief wurzelnden Pflanzen mit einem Pfahlwurzelsystem und die Förderung von Regenwürmern. Bioporen erleichtern den Zugang zu tieferen Bodenschichten und weisen in ihren Wandungen zudem höhere Nährstoffgehalte und höhere mikrobielle Aktivität als der *bulk*-Boden auf (TIUNOV & SCHEU 1999, STEWART et al. 1999, MCMAHON & CHRISTY 2000). Außerdem erhöhen sie die Infiltration bei Niederschlägen und wirken damit einer Erosionsgefahr entgegen. Das im tiefen Boden gespeicherte Wasser ist durch die Poren besser erreichbar.

Grundsätzlich sind diese und andere Maßnahmen zur Förderung und Stabilisierung der Bodenfruchtbarkeit bedeutsam, da der Boden die wichtigste Ressource zur Produktion von Nahrungsmitteln für eine steigende Weltbevölkerung darstellt (LAL 2009). Allerdings gehen landwirtschaftliche Nutzflächen verstärkt durch Erosion und Versiegelung verloren und werden darüber hinaus durch Degradation (z. B. durch Verdichtung, Ungleichgewicht von Nährstoffen und Verlust organischer Substanz) in ihrer Leistungsfähigkeit zur Produktion von Nahrung, Futter und Fasern herabgesetzt. Zusätzlich stellt die Zunahme von Trockenperioden sowie eine höhere Variabilität von Temperatur und Niederschlag, wie sie aufgrund des Klimawandels erwartet werden, eine Herausforderung dar (GORNALL et al. 2010, OLESEN et al. 2011).

Unter diesen Bedingungen ist es notwendig, mit weniger Betriebsmitteleinsatz mehr und

qualitativ hochwertige Lebensmittel nachhaltig zu produzieren. Diese „nachhaltige Intensivierung“ erfordert eine optimale Nutzung der vorhandenen Ressourcen Wasser, Nährstoffe und Böden (GODFRAY et al. 2010, WHITE et al. 2013). In der modernen konventionellen Landwirtschaft wird als Wurzelraum der Kulturpflanzen lediglich der Bearbeitungshorizont betrachtet. Hohe Erträge werden insbesondere durch die Zufuhr von Düngern erzielt, so dass sich bei knapper werdenden endlichen Ressourcen und damit verbundenen Preissteigerungen die Wirtschaftlichkeit einer intensiven mineralischen Düngung verschlechtert (CORDELL et al. 2009). Der Unterboden, dessen Potential im Hinblick auf die Nährstoffversorgung lange unterschätzt wurde, kann einen bedeutenden Beitrag zur Ernährung der Pflanze leisten (KAUTZ et al. 2013a). Im Organischen Landbau besteht, im Gegensatz zum konventionellen Landbau, keine Möglichkeit der bedarfsgerechten Versorgung der Kultur mit leichtlöslichen Düngern, so dass die Pflanze auf die zeitgerechte Mineralisierung aus der Festphase des Bodens angewiesen ist. Ein tiefreichendes Wurzelsystem, mit dem mehr Bodenvolumen erschlossen wird, ist aus diesem Grund für einen stabilen Ertrag von Vorteil (LAMMERTS VAN BUEREN et al. 2002).

Das bessere Verständnis des Wurzelwachstums und der Nutzung von Bioporen im Unterboden ist für die Entwicklung von Strategien für eine effiziente Nutzung von Nährstoffressourcen erforderlich. Der Fokus dieser Arbeit liegt deshalb auf der Untersuchung der Bioporengese und der Nutzung dieser Poren durch die Wurzeln nachfolgender Kulturen. Im Feldversuch wurden Bioporendichten nach dem ein-, zwei- oder dreijährigem Anbau von Kulturen mit unterschiedlichen Wurzelsystemen quantifiziert. Um Rückschlüsse auf die Genese der Poren ziehen zu können, wurden einerseits die Wurzelsysteme der angebauten Kulturen und andererseits die Regenwurmabundanz untersucht. Nach dieser Phase gezielter Bioporengese wurden abwechselnd homorhize und allorhize Kulturen als Nachfrüchte angebaut und die Reaktion ihrer Wurzeln auf die unterschiedlichen Bedingungen untersucht. Dazu wurde die Wurzellängendichte mit der Profilwand- und der Monolithmethode nach BÖHM (1979) bestimmt. Das Wurzelwachstum in den Bioporen wurde an der Profilwand geschätzt und mit einer neu entwickelten Methode durch Anfärben der Wurzeln in Bioporen und anschließender Monolithentnahme verglichen.

Die Untersuchungen wurden im Rahmen der DFG-Forschergruppe FOR 1320 „*Crop Sequence and the Nutrient Acquisition from the Subsoil*“ im Teilprojekt 1 „*Biopores in the subsoil: formation, nutrient turnover and effects on crops with distinct rooting systems*“ durchgeführt.

## 1.1. Literaturübersicht

### 1.1.1. Entstehung von Bioporen

Poren beeinflussen maßgeblich die Wasserleitfähigkeit, Durchlüftung und Durchwurzelbarkeit des Bodens. Das Porenvolumen (Porosität) ist der Gesamthohlraum des Bodens, der mit Wasser oder Luft gefüllt ist (MÜCKENHAUSEN 1985). Die klassische Einteilung der Porengrößen nach ihrem Durchmesser bezieht sich auf ihr Vermögen, Wasser zu halten. Feinporen ( $<0,2 \mu\text{m}$  Durchmesser) enthalten Haftwasser, während das Wasser in Mittelporen ( $0,2\text{--}10 \mu\text{m}$ ) pflanzenverfügbar ist. In Grobporen ( $>10 \mu\text{m}$ ) kann das Wasser nicht gegen die Schwerkraft gehalten werden. Aufgrund ihrer Entstehung werden körnungsbedingte Primärporen von durch Aggregation oder Bodenbearbeitung entstandenen Sekundärporen unterschieden (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1984, MÜCKENHAUSEN 1985).

Des Weiteren kann eine Unterteilung in Mikroporen (kapillar) und Makroporen (nicht kapillar) erfolgen (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1984). Der Begriff Makropore ist dabei nicht einheitlich definiert und wird allgemein für „große kontinuierliche Hohlräume“ verwendet (BEVEN & GERMANN 1982). Makroporen können aufgrund ihrer Morphologie wie folgt eingeteilt werden (BEVEN & GERMANN 1982, RINGROSE-VOASE 1996, LAMANDÉ et al. 2011):

- quasi-zylindrische Bioporen, durch verrottende Wurzeln und grabende Bodentiere geschaffen
- planare Risse, durch physikalische Prozesse (Quellen/Schrumpfen, Gefrieren/Tauen) geformt
- nicht regelmäßig geformte Poren zwischen Aggregaten (meist im Oberboden), durch Bodenbearbeitung oder Tiere entstanden

Der Begriff Biopore wird in der vorliegenden Arbeit für die von MÜCKENHAUSEN (1985) beschriebenen „biogenen, röhrenartigen Hohlräume, d.h. die durch Wurzeln und Bodentiere (Würmer) geschaffenen, vornehmlich vertikal im Boden verlaufenden Hohlräume“ verwendet (EHLERS et al. 1983, JAKOBSEN & DEXTER 1988, DEXTER 1991). Der Fokus wird gemäß der Klassifikation nach BREWER (1964) auf Bioporen der Größenklassen 2–5 mm und  $> 5 \text{ mm}$  gelegt.

#### Bioporengese durch Wurzelwachstum

Wurzeln dienen der Pflanze zur Verankerung im Boden sowie zur Wasser- und Nährstoffaufnahme. Die Wurzel erschließt den Boden durch Spitzenwachstum des Apikalmeristems. Dabei wird dieser empfindliche Teil durch die Wurzelhaube aus parenchymatischen Dauerzellen geschützt (ADL 2003). Das Streckungswachstum erfolgt ausschließlich in einer Zone von 5–10 mm hinter dem Apikalmeristem, wodurch eine Verkrümmung der gesamten Wurzel gegen den

## 1. Einleitung

---

Widerstand des Bodens vermieden wird. Mit zunehmendem Alter steigt der Wurzeldurchmesser in Abhängigkeit vom Wurzelsystem und der Pflanzenart.

Monokotyledonen bilden homorhize sprossbürtige Wurzelsysteme aus, in denen alle Wurzeln morphologisch gleichwertig sind. Demgegenüber bilden Dikotyledonen meist allorhize Systeme mit Pfahlwurzeln, die ein sekundäres Dickenwachstum zeigen (FAGERIA 2012). Beim Dickenwachstum dehnt sich die Wurzel radial aus und verdichtet den direkt angrenzenden Boden, der in der Folge höhere Lagerungsdichten als der *bulk*-Boden aufweist (DEXTER 1987, STIRZAKER et al. 1996). Durch die Ausdehnung der Wurzel geht im angrenzenden Boden Porenvolumen verloren, das dem Volumen der lebenden Wurzel entspricht (DEXTER 1987, GREGORY 2006). Durch Wurzelwachstum werden physikalische Eigenschaften des Bodens, insbesondere die Porengröße und -kontinuität, verändert (ELKINS 1985). Die Einflüsse auf den Boden variieren mit der Pflanzenart aufgrund unterschiedlicher Wurzelsysteme und Durchwurzelungstiefen (BENJAMIN et al. 2007).

Die durch Wurzeln gebildeten Bioporen sind erst nach der Zersetzung der abgestorbenen Wurzel verfügbar (DEXTER 1991, JONES et al. 2004). Die Abbaurate von Wurzeln hängt dabei hauptsächlich von der Bodenfeuchte (LARREGUY et al. 2012), der Bodentemperatur (WILDUNG et al. 1975) und der Bodentextur (GILL & BURKE 2002) ab. Diese Parameter verändern sich mit der Bodentiefe ebenso wie die Bodenflora und -fauna, die an der Zersetzung organischer Substanz beteiligt sind. In einem Experiment, in dem Beutel mit frischen Wurzeln in verschiedenen Bodentiefen vergraben wurden, ermittelten GILL & BURKE (2002) in 1 m Tiefe im Vergleich zu 10 cm Bodentiefe um 50 % verminderte Abbauraten. Auch der Nährstoffgehalt des Bodens und die Zusammensetzung der Wurzeln (Kohlenstoff, Stickstoff, Zellulose, Lignin) beeinflusst die Abbaurate (SUN et al. 2013). WEST et al. (2004) stellten eine erhöhte Abbaurate von feinen Baumwurzeln in Böden mit hoher Stickstoffverfügbarkeit fest. GIJSMAN et al. (1997) zeigten, dass Phosphormangel im Boden die Zersetzung von Wurzeln verlangsamt. In Versuchen zur Stickstoffmineralisierung aus Luzernewurzeln stellten BOLGER et al. (2003) bei groben Wurzeln aufgrund eines hohen C:N-Verhältnis eine N-Immobilisation im Vergleich zur N-Freisetzung aus jungen Wurzeln mit geringerem C:N-Verhältnis fest.

In einigen Feldversuchen wurden Einflüsse des Wurzelwachstums auf die Bioporendichte demonstriert. Nach einjährigen Kulturen (Weizen, Raps) stellten MCCALLUM et al. (2004) eine Bioporendichte (Durchmesser > 2 mm) von 68 Poren·m<sup>-2</sup> fest. Durch mehrjährigem Anbau von Luzerne (4 Jahre) wurde die Bioporendichte signifikant um 160 Poren·m<sup>-2</sup> und durch Glangras (10 Jahre Anbaudauer) um 122 Poren·m<sup>-2</sup> erhöht (MCCALLUM et al. 2004). Nach vier Jahren Bodenruhe mit kontinuierlichem Luzerne- oder Kleegrasanbau erzielten KAUTZ et al. (2010) höhere Dichten von Mittel- (2–5 mm) und Grobporen (> 5 mm) in 35 cm Bodentiefe im Vergleich zur Fruchtfolge mit jährlicher Pflugbearbeitung. In einem Versuch mit verholzenden Arten wurde erst nach 20 Monaten Rotte der Wurzeln eine Erhöhung der Bioporendichte festgestellt (YUNUSA et al. 2002).

Aufgrund ihrer Genese haben durch Wurzeln geschaffene Poren bestimmte Eigenschaften, die im Folgenden näher erläutert werden. Die lebende Wurzel reagiert auf ihre Umwelt und

sondert diverse Stoffe in den Boden ab. Diese Rhizodepositionen bestehen aus Exsudaten (z. B. Zucker, Aminosäuren), Enzymen, Lysaten (bei der Autolyse der Zelle freigesetzt) und Gasen wie etwa Ethylen oder CO<sub>2</sub> (LYNCH & WHIPPS 1990). Nach dem Absterben der gesamten Wurzel verbleibt organisches Material in Form von teilweise zersetztem Wurzelgewebe und Abbauprodukten der Wurzel in den Poren. MCCALLUM et al. (2004) beschreiben, dass 10 Monate nach dem Absterben der Luzerne die äußere Hülle der Luzernewurzeln in Form der Endodermis noch an der Porenwand anlag, ansonsten aber nur der teilweise zersetzte Strang der Xylem-Gefäße übrig war. Die Residuen der Wurzeln beeinflussen die mikrobielle Gemeinschaft, die unter anderem aus Mykorrhiza, Pathogenen und symbiotischen Mikroorganismen besteht (LYNCH & WHIPPS 1990).

Der Unterboden ist die Bezeichnung für den Boden unterhalb des bearbeiteten Ap-Horizonts (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1984). Durch Wurzeln geschaffene Bioporen haben einen Einfluss auf den Wasserhaushalt des Bodens. Beispielsweise resultieren aus einer kontinuierlichen Verbindung zwischen der Bodenoberfläche und dem Unterboden höhere Wasserinfiltrationsraten (YUNUSA et al. 2002, BRAMLEY et al. 2003).

Wurzelbürtige Poren gelten als besonders stabil (BLACKWELL et al. 1990). In Versuchen konnten MCKENZIE & DEXTER (1988) zeigen, dass die Wurzel im Vergleich zum Regenwurm einen höheren radialen Druck auf die Porenwand ausübt. In einem Feldversuch von MCCALLUM et al. (2004) blieb die durch Luzerne generierte Porendichte im B-Horizont (10–12 cm Bodentiefe) noch nach mindestens zwei folgenden Kulturen unverändert, obwohl der Durchmesser der Poren sank. Durch Luzerne geschaffene Bioporen wiesen in einer Untersuchung von BLACKWELL et al. (1990) bei gleichen Lasten eine höhere mechanische Stabilität und eine bessere Erhaltung des luftgefüllten Porenvolumens auf als künstliche Poren.

### Bioporengese durch anözische Regenwürmer

Regenwürmer beeinflussen die Zersetzung organischer Substanz, den C- und N-Gehalt des Bodens, die Bodenflora und -fauna und durch die Änderung der Bodenaggregatstruktur auch die Porosität und Wasserinfiltration (KOTCON 2011). Während epigäische Arten eher oberflächennahe, horizontale Gänge errichten, legen anözische Arten wie der Tauwurm *Lumbricus terrestris* stabile vertikale Röhren an (ADL 2003).

Regenwürmer schaffen Poren, indem sie Druck auf den umgebenden Boden ausüben. In geringem Maß nehmen sie auch Bodenmaterial auf (GRAFF 1983). Bevorzugt werden Poren in der Nähe von Rissen oder in Zonen geringerer Dichte angelegt (JÉGOU et al. 1998). Von Regenwürmern geschaffene Poren weisen geringere Verdichtungen der Porenwand auf als solche, die durch Pflanzenwurzeln generiert wurden (STIRZAKER et al. 1996).

Die anözische Art *L. terrestris* ernährt sich, indem sie organisches Material von der Bodenoberfläche in ihre Gänge zieht. Bei der Fortbewegung in den Röhren kleidet *L. terrestris* die Wände mit seinem Kot und Schleim aus (STROMBERGER et al. 2012). Der proteinreiche Schleim und der überwiegend aus mineralischen Bestandteilen bestehende Kot tragen zur Stabilisierung der Röhren bei (EDWARDS 2004).

Die Röhrenwand und die beeinflusste Zone von einigen Millimetern um die Wandung herum wird als Drilosphäre bezeichnet (BOUCHÉ 1975, LAVELLE 1988). Die Drilosphäre ist im Vergleich zum *bulk*-Boden durch höhere N-, C- und P-Gehalte (GRAFF 1967, TIUNOV & SCHEU 1999, JÉGOU et al. 2001) und signifikant höhere Ca-, Cu-, Fe- und Mn-Gehalte (PANKHURST et al. 2002) sowie eine andere mikrobielle Gemeinschaft und Fauna gekennzeichnet (STROMBERGER et al. 2012).

Regenwurmröhren, insbesondere solche mit Verbindung zur Bodenoberfläche, erhöhen die Bodendurchlüftung und die Wasserinfiltration (JÉGOU et al. 1998, BROWN et al. 2004). Dieser Sachverhalt kann Erosion vorbeugen und zu einem größeren Wasservorrat im Boden führen (TEBRÜGGE & DÜRING 1999, CHAN 2004). Andererseits ist ein beschleunigter Transport von Schadstoffen wie Pflanzenschutzmitteln in den Unterboden und ins Grundwasser möglich (SHIPITALO et al. 2000).

Die Stabilität von Regenwurmröhren hängt stark von ihrer Ausrichtung ab. Vertikale Röhren sind stabiler als horizontale Röhren, da letztere leichter durch Auflast zerstört werden können (JÉGOU et al. 2002). LAVELLE (1988) gibt an, dass die Röhren während der gesamten Lebenszeit eines Wurms bestehen bleiben können. Diese beträgt bei *L. terrestris* nach GRAFF (1983) bis zu acht Jahre.

Die Abundanz und Diversität der Regenwurmartens wird durch Bodenbearbeitung beeinflusst (CHAN 2001, KLADIVKO 2001). Im Allgemeinen reagieren Regenwürmer negativ auf intensive Bodenbearbeitung und positiv auf Bodenruhe, Grünland, Futterbau mit Gras-Leguminosengemengen und Verwendung von Stallmist (KOTCON 2011). Dies sind Gründe dafür, dass im Ökologischen Landbau zumeist höhere Regenwurmdichten ermittelt werden als in der konventionellen Landwirtschaft (GERHARDT 1997, KOTCON 2011). Anözische Arten wie *L. terrestris* und *Apporrectodea longa*, die beständige Röhren bewohnen und auf Streuzufuhr von der Bodenoberfläche angewiesen sind, sowie epigäische Arten (Streubewohner) werden von wiederholter Bodenbearbeitung stark beeinträchtigt. Demgegenüber können die kleinen endogäischen Arten u. U. sogar von dem eingearbeiteten Material profitieren (CURRY 2004, PELOSI et al. 2009). Der negative Einfluss der Bodenbearbeitung auf Regenwürmer beruht auf physikalischer Verletzung, Verdichtung, Zerstörung der Röhren — und damit Verlust von Schutz vor Frost, Trockenheit und Fraßfeinden — und schließlich der geänderten Verfügbarkeit von organischer Substanz (ROGER-ESTRADE et al. 2010).

### 1.1.2. Wurzelwachstum in Bioporen

Das Wurzelwachstum wird durch physikalische, chemische und biologische Eigenschaften des Bodens beeinflusst. Die Ausdehnung der Wurzel wird insbesondere durch den Eindringwiderstand limitiert (CRESSWELL & KIRKEGAARD 1995, BENGOUGH 2012). Dieser wird sowohl durch die Lagerungsdichte und den Wassergehalt des Bodens als auch durch deren Wechselwirkungen bedingt (GREGORY 2006, BENGOUGH et al. 2011). Da die Wurzel Sauerstoff für die Atmung benötigt (VOESENEK et al. 2006), kann Sauerstoffmangel in wassergesättigten

oder schlecht belüfteten Böden zur Begrenzung des Wachstums und der Nährstoffaufnahme führen (DREW 1983).

Poren bieten aufgrund des im Vergleich zum *bulk*-Boden geringen Widerstands und wegen der günstigen Belüftung und der dadurch höheren Verfügbarkeit von Sauerstoff potentielle Vorteile für das Wurzelwachstum. Ausscheidungen von Wurzeln und Regenwürmern sowie die Überreste abgestorbener Wurzeln führen dazu, dass die Nährstoffgehalte der Porenwände gegenüber dem *bulk*-Boden erhöht sind (TIUNOV & SCHEU 1999, McMAHON & CHRISTY 2000). Zudem lässt sich eine erhöhte Nährstoffverfügbarkeit feststellen, die aus der hohen biologischen Aktivität im Bereich der Pore und der Umsetzung von organischer Substanz durch Mikroorganismen resultiert (STEWART et al. 1999).

GRAFF (1971) konnte in einem Feldversuch zeigen, dass das pflanzliche Wachstum durch Regenwurmröhren positiv beeinflusst werden kann. Nach der Austreibung von Regenwürmern wurde unmittelbar neben den leerstehenden Röhren Hafer oder Raps gepflanzt bzw. gesät. Die Kontrollpflanzen wurden zwischen den Röhren angebaut. Die unmittelbar neben Röhren angebauten Pflanzen bildeten eine größere Masse und zeigten eine höhere Aufnahme von Phosphor und Kalium als die Kontrollpflanzen. MCCALLUM et al. (2004) stellten bei zwei von zwölf Kulturen nach Luzerne eine erhöhte Aufnahme von Wasser aus dem Unterboden fest, die in einem Fall auch ertragswirksam war. Die geringe Ertragswirksamkeit führten die Autoren auf ideale Witterungsbedingungen für die nachfolgenden Kulturen in den drei Versuchsjahren zurück, da es weder Staunässe im Winter noch Wassermangel nach der Blüte gab.

Manche Eigenschaften von Bioporen können allerdings auch negativ auf das Wurzelwachstum wirken. STEWART et al. (1999) vertreten die These, dass die verdichtete Porenwand ein Auswachsen von Wurzeln aus der Pore verhindern kann und es dadurch zu einer Anhäufung von Wurzeln kommt, die miteinander konkurrieren. Es ist zudem nicht bekannt, zu welchem Anteil die Wurzeloberfläche tatsächlich Kontakt zur Porenwand hat. Dies ist aber eine Voraussetzung dafür, dass die Pflanze von den erhöhten Nährstoffkonzentrationen profitieren kann (KAUTZ & KÖPKE 2010). Zudem können durch pathogene Pilze (z. B. *Pythium*, *Rhizoctonia*) oder Bakterien (z. B. *Pseudomonas* spp.) ausgelöste Krankheiten beispielsweise durch Kontakt mit den Wurzeln der Kultur des Vorjahres übertragen werden (WATT et al. 2005). Durch eine geeignete Fruchtfolge kann diesem Risiko jedoch entgegen gewirkt werden (KRUPINSKY et al. 2002, HWANG et al. 2009). Aus diesen Gründen wird der Einfluss von Poren auf das Wurzelwachstum ambivalent beurteilt.

Die meisten Autoren vertreten die Auffassung, dass das Wurzelwachstum im Unterboden hauptsächlich oder sogar ausschließlich in Bioporen stattfindet (KLÄSENER 1924, EHLERS et al. 1983, NAKAMOTO 1997). Der mechanische Widerstand, auf den die Wurzeln in Bodenrissen, aber auch in Bioporen treffen, ist wesentlich geringer als im *bulk*-Boden (BALL et al. 2005). Insbesondere Regenwurmröhren werden als förderliche Ausbreitungspfade für das Wurzelstreckungswachstum angesehen (FINCK 1952, EHLERS et al. 1983, WANG et al. 1986, HIRTH et al. 1997). Schon HENSEN (1892) beobachtete das Wurzelwachstum in Regenwurmröhren bis in 180 cm Bodentiefe und stellte fest, dass in tiefen Bodenschichten

praktisch alle Wurzeln in solchen Bioporen wuchsen. Er konnte aber zugleich auch das Auswachsen von feinen Wurzeln aus den Poren beobachten. KLÄSENER (1924) untersuchte die Wurzeln von Kartoffeln, indem die Wurzeln von oben nach unten sukzessive freigelegt wurden. Ab 100 cm Bodentiefe wurden alle Wurzeln in Regenwurmgängen festgestellt. Bei Untersuchungen mithilfe der Profilwandmethode an Hafer fanden EHLERS et al. (1983) die meisten Wurzeln im tieferen Unterboden (zwischen 55 und 80 cm Bodentiefe) in Bioporen, während der Wurzelanteil im *bulk*-Boden sehr gering war. Andere Autoren verorten, vermutlich auch methodisch bedingt, nur einen geringen Anteil der Wurzeln in Bioporen. So machte der Anteil von Wurzeln in Regenwurmröhren (gemittelt über die Arten *Medicago sativa* L., *Cichorium intybus* L., *Lolium perenne* L. und *Trifolium repens* L.) in einer Untersuchung mit Minirhizotronen in gesiebttem und rückverdichtetem Boden von SPRINGETT & GRAY (1997) nur 2 bis 3 % aus.

### 1.1.3. Quantifizierung von Wurzelsystemen

Die Feststellung von WEAVER (1926), dass es nur aufwendige Methoden gibt, um Wurzelsysteme zu erfassen, hat bis heute Bestand (BÖHM 1979, SMIT et al. 2000a). So wurde das Wurzelsystem von WASEL & ESHEL (2002) als „verborgene Hälfte“ (*hidden half*) der Pflanze bezeichnet. Einerseits muss erst der Boden entfernt werden, um Wurzeln sichtbar zu machen. Andererseits ist das Wurzelsystem aus methodischen Gründen im Vergleich zum Spross weniger intensiv erforscht worden (KÖPKE 1981). Viele Wurzeluntersuchungen wurden in künstlichen Substraten oder in Nährlösungen im Labor durchgeführt. Die so gewonnenen Erkenntnisse lassen sich selten direkt auf die Verhältnisse im natürlich gewachsenen Boden übertragen.

POLOMSKI & KUHN (2002) unterteilen das große Spektrum der verfügbaren Methoden zur Wurzeluntersuchung in Ausgrabungsmethoden (*excavation methods*), direkte Methoden, mit denen *in situ* untersucht wird, Markierungsmethoden und Gefäßversuche.

Die Ausgrabungsmethoden umfassen das trockene Freilegen von Wurzeln, die Entnahme von Bodenproben mit einem definierten Volumen und den Einsatz von Gazebeuteln. Das trockene Freilegen von Wurzeln wird in einer Grube durchgeführt. Dabei werden die Wurzeln einer Pflanze von oben beginnend mit einem spitzen Werkzeug verfolgt (WEAVER 1926, KUTSCHERA et al. 2009). Es ergibt sich ein qualitatives Bild der Wurzelarchitektur mit Wurzelausdehnung und -tiefe, das zeichnerisch oder fotografisch festgehalten werden kann. Bei der Entnahme von Bodenproben mit definiertem Volumen in Form von Monolithen oder Stechzylindern muss das Wurzelmaterial vom Boden getrennt werden. Dies geschieht meist durch Auswaschen der Wurzeln mit Wasser (BÖHM 1979). Die ausgewaschenen Wurzeln werden dann sortiert und beispielsweise mit einem Computerprogramm hinsichtlich Wurzellänge und -durchmesser analysiert (BOUMA et al. 2000, MENG-BEN & QIANG 2009). Des Weiteren kann auch eine Bestimmung des Wurzelgewichts erfolgen.

Die Monolithmethode zeigte in einem Methodenvergleich zur Erfassung der Wurzellängen-

dichte die höchste Treffgenauigkeit (KÖPKE 1979 1981). Um zusätzlich auch die Wurzelarchitektur zu erfassen, kann die Nadelbrettmethode angewandt werden. Die Wurzeln verbleiben dabei durch gitterförmig angeordnete Nadeln beim Auswaschen in der Nähe ihres Ursprungsortes (BÖHM 1979). Ein weiteres Verfahren ist der Einsatz von Gaze-Beuteln, die mit einem definierten Volumen wurzelfreien Substrats gefüllt sind und im Boden vergraben werden, so dass die zu untersuchenden Wurzeln einwachsen (STEINGROBE et al. 2000). Diese Methode eignet sich beispielsweise für den Vergleich der Wurzelwachstumsdynamik zweier Behandlungen (POLOMSKI & KUHN 2002). Alle Ausgrabungsmethoden erfordern einen hohen Arbeitsaufwand.

Für die *in situ*-Beobachtung und Quantifizierung der Wurzellängendichte eignen sich die Profilwandmethode sowie der Einsatz von Wurzelfenstern und Minirhizotronen. Bei der Profilwandmethode wird nach dem Abspülen einer definierten Bodenschicht von einer vertikalen Wand die Wurzellänge mithilfe eines Gitters geschätzt (BÖHM 1979). Bei dieser Methode werden Wurzellängen im Allgemeinen unterschätzt. Trotzdem lassen sich Variantenunterschiede mit vergleichsweise geringem Aufwand mit hoher Wiederholungsgenauigkeit statistisch differenzieren (KÖPKE 1979). Ein Wurzelfenster besteht aus einer Glasscheibe, die an eine vertikale Wand gepresst wird, um das Wurzelwachstum auch über mehrere Vegetationsperioden zu beobachten (BÖHM 1979). Dabei kann sowohl das Absterben von Wurzeln als auch der Zuwachs beobachtet werden. Methodische Schwierigkeiten können sich vor allem bei einer zu intensiven Durchwurzelung ergeben. Außerdem können durch Trockenheit Risse zwischen Boden und Glas entstehen, in denen Wurzeln bevorzugt wachsen (BÖHM 1979). Eine neuere Methode mit einem ähnlichen Anwendungsspektrum ist das Minirhizotron. Hier werden durchsichtige Röhren meist schräg in den Boden eingebracht und Bilder mit einer Kamera aufgenommen, die anschließend mit einem Computerprogramm analysiert werden (HEERAMAN & JUMA 1993). Ein großer Vorteil der Methode ist der geringe Zeit-, Kosten- und Arbeitsaufwand sowie die Möglichkeit, kontinuierliche Untersuchungen durchzuführen (AMATO et al. 2012). Nachteilig kann sich die Häufung von Wurzeln am Übergang vom Boden zur Plastikröhre auswirken.

Für Gefäßversuche und klassische Rhizotrone bietet sich die Möglichkeit des Einsatzes nicht-invasiver bildgebender Verfahren wie Röntgen- und Magnetresonanztomographie oder Gamma-Computertomographie (ASSENG et al. 2000). So können dreidimensionale Bilder des Wurzelsystems erschlossen werden. Eine Limitation dieser Verfahren besteht darin, dass im Allgemeinen nur geringe Probenvolumina untersucht werden können (ASSENG et al. 2000).

Wurzeln in Gefäß- und Feldversuchen können mithilfe von Isotopen oder durch Einfärben markiert werden (Markierungsmethoden, POLOMSKI & KUHN (2002)). Stabile Isotope (z. B.  $^{13}\text{C}$  und  $^{15}\text{N}$ ) und Radioisotope (z. B.  $^{14}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$  und  $^{32}\text{P}$ ) werden zur Detektion und zur Untersuchung von Prozessen eingesetzt (BINGHAM et al. 2000). So kann beispielsweise die Kohlenstoffdynamik im Boden und die Effektivität der Nährstoff- oder Wasseraufnahme untersucht werden (BINGHAM et al. 2000). Mithilfe von Färbemethoden können qualitative Aussagen getroffen werden. So kann z. B. TTC (2,3,5-Triphenyltetrazoliumchlorid) als Indikator

für die Vitalität der Wurzeln genutzt werden, da sich das Wurzelgewebe bei vorhandener Respiration rot färbt (POLOMSKI & KUHN 2002, STÜRITTE et al. 2005) Eine Anfärbung von Stärke in der Wurzel mit Iod lässt Rückschlüsse auf die Photosyntheseleistung der Pflanze zu (POLOMSKI & KUHN 2002).

Das Spektrum der Methoden zur Erfassung des Wurzelwachstums in Bioporen ist umfangreich. Es reicht von einer manuellen Freilegung mittels Messer und anschließender visueller Bonitur (HENSEN 1892, KLÄSENER 1924) über die Profilwandmethode (EHLERS et al. 1983), Minirhizotrone (SPRINGETT & GRAY 1997, RASSE & SMUCKER 1998), Freilegung horizontaler Flächen im Rahmen der Bioporenerfassung (PITKÄNEN & NUUTINEN 1997) bis zum Auskratzen der Pore (PIERRET et al. 1999) und der Betrachtung des Poreninnenraums mit einem flexiblen Video-Endoskop (KAUTZ & KÖPKE 2010).

### 1.1.4. Quantifizierung von Bioporensystemen

Messgrößen, die zur Quantifizierung von Bioporensystemen herangezogen werden, sind Porendichte und -durchmesser, oft bezogen auf ausgewählte Bodentiefen. Weitere beschreibende Parameter sind die Morphologie und Kontinuität der Poren bzw. des Porensystems. Liegt das Augenmerk auf kleinen Skalen (kleiner 1 mm), werden meist Stechzylinder verwendet. Für Porendurchmesser größer 1 mm werden in der Regel größere Flächen direkt im Feld untersucht.

Der Durchmesser der verwendeten Stechzylinder, die untersuchten Porendurchmesser und deren Einteilung in Klassen variiert in hohem Maß zwischen einzelnen Studien (VOLKMAR & ENTZ 1995, YUNUSA et al. 2002). Die Poren werden meist an Bruchflächen gezählt, um Verschmierungen zu vermeiden (WUEST 2001, YUNUSA et al. 2002). Die Zylinder können aber auch in Stücke gesägt werden (VOLKMAR & ENTZ 1995). Mit einem Vergrößerungsglas können die Poren direkt an der Probe (YUNUSA et al. 2002) oder alternativ anhand eines Fotos (WUEST 2001, VOLKMAR & ENTZ 1995) gezählt werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Auswertung von Bildern mithilfe eines Computerprogramms. Bei der Analyse eines Fotos hängt die Erfassung von Poren mit kleinen Durchmessern stark von der Auflösung der Bilder ab (WUEST 2001). MARTINO & SHAYKEWICH (1994) ermittelten die Porengrößenverteilung nach der Standardmethode indirekt über den kapillaren Aufstieg und die Wassergehalte des Stechzylinders bei verschiedenen Wasserspannungen.

Steht die Erfassung von Poren größer 1 mm im Vordergrund, wird meist eine Fläche direkt auf dem Feld horizontal freigelegt und entweder vor Ort oder später anhand eines Fotos oder einer Folie ausgezählt (SHIPITALO & LE BAYON 2004). In den meisten Versuchen variierte die Größe der insgesamt freigelegten Fläche zwischen 1 m<sup>2</sup> (EHLERS 1975, KAUTZ et al. 2010) und 4 m<sup>2</sup> (MCCALLUM et al. 2004). Lose Bodenteilchen können mit einem Laub- oder Staubsauger entfernt werden (MCCALLUM et al. 2004, LAMANDÉ et al. 2011). EHLERS et al. (1983) trockneten dazu zunächst die Oberfläche mit einem Butangasbrenner. Um die Orientierung auf der Fläche zu erleichtern, kann ein Gitter verwendet werden. Zusätzlich

können für die Zuordnung der Poren zu einer Durchmesserklasse Bohreinsätze mit verschiedenen Durchmessern genutzt werden (WANG et al. 1986). Anstelle des Gitters kann eine durchsichtige Folie auf die Bodenoberfläche gelegt werden, auf der die Poren entsprechend ihrem Durchmesser markiert werden (LAMANDÉ et al. 2011). Alternativ kann auch ein Foto der Fläche aufgenommen werden. In beiden Fällen werden anschließend die Poren entweder gezählt oder mithilfe eines Computerprogramms analysiert (LAMANDÉ et al. 2011). Üblicherweise wird so in mehreren Bodentiefen die Anzahl Poren in festgelegten Durchmesserklassen ermittelt.

Um mehr über die Morphologie und Kontinuität von großen Poren zu erfahren, können diese mit verschiedenen Materialien (z. B. Blei, Wachs, Kunstharz) ausgegossen und anschließend freigelegt werden (SHIPITALO & LE BAYON 2004). Ein anderer Ansatz besteht darin, Farbstoff versickern zu lassen und anschließend die markierten Poren freizulegen (EHLERS 1975, BEVEN & GERMANN 1982).

Neuere Verfahren nutzen zur Erfassung von Bioporensystemen die Magnetresonanztomographie oder Röntgenstrahlen. Der Vorteil von Röntgencomputertomographie besteht in der nicht destruktiven Beprobung und dem Erhalt von dreidimensionalen Bildern des Porensystems (JÉGOU et al. 1998). Nachteile sind hohe Kosten für die Geräte und ein hoher Aufwand für die Bildauswertung sowie das durch die Kapazität der Geräte begrenzte Probenvolumen (ASSENG et al. 2000).

### 1.2. Hypothesen

Der zentrale Feldversuch der DFG-Forschergruppe war in eine Vorfruchtphase und eine Nachfruchtphase mit verschiedenen Fruchtfolgen unterteilt. In der Vorfruchtphase wurde die Einstellung unterschiedlicher Bedingungen für die Bioporengenesse realisiert. Dazu wurden die allorhizen Wurzelsysteme von Luzerne (*Medicago sativa* L.) und Wegwarte (*Cichorium intybus* L.) dem homorhizen Wurzelsystem von Rohrschwengel (*Festuca arundinacea* SCHREB.) kontrastierend gegenübergestellt. Alle Futterpflanzen wurden ein-, zwei- und dreijährig angebaut. Eine längere Anbaudauer und das regelmäßige Mulchen sollte zum einen die Bildung von Wurzeln mit höherem Durchmesser fördern, zugleich aber auch durch Bodenruhe und hohes Futterangebot günstige Bedingungen für Regenwürmer schaffen.

Den Untersuchungen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, lagen folgende Arbeitshypothesen zugrunde:

#### Vorfruchtphase

- H1 Die im Versuch angebauten Futterpflanzen Luzerne (Lu), Wegwarte (Ww) und Rohrschwengel (Rs) unterscheiden sich in ihrer Wurzelentwicklung hinsichtlich Wurzellängendichte (WLD), Wurzeldurchmesser und Durchwurzelungstiefe. Die genannten Parameter werden positiv von der Steigerung der Anbaudauer beeinflusst.
- H2 Die Bioporendichte ist eine Funktion der angebauten Futterpflanzenart und nimmt mit zunehmender Anbaudauer der Futterpflanzen zu. In der Porengrößenklasse > 5 mm werden mehr Bioporen nach den allorhizen Kulturen erwartet.
- H3 a) Die Art der angebauten Futterpflanze beeinflusst die Abundanz und Biomasse anözischer Regenwürmer in der Reihenfolge Lu > Ww, Rs.  
b) Längere Bodenruhe durch mehrjährigen Anbau von Futterpflanzen fördert die Abundanz und Biomasse anözischer Regenwürmer.

#### Nachfruchtphase

- H4 a) Es besteht ein Einfluss der Vorfruchtnutzung auf das Wurzelwachstum von Sommerweizen, Futtermalve, Wintergerste und Wintererbsen.  
b) Mit zunehmender Bioporendichte steigt die Durchwurzelungstiefe.  
c) Im Unterboden weisen Varianten mit hohen Bioporendichten eine höhere WLD auf als Varianten mit niedrigeren Bioporendichten.
- H5 Das Wurzelwachstum von Sommerweizen, Futtermalve, Wintergerste und Wintererbsen findet im Unterboden vorwiegend in Bioporen statt und der Anteil Wurzeln in Bioporen nimmt mit der Bodentiefe zu.

## 2. Material und Methoden

### 2.1. Versuchsstandort

Der Feldversuch wurde auf Schlag III d (50°37'9"N 6°59'29"E) der Lehr- und Forschungsstation der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn am Campus Klein-Altendorf durchgeführt. Klein-Altendorf liegt zwischen Meckenheim und Rheinbach in der Voreifel inmitten eines bedeutenden Obstbaugebietes in der südlichen Niederrheinischen Bucht auf der Hauptterrasse des Rheins. Die landwirtschaftlich genutzte Fläche beträgt 181 ha und wird hauptsächlich mit Zuckerrübe, Weizen und Gerste konventionell bestellt. Die tiefgründige steinfreie Normparabraunerde aus Löss erreicht Bodenzahlen von 85–90 und eignet sich gut für Wurzeluntersuchungen.

#### 2.1.1. Boden

Die Bodenparameter wurden anhand eines Leitprofils bestimmt (PÄTZOLD et al. 2010) (Tab. 1; Abb. 3). Der Pflughorizont (Ap-Horizont) reicht bis 27 cm Bodentiefe. Der für Parabraunerden typische Bt-Horizont ist stark ausgeprägt und reicht von 27 cm bis 127 cm Bodentiefe. Der Tonanreicherungshorizont weist Tongehalte bis 30 % und relativ hohe Lagerungsdichten von 1,42 g·cm<sup>-3</sup> bis 1,52 g·cm<sup>-3</sup> auf. Unterhalb von 115 cm Bodentiefe nimmt die Lagerungsdichte auf 1,46 g·cm<sup>-3</sup> bzw. 1,47 g·cm<sup>-3</sup> ab. Der Boden ist im B-Horizont mit Gefügeformen von Polyedern über Subpolyeder und Prismen heterogen strukturiert. Im C-Horizont liegt ein Ko-

**Tab. 1: Lagerungsdichte [g·cm<sup>-3</sup>]<sup>a</sup>, organischer Kohlenstoffgehalt (C<sub>org</sub>) [g·kg<sup>-1</sup>]<sup>a</sup> und Textur: Sand (S), Schluff (U) und Ton (T) [%]<sup>a</sup> als Funktion der Bodentiefe [cm].**

Bodentiefe	Horizonte KA5 <sup>b</sup>	Lagerungsdichte	C <sub>org</sub>	pH <sup>c</sup>	Textur			Bodengefüge <sup>d</sup>
					S	U	T	
0–27	Ap	1,29	10,0	6,5	8	77	15	sub
27–41	Al+Bt	1,32	4,6	6,9	5	74	20	pol-sub
41–75	Bt1	1,42	4,5	6,9	4	69	27	pol-pri
75–87	Bt2 (h)	1,52	3,9	6,9	4	65	30	pri-pol
87–115	Bvt	1,52	2,5	7,1	5	70	25	sub
115–127	Btv	1,46	2,6	7,3	5	72	23	sub
> 127	eC	1,47	–	7,4	8	75	13	koh

<sup>a</sup> Daten von Stefan Pätzold, Doris Vetterlein, Reinhold Jahn

<sup>b</sup> Bodenkundliche Kartieranleitung 2005, 5. Auflage

<sup>c</sup> gemessen in CaCl<sub>2</sub>-Lösung

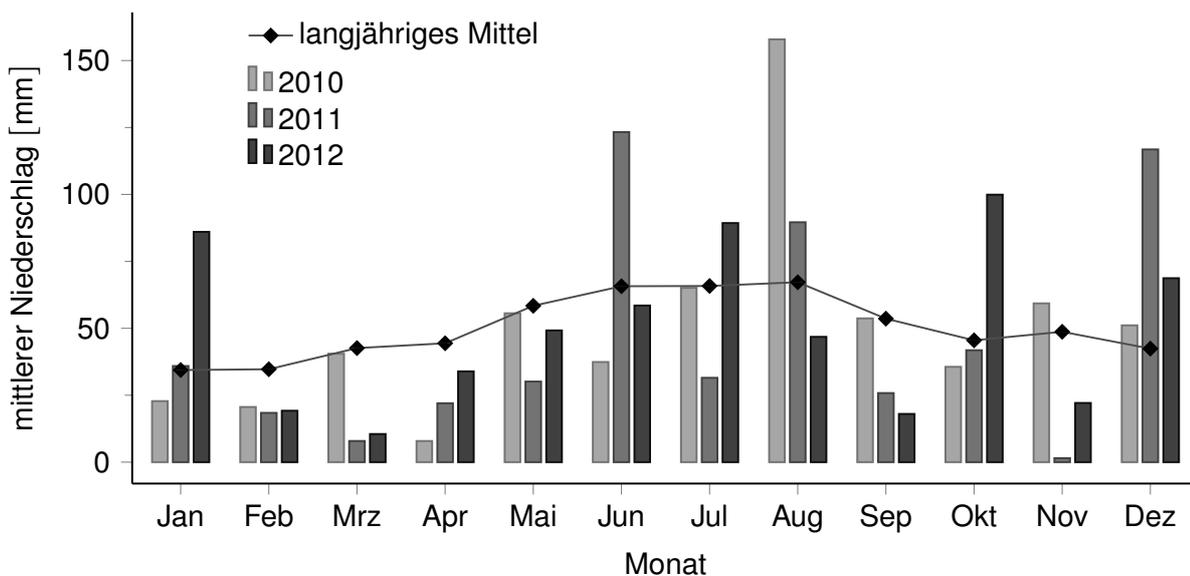
<sup>d</sup> sub=Subpolyeder, pol=Polyeder, pri=Prismen, koh=Kohärent

härentgefüge vor, welches aus mergeligem Lockersubstrat (Löss) mit hohen Carbonatgehalten besteht. Die pH-Werte liegen innerhalb des optimalen Bereichs für Pflanzenwachstum und Nährstoffverfügbarkeit (SPONAGEL 2005) und verlaufen von sehr schwach sauer (Ap-Horizont) über neutral (27–115 cm) nach sehr schwach alkalisch unterhalb von 115 cm Bodentiefe. Die organischen Kohlenstoffgehalte ( $C_{org}$ ) betragen im Ap-Horizont  $10,0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  und sinken im Unterboden mit zunehmender Bodentiefe von  $4,6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  in 27–41 cm auf  $2,6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  in 115–127 cm Bodentiefe.

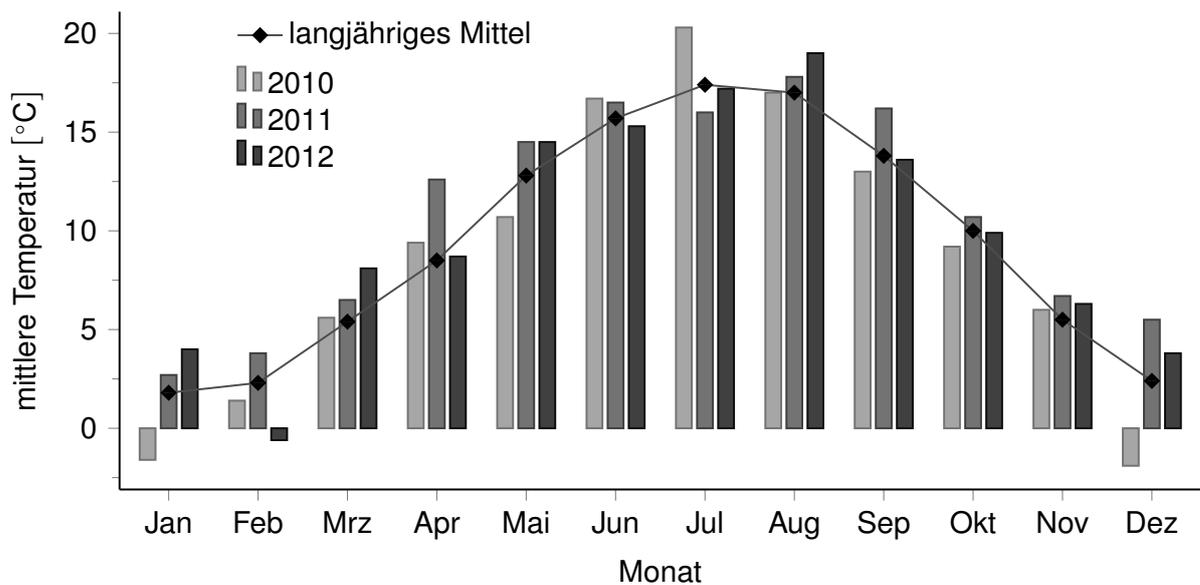
### 2.1.2. Klima und Witterung

Klein-Altendorf liegt mit einem mittleren Jahresniederschlag von 603 mm im Regenschatten der Eifel. Die mittlere Jahrestemperatur beträgt  $9,4 \text{ }^\circ\text{C}$  (Anhang-Tab. 1, S. 122). Die mittlere Temperatur und der mittlere Niederschlag im Verlauf der Monate sind für die Versuchsjahre 2010 bis 2012 im Vergleich zum langjährigen Mittel in Abb. 1 und Abb. 2 dargestellt.

Das Versuchsjahr 2010 war vergleichsweise trocken. Von Januar bis Juli fielen in der Summe etwa 96,2 mm weniger Niederschlag als im Durchschnitt der Jahre. Im Juni und Juli waren die Temperaturen gegenüber dem langjährigen Mittel erhöht. Der Juni war mit 37 mm (davon 22 mm Niederschlag am 06.06.2010) unterdurchschnittlich trocken. In der ersten Hälfte des Versuchsjahres 2011 waren die Temperaturen überdurchschnittlich hoch. Von Februar bis Mai war die Niederschlagssumme geringer als im Mittel der Jahre. Die gesamten Niederschläge im Juni waren mit 123 mm etwa doppelt so hoch wie gewöhnlich (42,5 mm Niederschlag davon am 05.06.2011). Das Frühjahr 2012 begann mit einem feuchtem Januar, gefolgt von überdurchschnittlich trockenen Monaten Februar und März. Mit Ausnahme des Februars waren



**Abb. 1: Mittlerer Niederschlag** im Vergleich zum langjährigen Mittel ( $\varnothing$  1956-2010). Gemessen an der Wetterstation Campus Klein-Altendorf, die in direkter Nähe zum Versuch in Obstanlagen installiert ist.



**Abb. 2: Mittlere Temperatur** im Vergleich zum langjährigen Mittel ( $\bar{\varnothing}$  1956-2010). Gemessen an der Wetterstation Campus Klein-Altendorf, die in direkter Nähe zum Versuch in Obstanlagen installiert ist.

die Temperaturen bis Mai vergleichsweise hoch.

## 2.2. Versuchsanlage

Der Versuch bestand aus einer Vorfruchtphase, in der eine Prägung des Bodens durch den Anbau verschiedener Futterpflanzenarten erfolgte, sowie einer Nachfruchtphase mit differenzierten Fruchtfolgen (Tab. 2). Die Vorfrüchte wurden nach ihrem Wurzelsystem ausgewählt. Luzerne (*Medicago sativa* L., Leguminose) und Wegwarte (*Cichorium intybus* L.) bilden ein ausgeprägtes Pfahlwurzelsystem, wohingegen Rohrschwengel (*Festuca arundinacea* SCHREB.) das homorhize Wurzelsystem der Gräser besitzt. Die Anbaudauer der Vorfrüchte betrug ein bis drei Jahre.

Der Versuch wurde als dreifaktorielle Streifenanlage 'A+(B+C)-Bl' mit vier Feldwiederholungen (Blöcke) angelegt. Dabei bezeichnet 'A' die Vorfruchtart, 'B' die Anbaudauer der Vorfrucht, 'C' die Nachfrüchte und 'Bl' den Block (THOMAS 2006). Aus versuchstechnischen Gründen wurde auf eine vollständige Randomisierung verzichtet. Die Vorfrüchte wurden in Streifen angebaut. Die Anbaudauer der Vorfrüchte wurde in Großteilstücken realisiert (Abb. 3). Die 108 Parzellen (27 Varianten, vier Feldwiederholungen) nahmen jeweils eine Fläche von 60 m<sup>2</sup> (6 × 10 m) ein. Innerhalb eines Blocks wurden 3 m breite Wege angelegt. Zwischen den Blöcken waren diese 9 m breit. Der Versuch umfasste somit insgesamt eine Fläche von 9234 m<sup>2</sup> (171 × 54 m). Der gesamte Feldversuch wurde zeitlich versetzt wiederholt. Versuch A wurde 2007 angelegt. Auf einer unmittelbar benachbarten Fläche wurde zwei Jahre später Versuch B etabliert.

**Tab. 2: Variantenübersicht.** Die erste Jahreszahl bezieht sich jeweils auf Versuch A, die zweite auf Versuch B.

Variante	Vorfruchtphase				Nachfruchtphase		
	2007/09	2008/10	2009/11		2010/12 (1. Nachfrucht)	2011/13 (2. Nachfrucht)	2012/14 (3. Nachfrucht)
1	Sommerroggen	Hafer	Luzerne	Lu1	Futtermalve	Wintergerste	Winterroggen
2	Sommerroggen	Hafer	Luzerne	Lu1	Sommerweizen	Winterraps	Winterroggen
3	Sommerroggen	Hafer	Luzerne	Lu1	Sommerweizen	Wintergerste	Winterraps
4	Sommerroggen	Luzerne	Luzerne	Lu2	Futtermalve	Wintergerste	Winterroggen
5	Sommerroggen	Luzerne	Luzerne	Lu2	Sommerweizen	Winterraps	Winterroggen
6	Sommerroggen	Luzerne	Luzerne	Lu2	Sommerweizen	Wintergerste	Winterraps
7	Luzerne	Luzerne	Luzerne	Lu3	Futtermalve	Wintergerste	Winterroggen
8	Luzerne	Luzerne	Luzerne	Lu3	Sommerweizen	Winterraps	Winterroggen
9	Luzerne	Luzerne	Luzerne	Lu3	Sommerweizen	Wintergerste	Winterraps
10	Sommerroggen	Hafer	Wegwarte	Ww1	Futtermalve	Wintergerste	Winterroggen
11	Sommerroggen	Hafer	Wegwarte	Ww1	Sommerweizen	Winterraps	Winterroggen
12	Sommerroggen	Hafer	Wegwarte	Ww1	Sommerweizen	Wintergerste	Winterraps
13	Sommerroggen	Wegwarte	Wegwarte	Ww2	Futtermalve	Wintergerste	Winterroggen
14	Sommerroggen	Wegwarte	Wegwarte	Ww2	Sommerweizen	Winterraps	Winterroggen
15	Sommerroggen	Wegwarte	Wegwarte	Ww2	Sommerweizen	Wintergerste	Winterraps
16	Wegwarte	Wegwarte	Wegwarte	Ww3	Futtermalve	Wintergerste	Winterroggen
17	Wegwarte	Wegwarte	Wegwarte	Ww3	Sommerweizen	Winterraps	Winterroggen
18	Wegwarte	Wegwarte	Wegwarte	Ww3	Sommerweizen	Wintergerste	Winterraps
19	Sommerroggen	Hafer	Rohrschwengel	Rs1	Futtermalve	Wintergerste	Winterroggen
20	Sommerroggen	Hafer	Rohrschwengel	Rs1	Sommerweizen	Winterraps	Winterroggen
21	Sommerroggen	Hafer	Rohrschwengel	Rs1	Sommerweizen	Wintergerste	Winterraps
22	Sommerroggen	Rohrschwengel	Rohrschwengel	Rs2	Futtermalve	Wintergerste	Winterroggen
23	Sommerroggen	Rohrschwengel	Rohrschwengel	Rs2	Sommerweizen	Winterraps	Winterroggen
24	Sommerroggen	Rohrschwengel	Rohrschwengel	Rs2	Sommerweizen	Wintergerste	Winterraps
25	Rohrschwengel	Rohrschwengel	Rohrschwengel	Rs3	Futtermalve	Wintergerste	Winterroggen
26	Rohrschwengel	Rohrschwengel	Rohrschwengel	Rs3	Sommerweizen	Winterraps	Winterroggen
27	Rohrschwengel	Rohrschwengel	Rohrschwengel	Rs3	Sommerweizen	Wintergerste	Winterraps

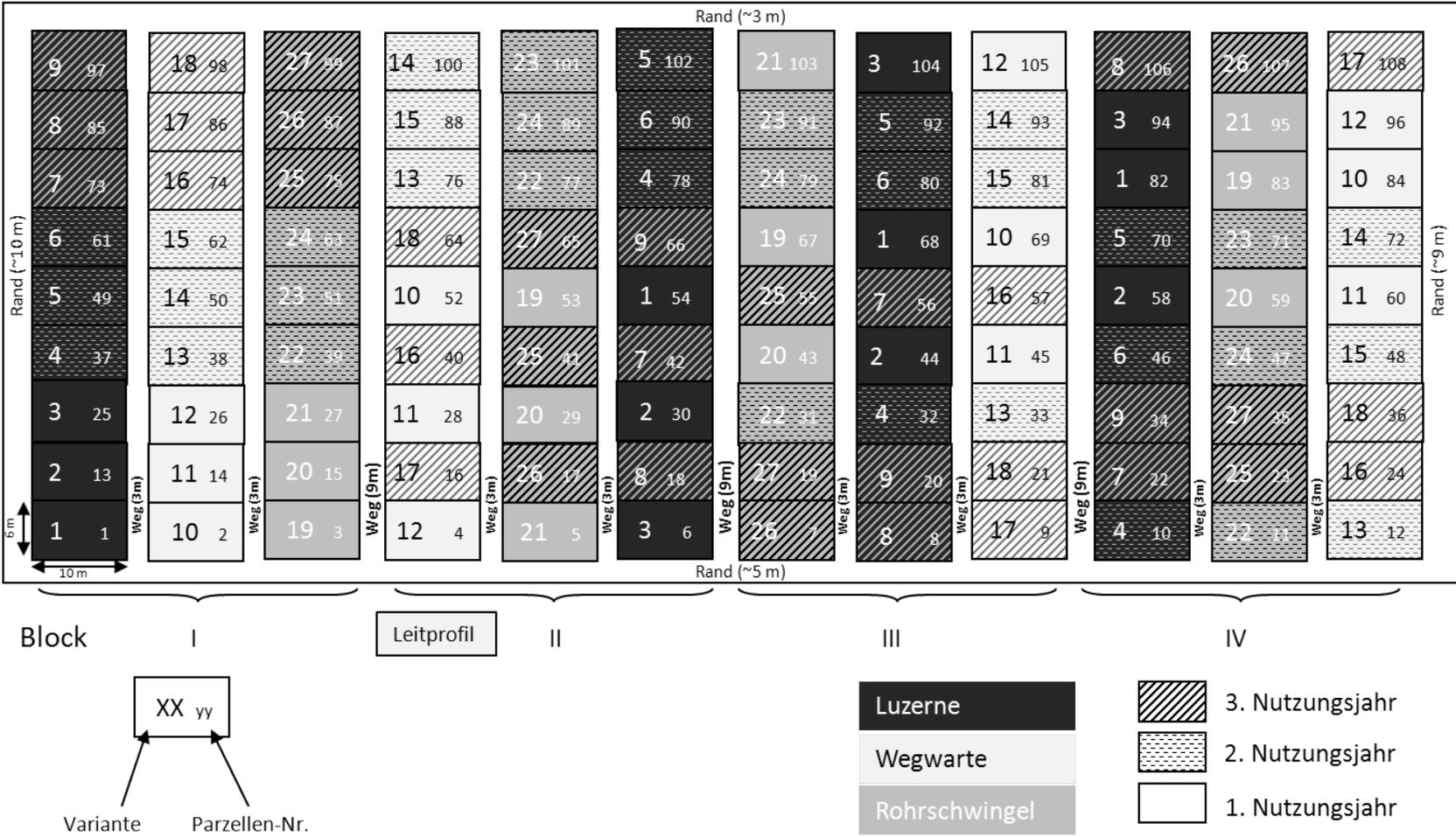


Abb. 3: Versuchsplan zum Ende der Vorfruchtphase von Versuch A im Versuchsjahr 2009.

Vor der Saat erfolgte jeweils eine Grundbodenbearbeitung mit dem Pflug und eine Saattbettbereitung mit der Kreiselegge. Die Kulturen wurden jeweils standardmäßig mit einem Reihenabstand von 10,5 cm gesät, wobei Winterroggen mit 9,6 cm Reihenabstand eine Ausnahme bildete. Eine Übersicht der durchgeführten ackerbaulichen Maßnahmen ist in Anhang-Tab. 2 (S. 123) aufgeführt.

Während der gesamten Versuchsdauer wurden Feldmäuse (*Mycrotus arvalis*) und Wühlmäuse (*Arvicola terrestris*) entweder mit Sitzstangen für Greifvögel oder mit Giftweizen reguliert.

### Vorfruchtphase

Durch die Kombination der Faktoren Vorfrucht (Luzerne, *M. sativa* Sorte 'Planet'; Wegwarte, *C. intybus* Sorte 'Puna'; Rohrschwengel, *F. arundinacea* Sorte 'Hykor') und Anbaudauer (einjähriger oder kontinuierlicher zwei- oder dreijähriger Anbau) ergeben sich insgesamt 9 Vorfrucht-Varianten (Lu1-3, Ww1-3, Rs1-3, Tab. 2)

Im ersten Jahr (2007) wurden die Varianten mit dreijährigem Futterbau angesät. In den später zu ergänzenden ein- und zweijährigen Varianten wurde im ersten bzw. zweiten Jahr Sommerroggen bzw. Sommerroggen–Hafer angebaut. Anschließend wurden im dritten Jahr (2009) die einjährigen Vorfrüchte eingesät. Nach Getreideanbau erfolgte stets die Einsaat einer Phazelia Zwischenfrucht (*Phacelia tanacetifolia* BENTH.). Die Saatstärke betrug bei Luzerne 25 kg·ha<sup>-1</sup>, bei Wegwarte 5 kg·ha<sup>-1</sup> und bei Rohrschwengel 30 kg·ha<sup>-1</sup>.

Die einjährigen Wegwarte- und Rohrschwengel-Varianten wurden nach der Saat im April 2009 mit einer Startdüngung von 50 kg N·ha<sup>-1</sup> (Kalkammonsalpeter) versehen. Es erfolgten drei bis vier Schnitte (Schnitthöhe etwa 4–5 cm) der Futterpflanzen im Jahr. Das Schnittgut wurde als Mulch auf der Fläche belassen. In der gesamten Vorfruchtphase wurde Unkraut manuell kontrolliert. Die Futterpflanzen in Versuch A wurden am 10.03.2010 umgebrochen.

### Nachfruchtphase

Die Vorfrucht-Varianten mit gleicher Vorprägung wurden in der Nachfruchtphase mit drei verschiedenen Fruchtfolgen belegt. Innerhalb eines Jahres wurde jeweils eine allorhize und eine homorhize Frucht angebaut. Im ersten Nachfruchtjahr wurden Futtermalve (*Malva sylvestris* L. Sorte 'Sylva') und Sommerweizen (*Triticum aestivum* L. Sorte 'Scirocco') genutzt. Nachfolgend wurden Winterraps (*Brassica napus* L. Sorte 'Visby') und Wintergerste (*Hordeum vulgare* L. Sorte 'Highlight') sowie im dritten Nachfruchtjahr Winterraps und Winterroggen (*Secale cereale* L. Sorte 'Dukato') kultiviert. Damit resultieren für jede der neun Vorfrucht-Varianten die Fruchtfolgen Futtermalve–Wintergerste–Winterroggen, Sommerweizen–Winterraps–Winterroggen und Sommerweizen–Wintergerste–Winterraps (Tab. 2).

Anfang März 2010 wurde in allen Varianten der mineralische Stickstoffgehalt ( $N_{\min}$ ) des Bodens (0–90 cm) bestimmt. Infolgedessen wurden alle Varianten am 14.04.2010 an den  $N_{\min}$ -Gehalt der Variante Luzerne, dreijährig (Lu3) angepasst. Im einzelnen erhielten die Lu1-Varianten 68 kg N·ha<sup>-1</sup>, die Lu2-Varianten 15 kg N·ha<sup>-1</sup> und alle übrigen Varianten

77 kg N·ha<sup>-1</sup> in Form von Kalkammonsalpeter. Während in den ersten Nachfruchtkulturen (Sommerweizen und Futtermalve) Unkräuter manuell kontrolliert wurden, wurde der Pflanzenschutz in den folgenden Kulturen betriebsüblich mit Herbiziden durchgeführt. Am 11.03.2011 erfolgte eine erneute Düngung mit Kalkammonsalpeter, wobei zwischen Winterraps und Wintergerste unterschieden wurde. Winterraps mit Luzerne als Vor-Vorfrucht erhielt 58 kg N·ha<sup>-1</sup>, alle anderen Varianten wurden mit 83 kg N·ha<sup>-1</sup> gedüngt. Wintergerste nach Luzerne und Futtermalve (Lu-M-WG) erhielt 19 kg N·ha<sup>-1</sup>, Wintergerste nach Luzerne und Sommerweizen (Lu-SW-WG) 38 kg N·ha<sup>-1</sup>. Alle Varianten mit Wegwarte und Rohrschwingel als Vor-Vorfrucht wurden mit 63 kg N·ha<sup>-1</sup> gedüngt. Im März 2012 wurde die Düngung mit Ammonsulfatsalpeter mit 75 kg N·ha<sup>-1</sup> für Winterraps und 50 kg N·ha<sup>-1</sup> für Winterroggen durchgeführt.

Die Entwicklungsstadien nach BBCH-Skala der verschiedenen Nachfrüchte sind in Anhang-Tab. 3 (S. 124) aufgeführt.

### 2.3. Wurzellängendichte mit Profilwandmethode

Die Wurzellängendichte (WLD) und die Wurzellänge (WL) wurde mit der Profilwandmethode nach BÖHM (1979) quantifiziert. Dazu wurde in einer Grube (2,30 m Tiefe) in Querrichtung zu den Saatreihen mit Flachspaten und Maurerblechen eine glatte Wand geschaffen. Aus der Wand herausragende Wurzeln wurden mit einer Schere entfernt. Anschließend wurde mit einer Druckspritze etwa 0,5 cm Bodenschicht von der Wand gewaschen. Im Bt-Horizont wurde dazu zusätzlich ein Kratzer verwendet. Ein Rahmen mit einem Innenmaß von 100 × 60 cm und einem 5 × 5 cm Gitter wurde an die vorbereitete vertikale Fläche angelegt und in jedem Quadrat die Wurzellänge über Wurzellängeneinheiten (WLE) von 0,5 cm geschätzt (Abb. 4). Die Wurzellängendichte wurde mit der folgenden Formel berechnet:

$$\text{WLD} [\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}] = \frac{\text{WLE} \cdot 0,5 \text{ cm}}{5 \text{ cm} \cdot 5 \text{ cm} \cdot 0,5 \text{ cm}} \quad (1)$$

Die Berechnung der Wurzellänge wurde gemäß

$$\text{WL} [\text{km} \cdot \text{m}^{-2}] = \frac{\text{WLE} \cdot 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ km}}{5 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot 0,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}} \quad (2)$$

durchgeführt. In Abhängigkeit von der Durchwurzelungstiefe wurde die WLD bis maximal 2 m Bodentiefe erfasst. Bei der Schätzung wurde zwischen Wurzeln im *bulk*-Boden und Wurzeln in Bioporen unterschieden. Die Wand wurde abschließend mit einer Plastikfolie abgedeckt, um Austrocknung zu vermeiden.

Innerhalb einer Vegetationsperiode wurde jede Parzelle fünf Mal beprobt. Dazu wurde vor jeder Probenahme zur Vermeidung von Randeffekten eine etwa 15 cm dicke Erdschicht



**Abb. 4:** Zählrahmen mit 5 × 5 cm-Gitter an einer fertig vorbereiteten Profilwand in Futtermalve. Versuch A, 06.07.2010. Für die statistische Analyse wurden Flächen zusammengefasst (beispielsweise in 10 cm-Schritten, siehe Rechteck).

abgestochen. Zum 5. Untersuchungstermin für Malve konnte 2010 aufgrund des ungleichmäßigen Wachstums der Bestände keine Erhebung durchgeführt werden. Im Versuch A wurden die ersten beiden Feldwiederholungen beprobt (ab 2010), während im Versuch B zum Ende der Futterpflanzenphase (Herbst 2011) in den Feldwiederholungen III und IV alle Vorfrucht-Varianten untersucht wurden. Eine detaillierte Übersicht über die beprobten Varianten befindet sich in Anhang-Tab. 4, S. 125.

## 2.4. Wurzellängendichte mit Bildanalyseverfahren

### 2.4.1. Monolithentnahme

Die Monolithentnahme für die Kalibrierung der Profilwanddaten und die Wurzelerfassung im Unterboden wurde in einer Grube an einer sauber abgespateten Wand durchgeführt. Dazu wurden unterhalb von 45 cm Bodentiefe in 10 cm-Schritten Bodenziegel mit einem definierten Volumen (2500 bzw. 1250 cm<sup>-3</sup>) entnommen. Die Proben wurden bis zur Auswaschung der Wurzeln bei 5–9 °C gekühlt.

Eine Übersicht der entnommenen Proben, der zugehörigen Bodentiefe, die verwendete Entnahmetechnik (im Text in Klammern erwähnt) und die Anzahl der Wiederholungen je Bodentiefe ist Anhang-Tab. 5 (S. 126) zu entnehmen. Der zeitliche Ablauf der Entnahme ist in Anhang-Tab. 4 (S. 125) dargestellt. Im Versuchsjahr 2010 wurde mit Entnahmegeschäften aus geschärften Stahlblechen („Box“) mit zwei oder drei geschlossenen Seiten gearbeitet (25 × 10 × 10 cm, Abb. 5). Diese wurden mit einem Hammer in den Boden eingeschlagen. Zum Nacharbeiten wurden ein einfaches Stahlblech mit einer Schlagverstärkung (Abb. 5), ein Spachtel oder ein Messer verwendet. Im Rahmen einer Diplomarbeit wurden im folgenden Jahr 2011 bei ansonsten gleicher Verfahrensweise aufgrund des trockenen und harten Bodens Längsschnitte mit einem Winkelschleifer („Box+“) vorbereitet (THOMAS 2012). Im Herbst 2011 wurde zur Entnahme der Monolithe aus den Futterpflanzenvarianten in Versuch B eine verkleinerte Entnahmebox (12,5 × 10 × 10 cm) an einen Schlagbohrer gekoppelt („Bohrer“).



**Abb. 5:** Einfaches **Stahlblech mit Schlagverstärkung** (links) und **Entnahmegeschäft** aus geschärften Stahlblechen (rechts) mit der Abmessung 25 × 10 (× 10 cm).

Ab 2012 wurde die Methode bei relativ weichem Boden weiter vereinfacht, indem nur mit Spachteln („Spachtel“) und geschärften Stahlblechen mit Schlagknauf gearbeitet wurde.

### 2.4.2. Auswaschung

Die ersten Monolithproben wurden 2010 mit einer Wurzelwaschanlage (Root Washer, type RWP, Delta-T Devices Ltd.) ausgewaschen. Die Resultate und der Zeitbedarf waren jedoch nicht zufriedenstellend (Diplomarbeit, GEIER 2011).

Alle folgenden Wurzelproben wurden in 10 L Eimern in Wasser eingeweicht. Danach wurde das Wasser-Bodengemisch manuell verrührt und Erdbrocken dabei vorsichtig homogenisiert. Die Wurzeln wurden mit einem Sieb (Maschenweite 0,55 mm) von der Suspension getrennt. Mit dem im Eimer verbleibenden Erdrückstand wurde das Verfahren drei- bis viermal wiederholt, bis im Bodensatz keine Wurzeln mehr sichtbar waren. Die Wurzeln im Sieb wurden gereinigt und in einem Probengefäß verschlossen.

### 2.4.3. Aufarbeitung

Die ausgewaschenen Proben wurden manuell mit Pinzetten gereinigt. Um einen besseren Kontrast zu erzielen, wurde die Probe abwechselnd auf weißem und schwarzem Untergrund sortiert. Dabei wurden Bodenpartikel, organisches Material und dunkel gefärbte, abgestorbene Wurzeln entfernt. Wurzelstücke mit weniger als 5 mm Länge wurden aus Zeitgründen mit geringer Priorität behandelt (Diplomarbeit, THOMAS 2012). Je nach Verschmutzungsgrad nahm die Säuberung zwischen 10 und 360 min je Probe in Anspruch.

Lagen Proben mit gefärbten Wurzeln vor („Färbemonolithe“, siehe 2.7.2), konnten Altwurzeln nicht erkannt werden. Daher wurden bei der Färbemonolithmethode Altwurzeln bei den ungefärbten Wurzeln aus dem *bulk*-Boden ebenfalls nicht aussortiert.

### 2.4.4. Scannen

Die Wurzeln wurden in einer Glasschale (21 x 30 cm) in Wasser unter Zugabe einer geringen Menge Spülmittel gleichmäßig mit etwas Abstand zum Rand verteilt. Bilder der Proben wurden mit einem Scanner des Typs *Epson Expression V700*, der über eine ober- und unterseitige Lichtquelle verfügt, aufgenommen. Dabei wurde der Modus 8-bit Graustufen und eine Auflösung von 400 dpi verwendet (BOUMA et al. 2000). Die genauen Einstellungen der Scanner-Maske sind Anhang-Tab. 6 auf S. 126 zu entnehmen.

### 2.4.5. Anwendung des Computerprogramms WinRHIZO

Zur Auswertung der gespeicherten Bilder wurde das Computerprogramm WinRHIZO Pro (Version 2009c, 32 Bit) verwendet. Es wurde die maximale Präzision und eine Pixelklassifikation anhand von Graustufen ausgewählt. Die Wurzeldurchmesser wurden in 50 Klassen à 0,1 mm

erfasst (vgl. Kalibrationsdatei Anhang-Tab. 7, S. 127). Bei der Auswahl des Bildausschnitts wurde darauf geachtet, den Schatten des Glasschalenrands auszuschließen, um eine Erfassung als Wurzel zu vermeiden. War die Analyse nicht zufriedenstellend, wurde der Schwellenwert (*threshold*) verändert, bis die Erfassung der Wurzeln hinreichend war. Die Analyse eines Bildes nahm etwa 1 min in Anspruch.

## 2.5. Wurzelmasse

Zur Bestimmung der Wurzelrockenmasse (nichtaschefrei) wurden Rollrandgläschen mit einer Feinwaage eingewogen und die gescannten Wurzeln eingefüllt. Diese wurden bei 60 °C mindestens 24 Stunden getrocknet, danach zum Auskühlen in einen Exsikkator überführt und erneut gewogen.

## 2.6. Umrechnungsfaktoren

Die Wurzellängendichte (WLD) wird mit der Profilwandmethode ( $WLD_{\text{Profil}}$ ) im Vergleich zur Monolithmethode ( $WLD_{\text{Mono}}$ ) unterschätzt (KÖPKE 1981). Der Quotient aus  $WLD_{\text{Mono}}$  und  $WLD_{\text{Profil}}$  kann als Umrechnungsfaktor für die mit der Profilwandmethode erhobenen Werte verwendet werden. Der Variationskoeffizient der Umrechnungsfaktoren einer Bodentiefe wurde anhand der zwei Feldwiederholungen berechnet. Bei einem Variationskoeffizient größer als 0,9 wurde der Wert nicht für die Auswertung herangezogen.

## 2.7. Bioporen

### 2.7.1. Porengrößenverteilung

Die Bestimmung der Bioporendichte und der Porengrößen wurde im Frühjahr 2010 nach allen Vorfrucht-Varianten (Lu1–3, Ww1–3 und Rs1–3) in 4 Feldwiederholungen durchgeführt. In jeder untersuchten Parzelle wurden 3 Flächen mit einer Abmessung von 50 × 50 cm angelegt. Dazu wurde in 45 cm Bodentiefe eine ebene Fläche unter Vermeidung von Bodenverschmierung freigelegt. Verbleibende Bodenkrümel wurden mit einem Industriestaubsauger entfernt.

Es wurde bei allen Untersuchungen zwischen großen Poren (> 5 mm), mittleren Poren (2–5 mm) und kleinen Poren (< 2 mm) unterschieden. In den Flächen 1 und 2 wurden die Bioporen unter Zuhilfenahme eines Gitters und einer Schablone für die Erfassung des Porendurchmessers gezählt. Bei Fläche 3 wurden die Poren hingegen auf einer durchsichtigen Folie aufgezeichnet, wobei nach Größenklassen und zwischen offenen Poren mit und ohne Wurzeln unterschieden wurde. Diese werden nachfolgend gemeinsam als „offene Bioporen“ bezeichnet. Als „verfüllte Bioporen“ wurden Poren erfasst, die durch Erdmaterial, meist Wurmlösung, verschlossen waren.

Um die Beprobungsflächen später wieder auffinden zu können, wurden sie per GPS vermessen. Der beprobte Boden wurde an den Ecken der Gruben mit Plastikstäben markiert. In Fläche 3 wurden zusätzlich zwei Nägel in großen Bioporen versenkt, um an diesen orientiert später die Folie passgenau anlegen zu können. Nach der Zählung wurde in den Flächen 1 und 2 Vlies (PP-Rohrschutzmatte  $1000 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ , Frank GmbH Mörfelden) aufgelegt, um das Einwachsen von Wurzeln der Nachfrucht in die Poren zu verhindern. Zusätzlich wurden die Flächen brach gehalten. So konnten Bioporen, die 2010 noch durch Wurzeln der Vorfrucht verblockt waren, im Frühjahr 2012 nach Verrottung der Wurzeln erneut untersucht werden (Bachelorarbeit, LÜHRING 2012). Eine Übersicht über alle Beprobungen ist Anhang-Tab. 9 auf S. 128 zu entnehmen.

### 2.7.2. Wurzelwachstum in Bioporen und Porenkontinuität

Um das Wurzelwachstum in Bioporen zu quantifizieren, wurden die in Bioporen  $> 2 \text{ mm}$  wachsenden Wurzeln gezielt angefärbt. In  $45 \text{ cm}$  Bodentiefe wurde in alle Poren  $> 2 \text{ mm}$  Methylenblau ( $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  Wasser) bis zum Rückstau mit einer Spritzflasche eingefüllt. Die Porengrößenverteilung wurde auf eine Folie übertragen (siehe Abschnitt 2.7.1). Zur Bestimmung des Wurzelwachstums im *bulk*-Boden wurden anschließend drei Monolithe ( $25 \times 10 \times 10 \text{ cm}$ ), im Folgenden als „Färbemonolithe“ bezeichnet, hintereinander mit  $10 \text{ cm}$  Rand zu den Seiten entnommen, wobei die genaue Lage der Monolithe auf der Folie markiert wurde. Die Monolithe wurden wie oben beschrieben ausgewaschen (Abschnitt 2.4.2) und aufbereitet (Abschnitt 2.4.3). Durch die Entnahme der Monolithe und die anschließende Auswaschung und Farbsortierung der Wurzeln konnte zwischen Wurzeln aus dem *bulk*-Boden und aus Bioporen differenziert werden. Gleichzeitig wurde die Porenkontinuität ermittelt.

In vier Parzellen von Fläche 3 (Variante 13 und 19, Block I und II, Abb. 3, S. 17) wurde 2011 die Porengrößenverteilung in  $45\text{--}145 \text{ cm}$  Bodentiefe im Abstand von jeweils  $10 \text{ cm}$  untersucht. In diesen Parzellen wurde die im Frühjahr 2010 bereits beprobte Fläche 3 mittels GPS bestimmt und vor dieser Fläche eine Grube angelegt.

Nach der Entnahme der Monolithe wurde die gesamte  $50 \times 50 \text{ cm}$  Fläche auf die Ebene der Monolith-Unterkante abgetragen, so dass eine ebene Fläche  $10 \text{ cm}$  unter der vorigen geschaffen wurde. Erneut wurden die Poren freigelegt und eine Folie gezeichnet, auf der kontinuierliche (blau gefärbte) Poren zusätzlich markiert wurden. Alle blau gefärbten Poren wurden mit Methylenblau nachgefärbt. Die neu hinzukommenden Poren wurden mit Neutral-Rot ( $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  Wasser) gefärbt. Auf diese Weise wurde die letzte Folie auf der Ebene  $145 \text{ cm}$  erstellt, so dass die untere Kante der letzten Monolithe bei  $155 \text{ cm}$  Bodentiefe war.

## 2.8. Regenwurmabundanz und -biomasse

Regenwurmabundanz und -biomasse wurden durch Austreibung der Regenwürmer mit einer Senfsuspension ermittelt (GUNN 1992, ZALLER & KÖPKE 2004). Es wurde mit einer

Menge von 125 g 'Düsseldorfer Löwensenf extra scharf' auf 10 L Wasser gearbeitet. Um das Einsickern der Suspension in den Boden auf eine 0,25 m<sup>2</sup> große Fläche zu begrenzen, wurde ein Metallrahmen dieser Innenfläche etwa 3 cm tief in den Boden geschlagen. Das Ausbringen der Senfsuspension erfolgte in zwei Teilen, wobei der zweite Teil erst nach Versickern der ersten 5 L gegeben wurde. Innerhalb der nächsten halben Stunde wurden alle Regenwürmer, die an die Oberfläche kamen, mit einer Pinzette aufgesammelt und in mit Wasser gefüllten Kautex-Flaschen gesammelt. Nach Bestimmung der Regenwurmart wurden die Individuen jeder Art gezählt und zusammen gewogen. Auf der Versuchsfläche wurden die Arten *Lumbricus terrestris* (Tauwurm), *Allolobophora caliginosa* (kleiner Ackerwurm), *Allolobophora chlorotica* (Feldwurm) und 2009 auch *Octolasion lacteum* (Großer Ackerwurm) festgestellt. Im Ergebnisteil wird nur auf *L. terrestris* eingegangen, da er aufgrund seiner Größe und Lebensweise Bioporen in Größenklassen schaffen kann, die für die untersuchten Fragestellungen von besonderem Interesse sind. Im Rahmen seiner Diplomarbeit ermittelte LANDGRAF (2010) im Herbst 2009 im Versuch A zum Ende der Vorfruchtphase am 06.10.2009 und am 18.11.2009 die Abundanz und Biomasse von *L. terrestris* (Anhang-Tab. 8, S. 127). Im Versuchsjahr 2010 wurden in beiden Versuchen zu zwei Untersuchungsterminen im Herbst Regenwürmer untersucht. Jeweils beim zweiten Untersuchungstermin wurde zwischen großen (> 2 g) und kleinen Individuen (< 2 g) unterschieden. Im Versuchsjahr 2011 untersuchte LÜSEBRINK (2012) im Rahmen seiner Diplomarbeit Regenwurmabundanz und -biomasse in Versuch B zum Ende des Futterpflanzenanbaus. Die ausgewählten Varianten umfassten in allen Jahren die drei Vorfrüchte Luzerne, Wegwarte und Rohrschwengel im ein- bis dreijährigen Anbau in allen Feldwiederholungen. In Versuch B wurde 2010 statt der dreijährigen Varianten eine Haferparzelle als Referenz beprobt (Anhang-Tab. 8, S. 127).

## 2.9. Statistische Auswertung

Die Datenanalysen wurden mit dem Statistikprogramm *IBM SPSS Statistics* (Version 20) verarbeitet. Die Voraussetzungsbedingungen zur Varianzanalyse wurden mit dem Shapiro-Wilk-Test (Normalverteilung) und dem Levene-Test (Varianzhomogenität) überprüft. Für die Ergebnisse zur Regenwurmabundanz, -biomasse und zur Bioporendichte waren diese Voraussetzungen erfüllt. Im Anschluss an die Varianzanalyse wurden bei gleichem Stichprobenumfang Mittelwertvergleiche mit dem Tukey-Test und bei unterschiedlichem Stichprobenumfang mit dem Scheffé-Test, jeweils mit einem Signifikanzniveau von  $\alpha=0,05$ , durchgeführt. In einem Fall im Jahr 2010 in Versuch A wurde aufgrund der geringen Individuenzahl von Regenwürmern auf eine statistische Auswertung verzichtet.

Die Wurzeldata zeigten homogene Varianzen, waren aber auch nach Wurzel- oder Logarithmustransformation nicht normalverteilt. Zur statistischen Auswertung wurden deshalb parameterfreie Verfahren angewendet, die auf der Vergabe von Rangzahlen basieren. Diese besitzen im Fall nicht-normalverteilter Daten eine höhere Trennschärfe als die Varianzanalyse mit nachfolgendem *t*-Test (SAWIŁOWSKY 1990, FIELD 2009).

Für die Vergleiche von zwei Stichproben wurde der Mann-Whitney-U-Test für ungepaarte Stichproben verwendet. Beim Vergleich von mehr als zwei Stichproben wurde zunächst der Kruskal-Wallis-Test genutzt, um festzustellen, ob innerhalb der untersuchten Gruppen statistisch signifikante Unterschiede bestehen. Beide genannten Verfahren verwenden Rangsummen. Zeigte der Kruskal-Wallis-Test Unterschiede an, wurden im Anschluss homogene Untergruppen mit dem von CAMPBELL & SKILLINGS (1985) entwickelten *ad hoc* Verfahren ermittelt, das mithilfe von Rängen und multiplen Vergleichen arbeitet. In den Abbildungen und Tabellen werden signifikante Unterschiede durch verschiedene Buchstaben, nicht signifikante Unterschiede mit „ns“ gekennzeichnet.

Aufgrund der hohen räumlichen Variabilität der Wurzelverteilung im Boden wurden für die statistische Auswertung jeweils zwei der  $5 \times 5$  cm Quadrate in einer Spalte des Zählrahmens zu einem  $5 \times 10$  cm Rechteck zusammengefasst (Abb. 4, S. 20). Die Beschreibung bezieht sich auf eine Auswertung in 10 cm-Schritten. Zur Bildung größerer Klassen wurden entsprechend weitere Quadrate in jeder der 20 Spalten zusammengefasst.

Die Begriffe Bodentiefenklasse/Tiefenklasse werden verwendet, wenn zusammengefasste Daten in der Graphik dargestellt werden (z. B. 0–30 cm Bodentiefe), die Rohdaten aber feiner aufgelöst waren (z. B. alle 5 cm an der Profilwand). Demgegenüber werden die Begriffe Bodentiefenstufe/Tiefenstufe verwendet, wenn die dargestellten Bodentiefen auch den tatsächlich erhobenen Bodentiefen entsprachen (z. B. 45–55 cm mit der Monolithmethode).

## 3. Ergebnisse und Diskussion

Der Versuchsanlage entsprechend werden im Folgenden erst die Ergebnisse der Vorfruchtphase mit Futterpflanzenanbau und dann die der Nachfruchtphase mit den Kulturpflanzen Sommerweizen (*Triticum aestivum* L.), Futtermalve (*Malva sylvestris* L.), Wintergerste (*Hordeum vulgare* L.) und Winterraps (*Brassica napus* L.) diskutiert. Die Ergebnisse der Vorfruchtphase umfassen das Wurzelwachstum der drei Vorfrüchte Luzerne (*Medicago sativa* L.), Wegwarte (*Cichorium intybus* L.) und Rohrschwingel (*Festuca arundinacea* SCHREB.), die Bioporendichte und die Regenwurmpopulation.

### 3.A. Vorfruchtphase

#### 3.A.1. Genese der Bioporen

Die Versuchsfaktoren Vorfrucht und Anbaudauer mit ihren unterschiedlichen Faktorstufen haben beide das Potential, die Bioporendichte zu erhöhen. In der Literatur finden sich zahlreiche Belege dafür, dass allorhize Pflanzen, wie die im Versuch angebauten *Cichorium intybus* L. und *Medicago sativa* L., mit ihren Pfahlwurzeln Bioporen in größerer Dichte generieren können (ELKINS 1985, McCALLUM et al. 2004, BENJAMIN et al. 2007, KAUTZ et al. 2010). Da nach der Saat der Futterpflanzen keine weitere Bodenbearbeitung durchgeführt wurde, entspricht der Faktor Anbaudauer einer Bodenruhe von ein, zwei bzw. drei Jahren. Bodenruhe ist dafür bekannt, positiv auf Regenwürmer zu wirken (KOTCON 2011), die wiederum Bioporen erhalten und schaffen können (GRAFF 1983).

#### Bioporengenerierung durch Wurzeln

Die im Versuch angebauten dikotylen Futterpflanzenarten Luzerne (Leguminose) und Wegwarte bilden ein allorhizes Wurzelsystem mit kräftigen Pfahlwurzeln aus, während der monokotyle Rohrschwingel ein homorhizes Wurzelsystem mit relativ geringen Wurzeldurchmessern besitzt. Entsprechend der unterschiedlichen Wurzelsysteme wurde eine spezifische Prägung des Bodens erwartet. Diese kann beispielsweise in der Schaffung von kontinuierlichen Makroporen bestehen, welche gemäß ANGERS & CARON (1998) zu den wichtigsten pflanzeninduzierten Änderungen des Bodengefüges gehören. Im Versuch wurden daher die Wurzeln der Vorfrüchte hinsichtlich Wurzellängendichte (WLD) und Wurzeldurchmesser untersucht, um diese Parameter mit der ebenfalls erhobenen Bioporendichte in Verbindung zu bringen.

Rohrschwingel ist dafür bekannt, hohe Wurzellängen auszubilden (QIAN et al. 1997), wobei die Wurzellänge die Summe der Längen sämtlicher Wurzelstücke ist und keinen Rückschluss auf die Tiefe der Durchwurzelung zulässt. Wie intensiv die Durchwurzelung von Rs war, zeigte sich an der hohen Gesamt-Wurzellänge (Tab. 3). Diese war im jeweiligen Anbaujahr nach Rs

### 3. Ergebnisse und Diskussion

**Tab. 3: Anteil der Gesamt-Wurzellänge im Ap-Horizont [%] (Ap), Gesamt-Wurzellänge [km·m<sup>-2</sup>] in der gesamten untersuchten Bodentiefe (0–200 cm) ( $\Sigma$  WL) und Durchwurzelungstiefe [cm] (D.tiefe: Bodentiefe, bis zu der  $\geq$  95 % der Gesamt-Wurzellänge erfasst worden sind) der Vorfrucht-Varianten (Kulturarten Luzerne (Lu), Wegwarte (Ww) und Rohrschwengel (Rs) mit ein-, zwei- und dreijähriger Anbaudauer). Versuch B, 19.09.2011–29.09.2011, Profilwandmethode. Werte mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant. Kruskal-Wallis-Test ( $\alpha=0,05$ ) mit Anschlussstest nach CAMPBELL & SKILLINGS (1985).**

	Lu1			Lu2			Lu3			Ww1			Ww2			Ww3			Rs1			Rs2			Rs3		
Ap	39	d		37	d		38	d		35	d		31	e		37	d		69	a		56	c		60	b	
D.tiefe	150	d		170	b		170	bc		160	c		180	a		180	a		80	f		130	e		130	e	
$\Sigma$ WL	7,6	e		10,5	c		9,1	d		6,2	g		11,7	b		7,0	f		10,4	c		14,8	a		13,1	b	

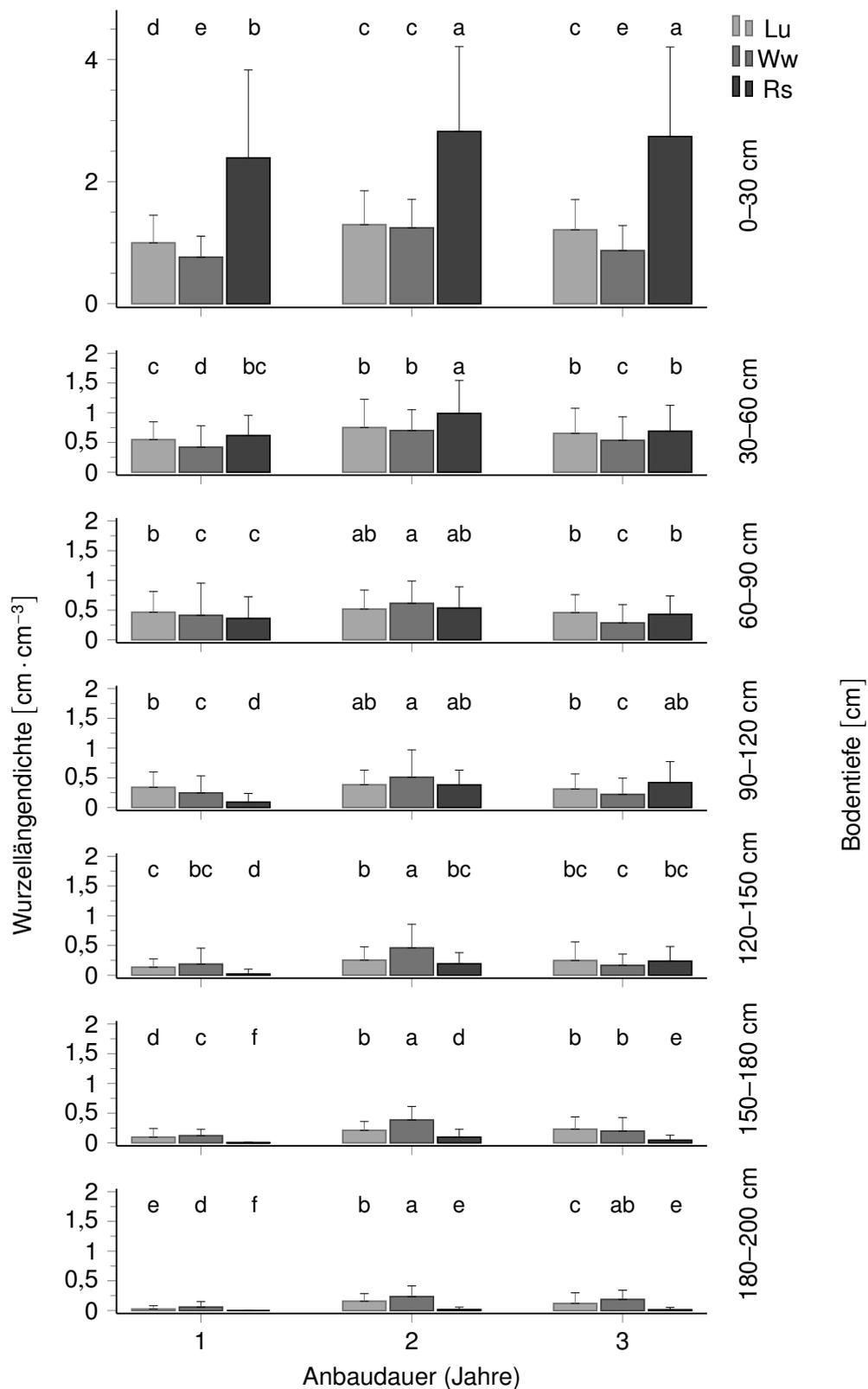
(10,4; 14,8 und 13,1 km·m<sup>-2</sup>) signifikant höher als nach Lu (7,6; 10,5 und 9,1 km·m<sup>-2</sup>) und Ww (6,2; 11,7 und 7,0 km·m<sup>-2</sup>).

In Übereinstimmung mit der Literatur (BOLINDER et al. 2002, GENTILE et al. 2003, GŁĄB 2007) durchwurzelte Rohrschwengel auch den Ap-Horizont (0–30 cm Bodentiefe) mit Anteilen von 56–69 % an der Gesamt-Wurzellänge deutlich stärker als Luzerne und Wegwarte mit Anteilen zwischen 31 und 39 % (Tab. 3). Bis in 60 cm Bodentiefe erreichte Rohrschwengel die höchste Wurzellängendichte (WLD), gefolgt von Luzerne und Wegwarte (Abb. 6). Mit zunehmender Bodentiefe nahm die WLD bei allen Kulturarten erwartungsgemäß ab.

Die Durchwurzelungstiefe ist gemäß SMIT et al. (2000b) als die Bodentiefe definiert, bis zu der 95 % der Wurzellänge erfasst werden. Im vorliegenden Versuch war die Durchwurzelungstiefe von Rohrschwengel mit 80 bis 130 cm deutlich geringer als die von Wegwarte und Luzerne (Tab. 3). Die Luzerne erreichte mittlere Durchwurzelungstiefen von etwa 150 cm im einjährigen Anbau und etwa 170 cm Bodentiefe bei mehrjährigem Anbau. Im Vergleich dazu war Wegwarte durch dickere Wurzeln und eine um je 10 cm tiefere Durchwurzelung gekennzeichnet (Tab. 3, Tab. 5).

Auch in früheren Untersuchungen zeichneten sich die allorhizen Kulturen Luzerne und Wegwarte durch eine intensive Durchwurzelung tieferer Bodenschichten aus (KÖNNECKE 1967, SKINNER et al. 2004, KAHNT 2008). Zwischen 60–150 cm Bodentiefe hatten Lu und Ww im Versuch, in wechselnder Rangfolge, die höhere WLD. Unterhalb von 150 cm Bodentiefe dominierte im Wesentlichen die Rangfolge Ww > Lu > Rs, wobei in der Bodentiefe von 150–180 cm nach dreijährigem Anbau kein signifikanter Unterschied zwischen Ww und Lu bestand.

Ein gesteigertes Wurzelwachstum war insbesondere vom ersten zum zweiten Anbaujahr der Vorfrucht festzustellen, während die Parameter WL, WLD und Durchwurzelungstiefe im dritten Jahr nur noch geringe Veränderungen aufwiesen (Tab. 3, Abb. 6). Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass am Standort nach dem zweiten Anbaujahr das Wurzelsystem der Pflanzen so weit ausgebildet war, dass eine weitere Ausdehnung nicht stattfand.



**Abb. 6: Wurzellängendichte (WLD) der Vorfrüchte **Luzerne** (Lu), **Wegwarte** (Ww) und **Rohrschwengel** (Rs) in Abhängigkeit von der Anbaudauer (ein-, zwei- oder dreijährig) und der Bodentiefenklasse. Versuch B, 19.09.2011–29.09.2011, Profilwandmethode. Werte in einer Tiefenklasse mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant. Kruskal-Wallis-Test ( $\alpha=0,05$ ) mit Anschlussstest nach CAMPBELL & SKILLINGS (1985).**

### 3. Ergebnisse und Diskussion

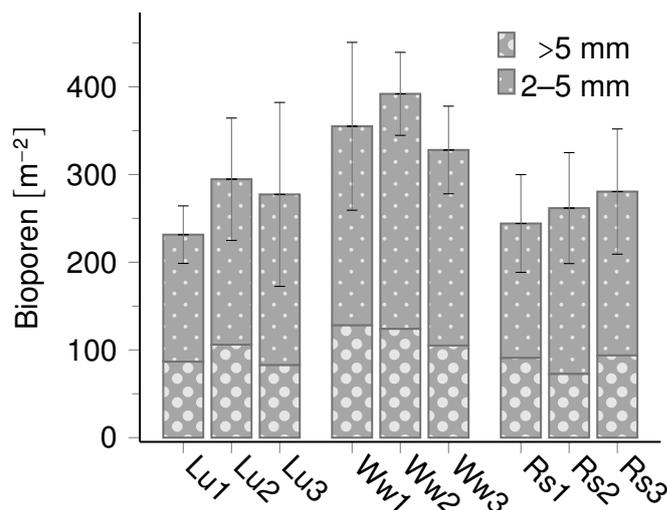
Die aus der Literatur bekannten morphologischen Eigenschaften der drei Futterpflanzenarten spiegeln sich folglich direkt im Versuch wieder. Als eine weitere Kenngröße der Wurzel wird im Folgenden der Einfluss des Wurzelradius auf die Bioporengenerierung diskutiert.

#### Bioporendichte und Wurzelradius in 45 cm Bodentiefe

**Bioporen** Die Bioporendichte wurde erstmals nach der Vorfruchtphase im Frühjahr 2010 ermittelt. Die ausgezählte Fläche wurde mit einem wurzelundurchlässigen Vlies abgedeckt und im Frühjahr 2012 erneut untersucht. Durch die zweijährige Brache und Rottezeit sollten Bioporen frei werden, die 2010 noch durch Wurzeln der Vorfrüchte verblockt waren. Die im Frühjahr 2012 erhobene Bioporendichte beinhaltet daher sämtliche in der Vorfruchtphase vorhandenen und durch Wurzeln geschaffenen Bioporen.

Nach Ww und Lu wurden im Vergleich zu Rs tendenziell höhere Porendichten ermittelt (Abb. 7, nicht signifikant). Im Vergleich von ein- und zweijährigem Anbau war die Porendichte  $> 2$  mm bei allen Vorfruchtkulturen nach zweijährigem Anbau höher. Bei Lu und Ww nahm die Porendichte im dritten Anbaujahr wieder ab, während bei Rs eine weitere Zunahme beobachtet wurde.

Bei separater Betrachtung der Versuchsfaktoren hat die Vorfruchtart im Gegensatz zur Nutzungsdauer einen signifikanten Einfluss auf die Bioporendichte (Tab. 4). Dieser Sachverhalt wird besonders bei den offenen Bioporen deutlich: Nach der Vorfrucht Ww wurden signifikant höhere Dichten mit Porendurchmesser  $> 2$  mm als nach Lu und Rs festgestellt (Tab. 4). Nach Wegwarte-Vorfrucht wurden  $358 \text{ Poren} \cdot \text{m}^{-2}$ , nach Luzerne-Vorfrucht  $270 \text{ Poren} \cdot \text{m}^{-2}$  und nach



**Abb. 7: Bioporendichte** [offene Poren·m<sup>-2</sup>] in Abhängigkeit von der Porendurchmesserklasse (2–5 mm und  $> 5$  mm) und der Vorfrucht-Variante (Kulturarten Luzerne (Lu), Wegwarte (Ww) und Rohrschwengel (Rs) mit ein-, zwei- oder dreijähriger Anbaudauer) in 45 cm Bodentiefe. Versuch A, Frühjahr 2012. Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung der Anzahl Poren  $> 2$  mm. Keine signifikanten Unterschiede. Varianzanalyse mit Tukey-Test ( $\alpha=0,05$ ).

**Tab. 4: Bioporendichte** [Poren·m<sup>-2</sup>] in Abhängigkeit von der Kulturart (Lu: Luzerne, Ww: Wegwarte, Rs: Rohrschwengel, jeweils über die Anbaudauer gemittelt) und der Anbaudauer (ein-, zwei- und dreijähriger Anbau, jeweils über die Kulturart gemittelt) in 45 cm Bodentiefe. Die Bioporendichte wird in offene Poren, mit Bodenmaterial oder Regenwurmkot verfüllte Poren und gesamte Poren unterteilt dargestellt. Versuch A, Frühjahr 2012. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede. Varianzanalyse mit Tukey-Test ( $\alpha=0,05$ ).

		Vorfrucht						Anbaudauer			Mittelwert
		Lu		Ww		Rs		1	2	3	Ø
offene Poren	2–5 mm	178	b	239	a	178	b	170	208	198	195
	> 5 mm	92	b	119	a	86	b	98	96	92	97
	> 2 mm	270	b	358	a	264	b	268	304	290	292
verfüllte Poren	2–5 mm	64		57		49		54	57	58	57
	> 5 mm	49		40		40		45	40	44	43
	> 2 mm	113		97		89		99	97	102	100
gesamte Poren	2–5 mm	242	ab	296	a	227	b	224	265	256	252
	> 5 mm	141		159		126		143	136	136	140
	> 2 mm	383	b	455	a	353	b	367	401	392	392

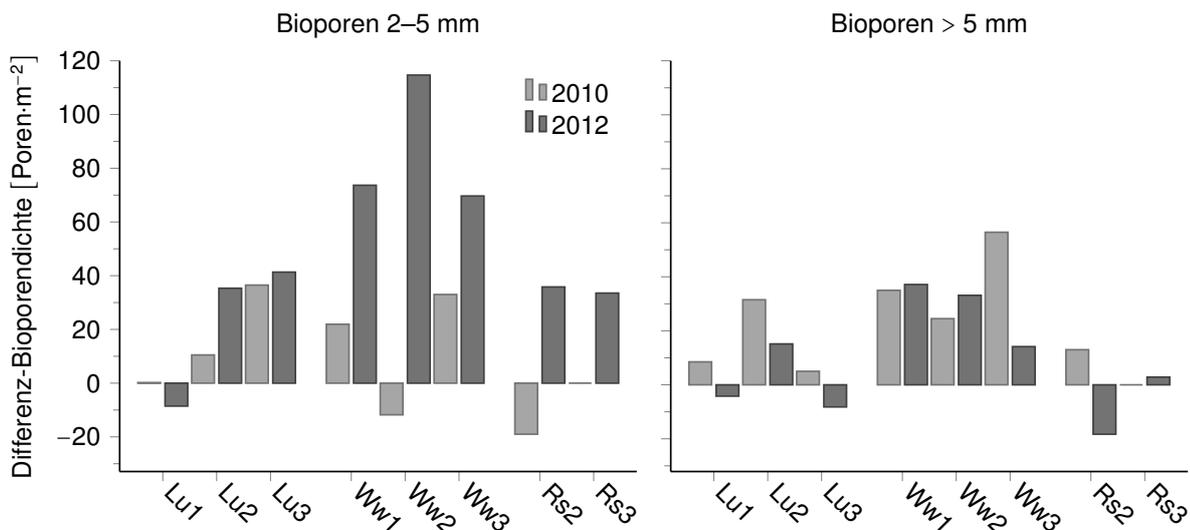
Rohrschwengel-Vorfrucht 264 Poren·m<sup>-2</sup> gezählt. In den Porendurchmesserklassen 2–5 mm und > 5 mm konnten diese Unterschiede ebenfalls nachgewiesen werden. Der größere Anteil der Bioporen hatte einen Durchmesser zwischen 2 und 5 mm. In dieser Durchmesserklasse erreichte Ww 239 Poren·m<sup>-2</sup>. Lu und Rs unterschieden sich hingegen nicht von einander (178 Poren·m<sup>-2</sup>). Die Häufigkeit von Poren mit einem Durchmesser > 5 mm wurde ebenfalls von der Vorfrucht beeinflusst. Nach Ww wurde mit 119 Poren·m<sup>-2</sup> die höchste Bioporendichte ermittelt (Lu: 92 Poren·m<sup>-2</sup> und Rs: 86 Poren·m<sup>-2</sup>).

Im vorliegenden Versuch betrug die Bioporendichte (45 cm Bodentiefe, offene Poren) in der Porenklasse 2–5 mm im Mittel 195 Poren·m<sup>-2</sup> und in der Porenklasse > 2 mm Durchmesser 292 Poren·m<sup>-2</sup> (Tab. 4). Damit war sie deutlich höher als in den vorhergehenden Untersuchungen am gleichen Standort. So ermittelten KAUTZ et al. (2010) an der Krumenbasis in 35 cm Bodentiefe vergleichsweise geringe Bioporendichten von etwa 16 Poren·m<sup>-2</sup> (> 2 mm Durchmesser). Demgegenüber zählte DREESMANN (1994) in 42 cm Bodentiefe unterhalb der Bearbeitungssohle ebenfalls am Standort Campus Klein-Altendorf zwischen 89 und 127 Poren·m<sup>-2</sup> mit einem Durchmesser von 2–5 mm. Auf einem Standort mit langjährig reduzierter Bodenbearbeitung ermittelten PITKÄNEN & NUUTINEN (1997) in 30 cm Bodentiefe mit 1264 Poren·m<sup>-2</sup> noch höhere Bioporendichten.

Die Dichte der verfüllten Bioporen betrug im Durchschnitt 100 Poren·m<sup>-2</sup> und wurde weder von der Vorfrucht noch von der Anbaudauer signifikant beeinflusst (Tab. 4).

Die Anzahl offener Bioporen wurde unmittelbar nach Ende der Vorfruchtphase (2010) sowie nach zweijähriger Brache (2010–2012) erneut erhoben. Um die Unterschiede zur gewählten

### 3. Ergebnisse und Diskussion



**Abb. 8: Differenz-Bioporendichte** [Poren·m<sup>-2</sup>] der Bioporen mit Durchmesser 2–5 mm (links) und Bioporen > 5 mm (rechts) in Abhängigkeit von der Vorfrucht-Variante (Kulturarten Luzerne (Lu), Wegwarte (Ww) und Rohrschwengel (Rs) mit ein-, zwei- oder dreijähriger Anbaudauer) in 45 cm Bodentiefe. Die Bioporendichte wurde dabei für beide Jahre jeweils auf die Bioporendichte der Variante Rs1 bezogen. Erfassung der Bioporendichte im Frühjahr 2010 direkt nach der Vorfruchtphase und nach zweijähriger Brache im Frühjahr 2012 in Versuch A.

Referenz Rs1 hervorzuheben, sind in Abb. 8 die Differenz-Bioporendichten als Funktion von Porendurchmesser, Vorfruchtart und Anbaudauer dargestellt. In der Durchmesserklasse 2–5 mm war die Differenz-Bioporendichte nach Ww im Versuchsjahr 2012 im Vergleich zu 2010 deutlich höher. Mit Ausnahme von Lu1 nahmen im Versuchsjahr 2012 alle Werte gegenüber 2010 zu. In der Durchmesserklasse > 5 mm war die Differenz-Bioporendichte der Varianten Ww1, Ww2 und Rs3 im Versuchsjahr 2012 gegenüber 2010 geringfügig erhöht, während sie in den übrigen Varianten niedriger als 2010 war. Dieser Rückgang macht deutlich, dass manche Bioporen im Boden nicht über längere Zeiträume stabil sind und kollabieren.

**Wurzeldurchmesser** Um die oben dargestellten Ergebnisse der Bioporendichte mit den Wurzelcharakteristika der Vorfrüchte in Verbindung zu bringen, wird im Folgenden zunächst auf deren Wurzeldurchmesser eingegangen. Die anhand der Monolithdaten in 45–105 cm Bodentiefe erfassten mittleren Wurzeldurchmesser der Vorfrüchte betragen zwischen 0,28 und 0,47 mm (Tab. 5). Die Wurzeldurchmesser der Vorfruchtarten unterschieden sich signifikant in der Reihenfolge Ww > Lu > Rs.

Dementsprechend hatte Rs mit 90 % der Gesamt-Wurzellänge in den Durchmesserklassen < 0,4 mm den höchsten Feinwurzelanteil (Lu: 85 % und Ww: 69 %). Die allorhizen Vorfrüchte zeigten eine Zunahme von feinen Wurzeln (< 0,4 mm) und eine Abnahme von gröberen Wurzeln (> 0,4 mm) mit steigender Anbaudauer. Demgegenüber nahm bei Rs mit steigender Anbaudauer der Anteil feiner Wurzeln ab und der Anteil gröberer Wurzeln zu.

**Tab. 5: Anteil der Wurzellänge [%] in sechs Durchmesserklassen [0 bis >1 mm] und der durchschnittliche Durchmesser ( $\varnothing$  [mm]) der Vorfrucht-Varianten (Kulturarten Luzerne (Lu), Wegwarte (Ww) und Rohrschwengel (Rs) mit ein-, zwei- oder dreijähriger Anbaudauer). In den letzten drei Zeilen sind jeweils die über die Anbaujahre gemittelten Werte angegeben. Versuch B, 27.09.2011–04.10.2011. Monolithmethode in den Bodentiefen von 45–105 cm. Werte mit verschiedenen Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen Vorfruchtkulturen einer Anbaudauer. Kruskal-Wallis-Test ( $\alpha=0,05$ ) mit Anschlussstest nach CAMPBELL & SKILLINGS (1985).**

Variante	0–0,2		0,2–0,4		0,4–0,6		0,6–0,8		0,8–1		>1		$\varnothing$ [mm]	
Lu1	25,6	b	52,8	a	14,7	b	4,3	b	1,3	b	1,3	b	0,38	b
Ww1	12,1	c	51,9	a	21,3	a	8,8	a	2,9	a	3,0	a	0,47	a
Rs1	58,0	a	34,6	b	5,6	c	1,4	c	0,3	c	0,2	c	0,28	c
Lu2	29,5	b	56,8	b	8,5	b	2,3	b	0,9	b	2,0	a	0,39	b
Ww2	12,4	c	59,1	a	17,9	a	6,2	a	2,2	a	2,1	a	0,43	a
Rs2	57,1	a	33,4	c	6,6	c	2,0	c	0,6	c	0,4	b	0,30	c
Lu3	39,9	b	49,7	b	6,8	c	1,8	c	0,6	c	1,1	b	0,35	b
Ww3	13,4	c	58,4	a	17,1	a	5,9	a	2,3	a	3,0	a	0,45	a
Rs3	53,0	a	34,8	c	7,8	b	2,6	b	1,0	b	0,8	c	0,32	c
Lu $\varnothing$	31,6	b	53,1	b	10,0	b	2,8	b	0,9	b	1,5	b	0,37	b
Ww $\varnothing$	12,7	c	56,5	a	18,8	a	7,0	a	2,5	a	2,7	a	0,45	a
Rs $\varnothing$	56,0	a	34,3	c	6,7	c	2,0	c	0,6	c	0,4	c	0,30	c

In allen Durchmesserklassen > 0,2 mm wies Ww die höchsten Anteile der Wurzellänge auf (Tab. 5), der Feinwurzelanteil war also zugunsten dickerer Wurzeln verringert. In den Porendurchmesserklassen 2–5 mm, > 5 mm wurden signifikant höhere Bioporendichten nach Wegwarte ermittelt als nach Lu oder Rs (Tab. 4, S. 31). Eine Zunahme der Bioporen war vor allem in der Durchmesserklasse 2–5 mm nach dem Anbau von Ww zu verzeichnen (Abb. 8, S. 32). Die Schaffung von Poren durch das Wurzelsystem der Wegwarte erscheint daher plausibel.

In einem Vorversuch war die Bioporendichte > 5 mm nach Anbau von Luzerne im Vergleich zur Fruchtfolge an drei Standorten teilweise signifikant erhöht (KAUTZ et al. 2010). DREESMANN (1994) fand ebenfalls am Campus Klein-Altendorf nach Luzernegras höhere Bioporendichten (2–5 mm) als in Fruchtfolgen mit Klee gras oder Wintergerste. Ein Großteil der Luzernepfahlwurzeln war erst nach etwa zwei Jahren abgebaut, wobei ein Rückgang von 115 auf 2 Pfahlwurzeln je  $m^{-2}$  beobachtet wurde (DREESMANN 1994). Aus diesem Grund wurde die Bioporendichte im vorliegenden Versuch erst nach zwei Jahren Brache endgültig bestimmt.

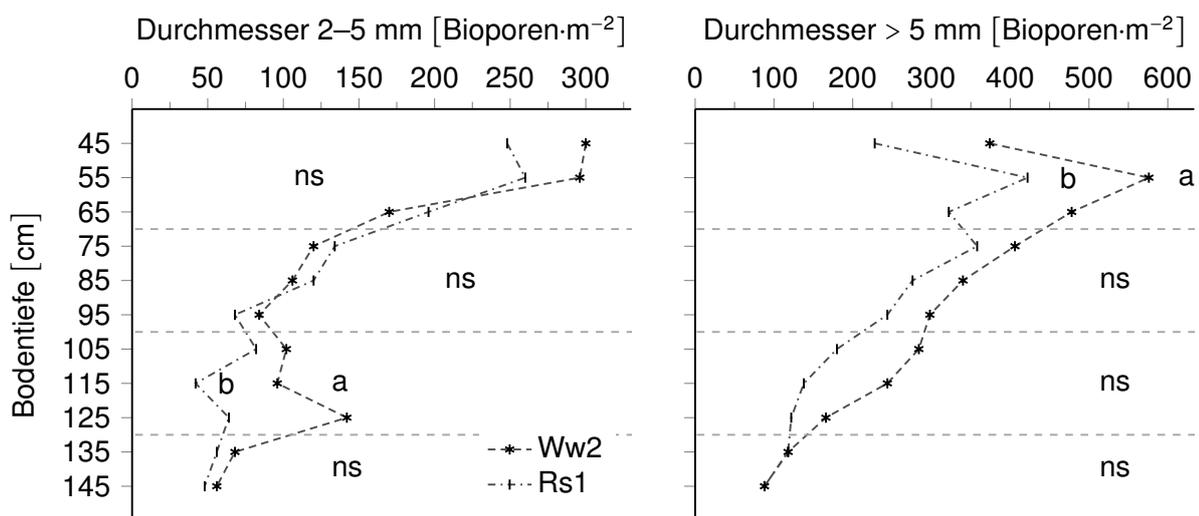
Im Versuch von DREESMANN (1994) wurde die Ausgangsporendichte vor Anlage des Versuches nicht bestimmt. Daher konnte auch dort nicht eindeutig geklärt werden, ob die Poren durch Wurzeln generiert wurden oder ob Wurzeln in bestehende Poren einwuchsen und diese stabilisierten, indem sie durch ihr Dickenwachstum lose Bodenpartikel und abgestorbene

### 3. Ergebnisse und Diskussion

Wurzelreste an die Porenwand drückten. Ein Indiz für eine solche Stabilisierung von Poren durch einwachsende Wurzeln lässt sich jedoch aus der WLD der Wegwarte in Bioporen ableiten. Sowohl die absolute als auch die relative WLD in Bioporen war bei Wegwarte höher als bei Luzerne und Rohrschwengel (Anhang-Abb. 9, S. 139). Dieses Ergebnis ist plausibel, da wie oben beschrieben die Wegwarte auch die höchsten Wurzeldurchmesser aufwies und somit bestehende Bioporen aktiv stabilisieren kann.

**Bioporendichte und Wurzeldurchmesser im Unterboden** Die Tiefenverteilung von Bioporen wurde im Sommer 2011 ermittelt (Abb. 9). Dabei wurde der Einfluss der Varianten Ww2 und Rs1 auf die Bioporendichte in einer Tiefe von 45 bis 145 cm untersucht. Die Variantenauswahl erfolgte aufgrund der Annahme, dass der einjährige Anbau von Rohrschwengel einen geringeren Einfluss auf die Bioporengense hat als der zweijährige Anbau der allorhizen Wegwarte. Beide Arten sind zudem keine Leguminosen, so dass die Effekte des Bodengefüges nicht durch Stickstoffwirkungen überlagert sind.

Im Allgemeinen war die Bioporendichte mit Durchmesser > 5 mm höher als die Dichte der Poren mit einem geringeren Durchmesser (2–5 mm, Abb. 9). Zudem wurde ein Rückgang der Bioporendichte mit der Bodentiefe festgestellt. Ab 105 cm Bodentiefe wurden nach Ww2 mehr Bioporen (Durchmesser 2–5 mm) bestimmt als nach Rs1 (in der Tiefenklasse von 105 bis 125 cm war der Unterschied signifikant, Abb. 9). Nach Ww2 wurden von 45 bis 65 cm Bodentiefe signifikant mehr Bioporen (Durchmesser > 5 mm) gezählt als nach Rs1. Diese Tendenz bestand noch bis in 125 cm Bodentiefe, während unterhalb davon keine Unterschiede mehr vorhanden waren.



**Abb. 9: Bioporendichte** [offene Poren·m<sup>-2</sup>] in den Porendurchmesserklassen 2–5 mm (links) und > 5 mm (rechts) in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der Vorfrucht-Variante (Ww2: zweijähriger Wegwarte-Anbau, Rs1: einjähriger Rohrschwengel-Anbau). Versuch A, 27.06.–19.07.2011. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Tiefenklasse (ns=nicht signifikant). Varianzanalyse ( $\alpha=0,05$ ).

Analog zur WLD der Futterpflanzen (Abb. 6, S. 29) nahm auch die Bioporendichte mit zunehmender Tiefe ab. Dieser Trend wurde ebenfalls mittels *in situ*-Endoskopie (vgl. KAUTZ & KÖPKE 2010) im selben Feldversuch festgestellt (ATHMANN et al. 2013). Eine Abnahme von Regenwurmröhren unterhalb von 50 cm bis in 130 cm Bodentiefe wurde in einem anderen Feldversuch gezeigt (WANG et al. 1986).

Der mittlere Durchmesser der Vorfruchtwurzeln änderte sich mit der Bodentiefe von 45 bis 105 cm nur geringfügig (Anhang-Tab. 10, S. 128). In der Durchmesserklasse 0–0,2 mm wurde eine Abnahme der WL der allorhizen Wurzeln mit der Bodentiefe festgestellt. Der Anteil der Wurzeln mit einem Durchmesser zwischen 0,2 und 0,4 mm nahm mit der Bodentiefe zu. Die homorhizen Rohrschwengelwurzeln verhielten sich gegenläufig. In den Durchmesserklassen größer als 0,8 mm zeigten alle Futterpflanzenarten eine Abnahme der Wurzelanteile mit zunehmender Bodentiefe. Die Unterschiede waren nur bei Rs signifikant.

Anhand von Tab. 5 und Anhang-Tab. 10 (S. 128) wird deutlich, dass bei den allorhizen Kulturen unterhalb von 45 cm Bodentiefe ebenso wie beim homorhizen Rohrschwengel der größte Anteil der WL geringere Durchmesser als 1 mm hatte. Nur zwischen 1,2 und 3,7 % der gesamten WL der allorhizen Kulturen und 0,3 bis 0,9 % der WL von Rs wiesen Durchmesser größer 1 mm auf. Um der Frage nachzugehen, ob diese geringen Anteile der WL in den entsprechenden Bodenschichten einen Beitrag zur Porenneubildung geleistet haben, werden im Folgenden Wurzel Durchmesser > 2 mm betrachtet (Tab. 6). Diese Einschränkung wird gewählt, da davon ausgegangen wird, dass Bioporen mit einem Durchmesser > 2 mm nur durch Wurzeln mit einem ausreichend großen Durchmesser generiert werden können.

Zur Abschätzung des Wurzeinflusses auf die Bioporengenesse aus einem weiteren Blickwinkel wird auf die Ergebnisse der Untersuchung der Wurzelsysteme der Vorfrüchte mit der Monolithmethode zurückgegriffen. Anhand der bestimmten WL wurden Wurzelstücke  $\cdot m^{-2}$  berechnet (Tab. 6). Zum besseren Verständnis der Berechnung muss noch einmal die methodische Vorgehensweise verdeutlicht werden. Die Bestimmung der Wurzellänge erfolgte mithilfe von Monolithen mit den Maßen  $25 \times 10 \times 10$  cm. Die Länge der enthaltenen Wurzelstücke mit einem Durchmesser > 2 mm wurden addiert, um die Gesamt-Wurzellänge im Monolithen zu erhalten. Bei Annahme von ausschließlich vertikalem Wurzelwachstum kann durch Bezug der WL auf die Höhe des Monolithen (10 cm) eine theoretische Wurzelanzahl pro Monolith (Wurzelstücke) ermittelt werden (Tab. 6). Diese Größe erlaubt eine Abschätzung der Anzahl Wurzeln, die potentiell zur Porenneubildung beigetragen haben.

Eine Differenzierung aufgrund des Wurzelsystems kann mithilfe der Kenngröße Wurzelstücke  $\cdot m^{-2}$  bestätigt werden. So wurden bei den allorhizen Kulturen in 45 bis 55 cm Bodentiefe über 50 Wurzelstücke  $\cdot m^{-2}$  ermittelt, während es beim Rohrschwengel nur 6 Wurzelstücke  $\cdot m^{-2}$  waren (Tab. 6). Im Fall von Rs kann der niedrige Wert als Messungenauigkeit vernachlässigt werden, da nicht angenommen werden kann, dass das feine Wurzelsystem des Rs überhaupt Wurzel Durchmesser > 2 mm erreichte. Die Anzahl von 115 Wurzelstücken je Quadratmeter der Luzerne erscheint plausibel, da nach Luzerne 270 Poren  $\cdot m^{-2}$  (> 2 mm) ermittelt wurden (Tab. 6). Im Vergleich sind dagegen 53 Wurzelstücke je Quadratmeter

### 3. Ergebnisse und Diskussion

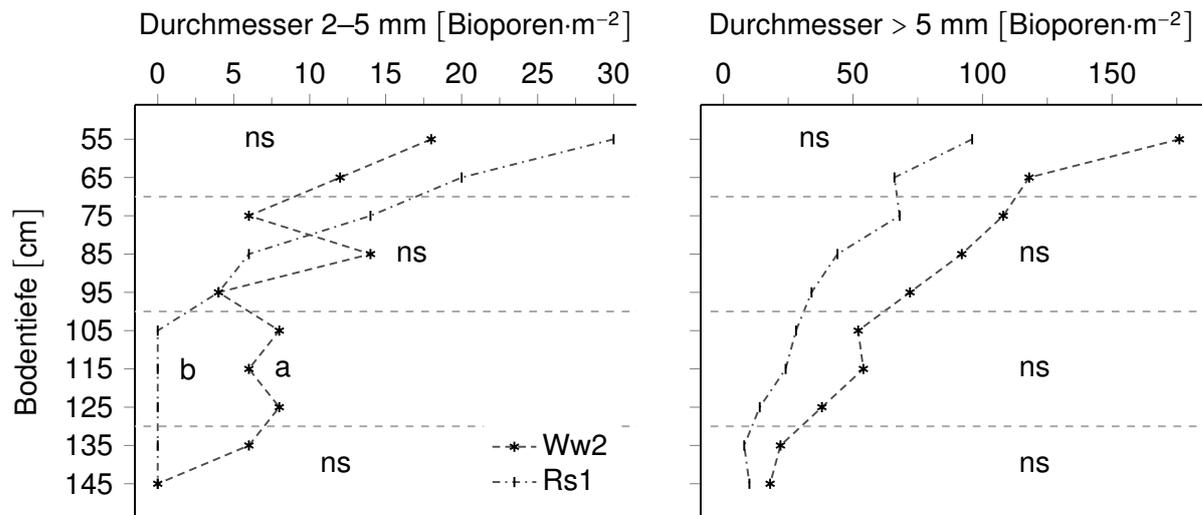
**Tab. 6: Wurzellänge** [ $\text{km}\cdot\text{m}^{-2}$ ] (WL) und **Anzahl Wurzelstücke von je 10 cm Länge** [Wurzelstücke  $\cdot \text{m}^{-2}$ ] mit einem Wurzeldurchmesser  $> 2 \text{ mm}$  von **Luzerne, Wegwarte** und **Rohrschwengel** in Abhängigkeit von der Bodentiefe [cm]. Versuch B, 27.09.2011–04.10.2011. Monolithmethode in den Bodentiefen von 45–105 cm.

Tiefe	Luzerne		Wegwarte		Rohrschwengel	
	WL	Wurzelstücke	WL	Wurzelstücke	WL	Wurzelstücke
45–55	0,0115	115	0,0053	53	0,0006	6
55–65	0,0098	98	0,0039	39	0,0003	3
65–75	0,0077	77	0,0027	27	0,0002	2
75–85	0,0068	68	0,0028	28	0,0002	2
85–95	0,0078	78	0,0019	19	0,0002	2
95–105	0,0034	34	0,0016	16	0,0001	1

von Wegwarte überraschend niedrig, da nach Wegwarte die höchste Bioporendichte von  $358 \text{ Poren}\cdot\text{m}^{-2} > 2 \text{ mm}$  festgestellt wurde (Tab. 6). Beim direkten Vergleich der Ergebnisse muss beachtet werden, dass die Wurzelarchitektur der Vorfrüchte in Versuch B untersucht wurde, während die hier diskutierte Bioporendichte in Versuch A festgestellt wurde. Es ist möglich, dass durch einen Jahreseffekt die Entwicklung der Wegwarte in beiden Versuchen unterschiedlich war. Eine spätere Untersuchung der Bioporendichte in Versuch B kam zu dem Ergebnis, dass nach Luzerne mehr Poren vorhanden waren als nach Wegwarte (HAN et al. 2015a). Aber auch methodische Probleme können nicht ausgeschlossen werden. Die Wurzeln der Wegwarte zersetzen sich im Boden relativ schnell, so dass sich zum Teil schon die Rinde der Wurzeln gelöst hatte und dadurch möglicherweise die Durchmesser der Wurzeln unterschätzt wurden. Trotz methodischer Unsicherheiten kann abgeschätzt werden, dass mehr als die Hälfte der Bioporen schon vor Beginn des Versuchs existierte. Dies ist ein weiteres Argument für die von DREESMANN (1994) aufgestellte These, dass Pflanzenwurzeln zur Stabilisierung von bereits bestehenden Poren beitragen.

Da Rs1 in 80 cm Bodentiefe schon 95 % der Gesamt-Wurzellänge erreichte, ist nicht davon auszugehen, dass die wenigen tieferen homorhizen Wurzeln in der Lage waren, Poren der untersuchten Größenklassen zu generieren. Die in der Rs1-Variante beobachtete Durchporung unterhalb von 80 cm kann daher als Ausgangszustand zu Beginn des Versuchs betrachtet werden (Abb. 9, S. 34). Da die Durchwurzelungstiefe von Ww2 180 cm betrug und die mittleren Wurzeldurchmesser bis 105 cm nur eine geringe Abnahme mit der Tiefe zeigten, erscheint die Genese von Bioporen zwischen 105 und 125 cm Bodentiefe durch Wegwarte plausibel. Unterhalb von 125 cm Bodentiefe war der Einfluss der Wurzeln auf die Bioporengese gering. Dies ist nachvollziehbar, da sowohl die WLD als auch die Wurzeldurchmesser im tiefen Boden abnehmen.

**Porenkontinuität** Analog zur Bioporendichte nahm auch die Dichte der kontinuierlichen Bioporen mit zunehmender Bodentiefe ab (Abb. 10). In der Bodentiefe von 55 bis 75 cm wurden



**Abb. 10: Bioporendichte** [kontinuierliche Poren·m<sup>-2</sup>] in den Porendurchmesserklassen 2–5 mm (links) und > 5 mm (rechts) in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der Vorfrucht-Variante (Ww2: zweijähriger Wegwarte-Anbau, Rs1: einjähriger Rohrschwingelanbau). Versuch A, 27.06.–19.07.2011. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Tiefenklasse (ns=nicht signifikant). Varianzanalyse ( $\alpha=0,05$ ).

nach Rs1 mehr kontinuierliche Bioporen mit einem Durchmesser von 2–5 mm ermittelt als nach Ww2. Ab 85 cm Bodentiefe nahm die Dichte kontinuierlicher Bioporen nach Rs1 stark ab, so dass unterhalb von 105 cm keine kontinuierlichen Bioporen ermittelt wurden. Im Gegensatz dazu waren nach Ww2 in den Bodentiefen von 105 bis 135 cm noch jeweils etwa sieben kontinuierliche Poren·m<sup>-2</sup> vorhanden. Von 105 bis 125 cm Bodentiefe war dieser Unterschied signifikant. In der Bodentiefe 145 cm wurden für beide Varianten keine kontinuierlichen Bioporen der Durchmesserklasse 2–5 mm mehr gefunden.

In allen Bodentiefen wurden nach Ww2 mehr kontinuierliche Bioporen > 5 mm ermittelt als nach einjährigem Rohrschwingelanbau (Abb. 10, rechts). Nach Rs1 reduzierte sich die Dichte kontinuierlicher Bioporen von 96 Poren·m<sup>-2</sup> in 55 cm Bodentiefe auf 10 Poren·m<sup>-2</sup> in 145 cm Bodentiefe, während die Dichte kontinuierlicher Bioporen nach Ww2 von 176 Poren·m<sup>-2</sup> in 55 cm Bodentiefe auf 18 Poren·m<sup>-2</sup> in 145 cm Bodentiefe abnahm.

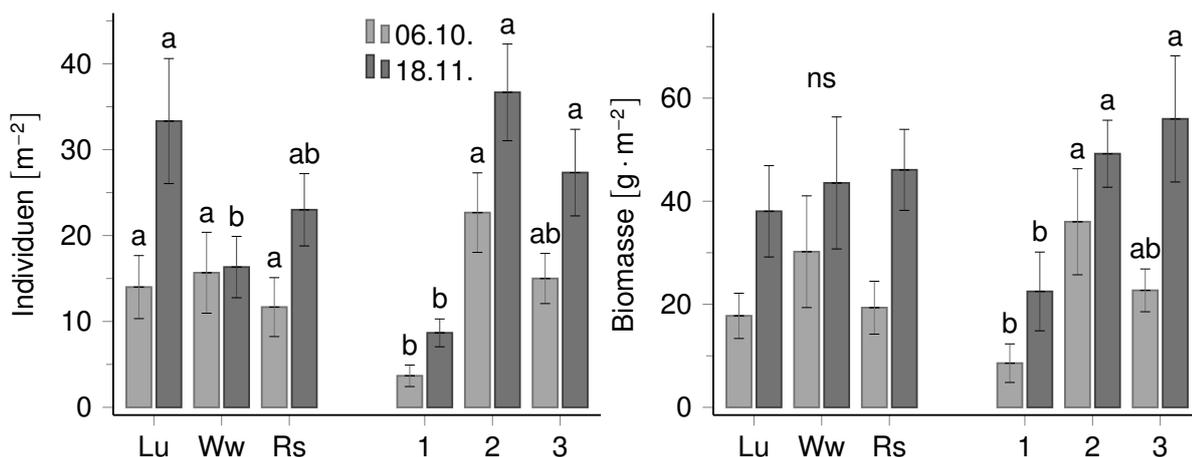
Eine Steigerung der Porenkontinuität durch den Anbau einer allorhizen Kultur, wie im Versuch durch zweijährigen Wegwarte-Anbau realisiert, wurde von vielen Autoren beschrieben. MEEK et al. (1990) zeigten, dass die Infiltrationsrate durch Makroporen nach Luzerne-Anbau mit der Anbaudauer (1 bis 4 Jahre) anstieg. Die erhöhte Infiltrationsrate nach Luzerne-Anbau wurde von MITCHELL et al. (1995) bestätigt. Auch DREESMANN (1994) stellte eine höhere Kontinuität von Poren > 5 mm, gemessen ab 20 cm Bodentiefe, nach Luzerne und Klee gras im Vergleich zu Wintergerste fest. Dies wurde auf eine Aktivitätssteigerung von Regenwürmern zurückgeführt. Die Abnahme der Anzahl kontinuierlicher Poren mit zunehmender Tiefe wird durch die Ergebnisse von BUNDT et al. (2000) bestätigt. In ihrem Experiment sank der Anteil der bevorzugten Fließpfade mit zunehmender Bodentiefe.

### Bioporengese durch Regenwürmer

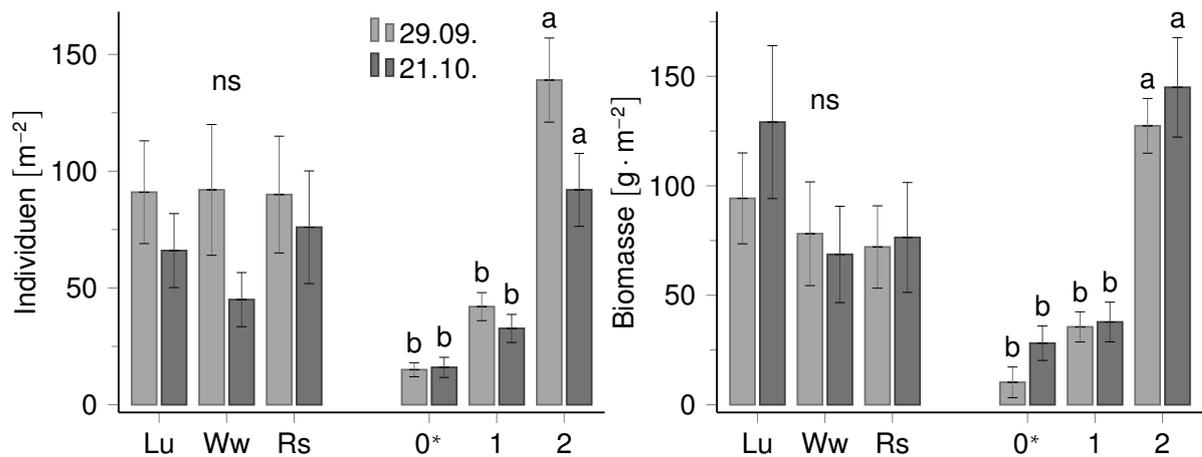
Die Ergebnisse für Abundanz und Biomasse von *Lumbricus terrestris* werden im Folgenden nach den Hauptwirkungen dargestellt, da keine Wechselwirkungen zwischen den Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer beobachtet wurden. Der Standardfehler wurde als Streuungsmaß gewählt, da er bei Abweichungen vom Stichprobenumfang, die im Jahr 2010 gegeben waren, robust ist.

Die erste Erhebung von *L. terrestris* erfolgte im Versuch A zum Ende der Vorfruchtphase im Herbst 2009 (Abb. 11). Am 06.10.2009 und 18.11.2009 wurden in Versuch A im Mittel aller Varianten 13,8 und 24,2 Ind. $\cdot$ m<sup>-2</sup> (1. und 2. Untersuchungstermin) sowie 22,4 und 42,6 g $\cdot$ m<sup>-2</sup> Biomasse (1. und 2. Untersuchungstermin) erhoben. Zum 2. Untersuchungstermin wurden bei Luzerne signifikant mehr Individuen erfasst als bei Wegwarte. Sowohl die Biomasse als auch die Abundanz war bei mehrjährigem Anbau höher als nach einjährigem.

In Versuch B wurde im Herbst 2010 die Regenwurmpopulation in frisch gepflügten Referenzflächen sowie in Varianten mit ein- und zweijährigem Futterpflanzenanbau (letzte Bodenbearbeitung im Frühjahr 2010 bzw. im Frühjahr 2009) untersucht (Abb. 12). Die Kulturart hatte keine signifikante Wirkung auf Abundanz und Biomasse von *L. terrestris*. Zu beiden Untersuchungsterminen wurden signifikant höhere Werte nach zweijährigem Anbau im Vergleich zur Referenz und einjährigem Anbau ermittelt. Neben der höheren Futterverfügbarkeit durch die Mulchnutzung in Varianten mit ein- oder zweijährigem Futterpflanzenanbau kann auch die länger zurückliegende Bodenbearbeitung ausschlaggebend für die erhöhte Abundanz der Regenwürmer gewesen sein. Durch die kurz vor der Untersuchung erfolgte Bodenbearbeitung mit dem Pflug entspricht die Referenzfläche einer Behandlung ohne Boden-



**Abb. 11: Abundanz (links) und Biomasse (rechts) von *Lumbricus terrestris* in Abhängigkeit von der Kulturart (Lu: Luzerne, Ww: Wegwarte, Rs: Rohrschwengel, jeweils über die Anbaudauer gemittelt) und der Anbaudauer (ein-, zwei- und dreijähriger Anbau, jeweils über die Kulturart gemittelt). Versuch A, 06.10.2009 und 18.11.2009. Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar. Varianten mit gleichem Buchstaben an einem Datum unterscheiden sich nicht signifikant (ns=nicht signifikant). Varianzanalyse mit Tukey-Test ( $\alpha=0,05$ ).**



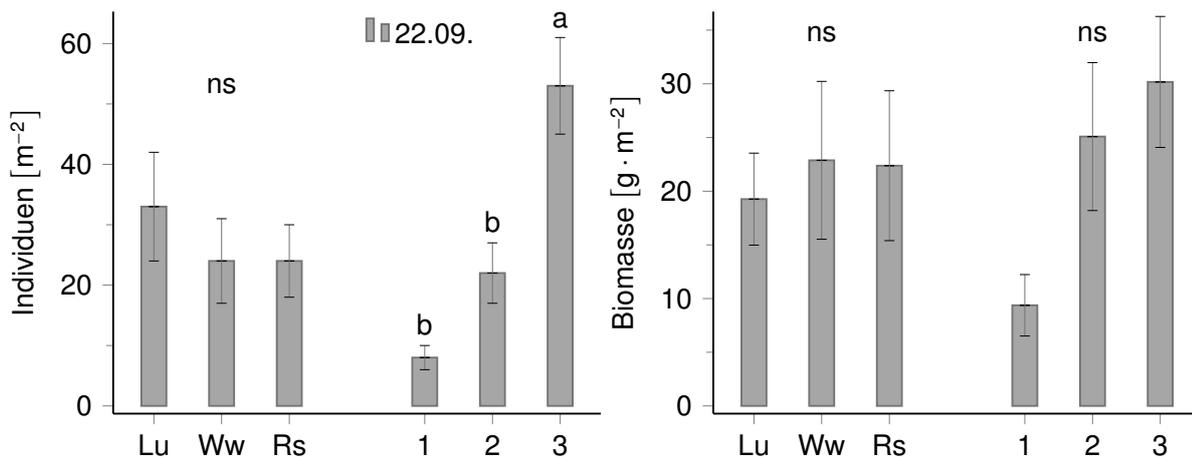
**Abb. 12: Abundanz (links) und Biomasse (rechts) von *Lumbricus terrestris*** in Abhängigkeit von der Kulturart (Lu: Luzerne, Ww: Wegwarte, Rs: Rohrschwengel, jeweils über die Anbaudauer gemittelt) und der Anbaudauer (frisch gepflügte Referenzflächen vor der Einsaat der Futterpflanze (0\*) sowie ein- und zweijähriger Anbau). Versuch B, 29.09.2010 und 21.10.2010. Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar. Varianten mit gleichem Buchstaben an einem Datum unterscheiden sich nicht signifikant (ns=nicht signifikant). Varianzanalyse mit Scheffé-Test ( $\alpha=0,05$ ).

ruhe. Demgegenüber ging der ein- und zweijährige Anbau mit einer ebenso langen Bodenruhe einher. 2010 wurden in Versuch B im Durchschnitt 91,0 und 62,3 Ind. $\cdot m^{-2}$  (29.09.2010 und 21.10.2010) sowie 81,5 und 91,4 g $\cdot m^{-2}$  Biomasse (1. und 2. Untersuchungstermin) ermittelt (Abb. 12).

Ein Jahr später (22.09.2011, Ende der Vorfruchtphase) erfolgte die Austreibung der Regenwürmer in Versuch B (Abb. 13) ohne Differenzierung nach kleinen und großen Individuen. Es wurden im Mittel 27,0 Ind. $\cdot m^{-2}$  mit einer Biomasse von 21,5 g $\cdot m^{-2}$  erhoben. Die Abundanz und die Biomasse von *L. terrestris* nahmen ebenfalls mit steigender Anbaudauer zu.

Die in der Literatur beschriebene Förderung der anözischen Regenwurmpopulation durch Bodenruhe (FINCK 1952, EHLERS 1975, CHAN 2001) konnte im vorliegenden Versuch bestätigt werden. Demgegenüber hatte die Art der Futterpflanze nur in einem Jahr und zu einem Termin (Abb. 11) einen signifikanten Einfluss auf die Abundanz, aber nicht auf die Biomasse von *Lumbricus terrestris*. Zu allen anderen Untersuchungszeitpunkten in den Jahren 2010 bis 2011 (Abb. 12–14) wurde kein Einfluss der Futterpflanzenart auf Abundanz und Biomasse der Regenwürmer ermittelt. Auch VALCKX et al. (2011) konnten eine durch C/N-Gehalte der Nahrungssubstrate wesentlich beeinflusste Nahrungsaufnahme von Regenwürmern im Feldversuch nicht bestätigen. Dieser Sachverhalt steht im Gegensatz zu Laborversuchen, in denen eine Fütterung von *L. terrestris* mit Blättern von Luzerne und Klee mit einem engen C/N-Verhältnis zu hohen Gewichtszunahmen führte, während Maisblätter und Sprossmaterial der Wehrlosen Treppe mit weiten C/N-Verhältnissen nur eine geringe Zunahme oder sogar Gewichtsverlust nach sich zogen (SHIPITALO 1988). Es ist also anzunehmen, dass unter natürlichen Bedingungen andere Faktoren einen stärkeren Einfluss haben als die Futterqualität.

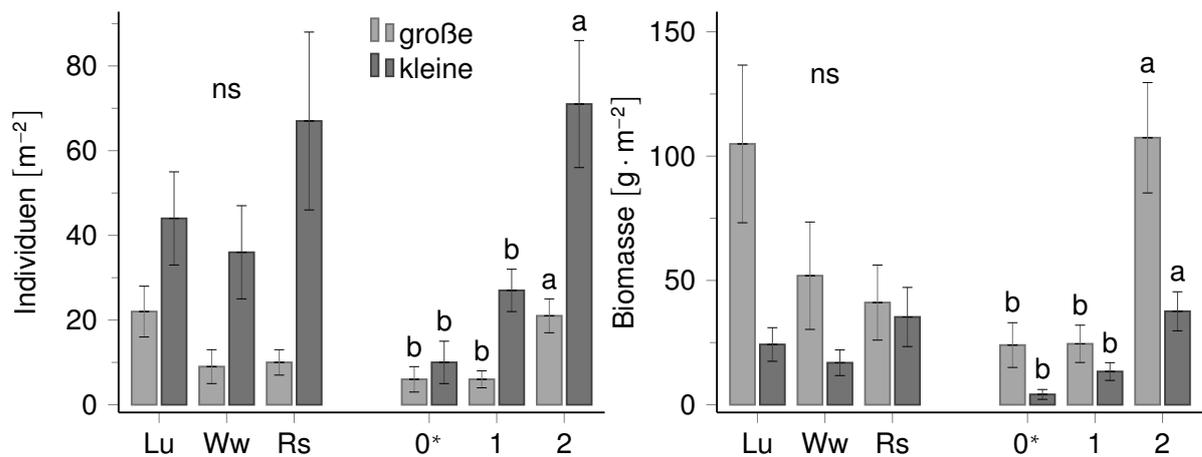
### 3. Ergebnisse und Diskussion



**Abb. 13: Abundanz (links) und Biomasse (rechts) von *Lumbricus terrestris*** in Abhängigkeit von der Kulturart (Lu: Luzerne, Ww: Wegwarte, Rs: Rohrschwengel, jeweils über die Anbaudauer gemittelt) und der Anbaudauer (ein-, zwei- und dreijähriger Anbau, jeweils über die Kulturart gemittelt). Versuch B, 22.09.2011. Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar. Varianten mit gleichem Buchstaben an einem Datum unterscheiden sich nicht signifikant (ns=nicht signifikant). Varianzanalyse mit Tukey-Test ( $\alpha=0,05$ ).

Die Differenzierung nach großen und kleinen Individuen auf Basis der Biomasse (Versuch B, Herbst 2010, 2. Untersuchungstermin) zeigte, dass die Steigerung der Abundanz von *L. terrestris* besonders auf einer Zunahme von Individuen mit einer Biomasse unter 2 g beruhte (Abb. 14). Durch eine zweijährige Bodenruhe wurden juvenile und adulte Regenwürmer signifikant gefördert. Dagegen zeigte sich für beide Gruppen kein signifikanter Unterschied bezüglich Abundanz und Biomasse zwischen der gerade gepflügten Referenz und einjährigem Futterpflanzenanbau. Individuen mit einem Gewicht unter 2 g können als juvenil eingestuft werden, da das mittlere Gewicht bei Erreichen der Geschlechtsreife von *L. terrestris* etwa 2,3 bis 3,2 g beträgt (DANIEL et al. 1996). In Varianten mit zweijährigem Futterpflanzenanbau war die Abundanz von Regenwürmern <2 g gegenüber einjährigen Varianten um den Faktor 3 und gegenüber den gerade gepflügten Flächen um den Faktor 8 höher. Eine deutliche Erhöhung des Reproduktionserfolgs der Regenwürmer konnte also schon durch die einmalige Unterlassung der Bodenbearbeitung erzielt werden.

Welche Porendurchmesser in Abhängigkeit vom Körpergewicht des Regenwurms zu erwarten sind, ist anhand der vorliegenden Literatur schwer abzuschätzen. Dies liegt zum Beispiel daran, dass unter natürlichen Bedingungen vor allem bei juvenilen Regenwürmern nicht davon ausgegangen werden kann, dass sie ihre Pore auch selber geschaffen haben (KAUTZ et al. 2014). Die Gewichtszunahme von adulten Regenwürmern ist geringer als die der Jungtiere, da das Wachstum in Konkurrenz mit der Reproduktion tritt (DANIEL 1995). Individuen, die im Sommer 2011 (in Versuch B) mit etwas mehr als 2 g Gewicht geschlechtsreif wurden, benötigten schätzungsweise noch ein weiteres Jahr, um ein Gewicht von 4 g zu erreichen. Um eine genauere Abschätzung des Zusammenhangs zwischen Biomasse des Regenwurms und Durchmesser der Regenwurmröhre zu erhalten, bedarf es eines Laborversuchs, in dem



**Abb. 14: Abundanz (links) und Biomasse (rechts) von *Lumbricus terrestris*** in Abhängigkeit von der Kulturart (Lu: Luzerne, Ww: Wegwarte und Rs: Rohrschwengel) und der Anbaudauer (frisch gepflügte Referenzflächen vor der Einsaat der Futterpflanze (0\*) sowie ein- und zweijähriger Anbau, jeweils über die Kulturart gemittelt). Aufgeschlüsselt nach großen (> 2 g) und kleinen Individuen (< 2 g). Versuch B, 21.10.2010. Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar. Varianten mit gleichem Buchstaben innerhalb einer Gewichtsklasse unterscheiden sich nicht signifikant (ns=nicht signifikant). Varianzanalyse mit Scheffé-Test ( $\alpha=0,05$ ).

*L. terrestris* verschiedener Gewichtsklassen in Bodensäulen mit geschüttetem Boden Röhren anlegen. Die Individuen mit einer Biomasse unter 2 g sind aufgrund ihrer geringen Größe wahrscheinlich nicht in der Lage, Bioporen mit einem Durchmesser > 5 mm zu schaffen. Außerdem besiedelten bis zu 75 % der juvenilen Würmer in einem Gefäßexperiment mit *L. terrestris* keine eigene Pore (GRIGOROPOULOU et al. 2009), sondern nutzten bereits bestehende Poren.

Bei mehrjährigem Anbau wurde eine nicht signifikante Erhöhung von etwa 30 Poren·m<sup>-2</sup> im Vergleich zur einjährigen Kultur festgestellt (Tab. 4, S. 31), so dass in der Durchmesserklasse 2–5 mm durchaus vereinzelt Poren durch Regenwürmer generiert worden sein können. Es ist aber hauptsächlich davon auszugehen, dass die Schaffung von Poren durch Regenwürmer unter den gegebenen Bedingungen eine längere Zeitspanne mit günstigen Bedingungen benötigt als die im Versuch erreichten drei Jahre.

Diese Prognose hat auch Bestand, wenn nicht das Körpergewicht der Regenwürmer, sondern deren Reproduktion analysiert wird. Vom Schlupf der Jungtiere im Sommer aus den hauptsächlich im Herbst und Frühling abgelegten Kokons bis zur Geschlechtsreife kann im Freiland mehr als ein Jahr vergehen (DANIEL et al. 1996, KOTCON 2011). Das bedeutet, dass die juvenilen Individuen, die im Herbst 2010 in Varianten mit zweijährigem Futterpflanzenanbau festgestellt wurden, erst im folgenden Sommer 2011 (dreijähriger Futterpflanzenanbau) geschlechtsreif waren und zur weiteren Reproduktion beitragen konnten. Demnach waren die durch hohe Futterverfügbarkeit und Bodenruhe geförderten Jungtiere erst zum Ende der Futterpflanzenphase fortpflanzungsfähig, so dass zukünftig eine weitere Stärkung der Population durch diese

### 3. Ergebnisse und Diskussion

---

Individuen besonders bei anhaltender Bodenruhe zu erwarten ist.

Regenwürmer neigen dazu, bereits vorhandene Bioporen zu nutzen. Dieser Sachverhalt wurde am Standort Klein-Altendorf in unmittelbarer Nähe zu den Versuchsflächen beobachtet (LÜSEBRINK 2012, KAUTZ et al. 2014). Für die Untersuchung wurden Regenwürmer mit einem selbst aushärtenden Elastomer markiert und anschließend durch eine gestörte Bodenschicht auf eine zuvor hinsichtlich ihrer Bioporendichte kartierte Fläche gegeben. Durch schichtweises Abtragen des Bodens und Anlage von Karten konnte der von den Regenwürmern zurückgelegte Weg nachverfolgt werden. Der Vergleich der Bioporendichte mit der Regenwurm-Abundanz legt nahe, dass den Regenwürmern genügend bestehende Poren zur Verfügung standen. Die maximal ermittelte Abundanz von  $139,0 \text{ Ind.}\cdot\text{m}^{-2}$  (29.09.2010, Versuch B) steht einer Bioporendichte von  $392 \text{ Poren}\cdot\text{m}^{-2}$  mit einem Durchmesser  $> 2 \text{ mm}$  gegenüber.

Regenwurmröhren werden oft in der Nähe von Bodenrissen beobachtet. Dabei ist aber unklar, ob die Regenwürmer diese Zonen im Boden mit geringerem Widerstand bevorzugen oder ob die Risse durch diese erst entstehen (CHADŒUF et al. 1994, KREBS et al. 1994). CAPOWIEZ et al. (2009) konnten zeigen, dass Regenwürmer verdichtete Zonen meiden, obwohl sie grundsätzlich in der Lage sind, Röhren in verdichteten Zonen anzulegen. Die Befunde werden durch zusätzliche Untersuchungen mithilfe von Röntgen-Computertomographie an ungestörten Bodenzylindern aus dem Feldversuch belegt (PAGENKEMPER et al. 2013). In die Bodenzylinder inkubierte Regenwürmer nutzten eher bestehende Bioporen, anstatt neue Röhren anzulegen. Juvenile Regenwürmer, auf denen im Versuch die Zunahme der Abundanz beruhte, generierten in Versuchen von KAUTZ et al. (2014) nur in Ausnahmefällen neue Bioporen.

Die Populationsdichte betrug nach einjährigem Futterpflanzenanbau in den drei untersuchten Jahren zwischen  $3,7$  und  $37,4 \text{ Ind.}\cdot\text{m}^{-2}$  und war damit zu einem Termin deutlich überhalb der Spannweite von  $1,0$  bis  $18,8 \text{ Ind.}\cdot\text{m}^{-2}$ , welche DINTER et al. (2013) für sieben Feldversuche (Acker oder Brache, kein Grünland) in Deutschland angeben. Die große Spannweite der erhobenen Abundanzen (vgl. Abb. 11, Abb. 12 und Abb. 13) liegt vermutlich darin begründet, dass die Aktivität der Regenwürmer stark von der Witterung abhängt. Insbesondere die Bodenfeuchte, die vom vorangegangenen Niederschlag bestimmt wird, ist hierfür von Bedeutung. Im Jahr 2010, in dem die höchsten Regenwurmabundanzen festgestellt wurden, gab es in den zwei Monaten vor der Beprobung deutlich höhere Niederschläge als in den folgenden Jahren.

Eine Anbaudauer von zwei oder drei Jahren im Vergleich zu einem Jahr und die damit verbundene Bodenruhe resultierte in allen Jahren in einer Zunahme der Abundanz und Biomasse von *L. terrestris*. Im Gegensatz zu Regenwurmabundanz und -biomasse wurde die Bioporendichte nicht signifikant von der Anbaudauer beeinflusst. Stattdessen hatte die angebaute Futterpflanzenart einen signifikanten Einfluss. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass *L. terrestris* im Zeitraum des Versuches nicht signifikant zur Poren-Neubildung beigetragen hat und die Poren vorwiegend durch das Wurzelwachstum der Futterpflanzen generiert wurden.

Auch wenn im vorliegenden Versuch eine Genese von Bioporen durch Regenwürmer nicht festgestellt werden konnte, können Regenwürmer einen wichtigen Beitrag zur Beschaffenheit der

**Tab. 7: Anteil verfüllter Poren an der Gesamtporenabundanz [%]** in Abhängigkeit vom Porendurchmesser und der Vorfrucht-Variante (Kulturarten Luzerne (Lu), Wegwarte (Ww) und Rohrschwengel (Rs) mit ein-, zwei- oder dreijähriger Anbaudauer) in 45 cm Bodentiefe. Versuch A, Frühjahr 2012. Keine signifikanten Unterschiede bezüglich Vorfruchtart und Anbaudauer. Varianzanalyse mit Tukey-Test ( $\alpha=0,05$ ).

Variante	2–5 mm	> 5 mm	> 2 mm
Lu1	28,0	34,5	29,8
Lu2	26,4	30,3	27,2
Lu3	19,5	29,3	22,4
Ww1	21,3	23,9	22,0
Ww2	18,2	24,8	20,1
Ww3	21,5	26,8	22,9
Rs1	22,8	33,0	26,8
Rs2	22,7	34,0	25,4
Rs3	15,9	30,8	21,3

Biopore leisten. PAGENKEMPER et al. (2013) zeigten, dass der Durchgang von Regenwürmern durch eine bereits bestehende Biopore deren morphologische Beschaffenheit verändert. Die Regenwürmer verbanden Poren untereinander, entfernten Verfüllungen und erhöhten dadurch die Konnektivität und Kontinuität der Poren. Dieser Sachverhalt wird dadurch unterstützt, dass im Feldversuch eine Abnahme des Anteils verfüllter Poren mit steigender Anbaudauer von Luzerne und Rohrschwengel ermittelt wurde (Tab. 7, nicht signifikant).

## 3.B. Nachfruchtphase

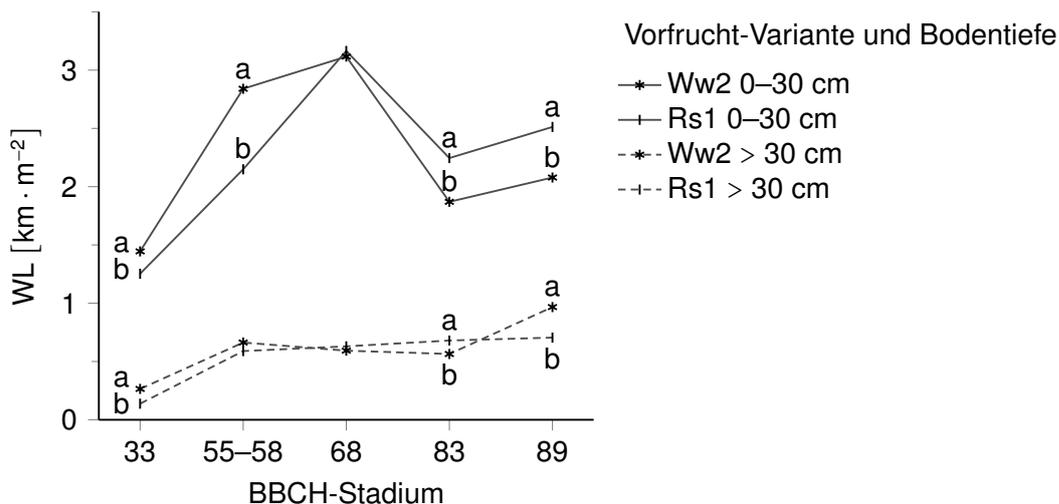
### 3.B.1. Vorfruchtnutzung und Wurzelwachstum der Nachfrüchte

Im Folgenden werden zunächst die wichtigsten Ergebnisse zum Wurzelwachstum der Nachfrüchte Sommerweizen, Futtermalve, Wintergerste und Winterrraps im *bulk*-Boden erläutert. Die Analyse des Wurzelwachstums wird in erster Linie anhand des Vergleichs der Vorfruchtwirkung von Rs1 und Ww2 durchgeführt. Durch diese Einschränkung kann ein Nährstoffeffekt ausgeschlossen werden, da beide Kulturen nicht in der Lage sind, Stickstoff aus der Luft zu binden.

#### Sommerweizen

Der größte Anteil der Wurzellänge (WL) von Sommerweizen befand sich im Oberboden (Abb. 15). In einem frühen Entwicklungsstadium (BBCH 33) wurden 1,3 bis 1,5  $\text{km}\cdot\text{m}^{-2}$  in der Bodenschicht von 0 bis 30 cm ermittelt. Die WL von Sommerweizen stieg im Oberboden bis zur Blüte auf etwa 3  $\text{km}\cdot\text{m}^{-2}$  an und nahm danach wieder ab. Dort war die WL von Sommerweizen nach Ww2 zu den ersten beiden Untersuchungszeitpunkten signifikant höher als nach Rs1 und *vice versa* zu den letzten zwei Untersuchungsterminen. Unterhalb von 30 cm Bodentiefe nahm die WL von Sommerweizen von 0,2  $\text{km}\cdot\text{m}^{-2}$  (BBCH 33) auf 0,7  $\text{km}\cdot\text{m}^{-2}$  (BBCH 55–58) zu und blieb bis zur Reife auf diesem Niveau. Auch in nachfolgenden Untersuchungen von HAN et al. (2015b) variierte der Effekt der Vorfrüchte auf die WLD im *bulk*-Boden in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium.

Die WL von Sommerweizen erreichte im Jahr 2010 Werte von 1,1  $\text{km}\cdot\text{m}^{-2}$  bis 4,6  $\text{km}\cdot\text{m}^{-2}$



**Abb. 15: Wurzellänge (WL) von Sommerweizen** in Abhängigkeit von BBCH-Stadium, Bodentiefenklasse und Vorfrucht-Variante (Ww2: zweijähriger Wegwarteanaubau, Rs1: einjähriger Rohrschwingelanbau). Versuch A, 31.05.–30.07.2010, Profilwandmethode. Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede innerhalb einer Bodentiefenklasse. Mann-Whitney-U-Test ( $\alpha=0,05$ ).

**Tab. 8: Gesamt-Wurzellänge** [ $\text{km}\cdot\text{m}^{-2}$ ], **Anteil der Wurzellänge im Ap-Horizont** [%] und **Durchwurzelungstiefe** [cm Bodentiefe] **von Sommerweizen** in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium und der Vorfrucht-Variante (Kulturarten Luzerne (Lu), Wegwarte (Ww) und Rohrschwengel (Rs) mit ein-, zwei- oder dreijähriger Anbaudauer). Versuch A, 31.05.–30.07.2010, Profilwandmethode. Kleinbuchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen Untersuchungsterminen, Großbuchstaben zwischen Vorfruchtkulturen einer Anbaudauer. Kruskal-Wallis-Test ( $\alpha=0,05$ ) mit Anschlussstest nach CAMPBELL & SKILLINGS (1985).

BBCH	33		55–58		68		83		89						
Gesamt-Wurzellänge [ $\text{km}\cdot\text{m}^{-2}$ ]															
Lu1	1,1	d	B	4,6	a	A	3,7	c	A	4,0	bc	A	4,5	ab	A
Ww1	1,1	c	B	2,0	b	C	3,0	a	B	2,9	a	B	3,4	a	B
Rs1	1,4	d	A	2,7	c	B	3,8	a	A	2,9	bc	B	3,2	b	B
Lu2	1,9	c		2,7	b	B	2,6	b	B	2,9	ab	A	3,1	a	
Ww2	1,7	d		3,4	ab	A	3,6	a	A	2,4	c	B	3,0	b	
Lu3	2,6	b	A	2,7	b	A	3,2	a		3,5	a	A	3,6	a	A
Ww3	1,2	d	B	2,1	c	B	3,0	a		2,6	b	B	2,8	ab	B
Anteil der Wurzellänge im Ap-Horizont [%]															
Lu1	92,1	a	A	86,6	b	A	84,7	b		67,8	c	C	69,7	c	B
Ww1	82,0	ab	B	77,1	c	B	83,9	a		80,8	bc	A	69,7	d	B
Rs1	90,3	a	A	78,8	c	B	83,0	b		76,7	c	B	78,0	c	A
Lu2	84,5	a		80,9	b		79,7	b	B	74,5	c	B	67,9	d	
Ww2	84,7	a		82,1	a		84,2	a	A	78,5	b	A	68,1	c	
Lu3	84,1	a		74,5	bc		76,6	b		74,2	bc	B	70,9	c	
Ww3	83,0	a		78,2	a		78,5	a		77,6	a	A	67,9	b	
Durchwurzelungstiefe [cm Bodentiefe]															
Lu1	35	d	B	47	c	B	49	c		62	b	A	78	a	B
Ww1	41	d	A	56	b	A	46	c		59	b	B	79	a	B
Rs1	37	d	B	49	c	B	48	c		56	b	C	94	a	A
Lu2	39	d	B	46	c		56	b	A	56	b		92	a	A
Ww2	42	d	A	49	c		48	c	B	54	b		81	a	B
Lu3	40	c		52	b	A	57	a		60	a	A	71	a	B
Ww3	40	d		47	c	B	52	b		56	b	B	91	a	A

(Tab. 8). Zu Beginn der Vegetation im 3-Knotenstadium bildete Sommerweizen nach Rs1 eine signifikant höhere WL als nach Lu1 und Ww1. Die hohe WL nach Rs1 ist gegebenenfalls ein Artefakt, da möglicherweise noch unverrottete Wurzeln der Vorfrucht Rohrschwengel mitgezählt wurden. Zum BBCH-Stadium 55–58 erreichte Sommerweizen nach Lu1 die höchste WL von  $4,6 \text{ km}\cdot\text{m}^{-2}$  (Rs1:  $2,7 \text{ km}\cdot\text{m}^{-2}$  und Ww1:  $2,0 \text{ km}\cdot\text{m}^{-2}$ ). Zum Ende der Blüte unterschied sich die WL nach Lu1 und Rs1 nicht voneinander, während nach Ww1 eine signifikant niedrigere WL festgestellt wurde. Zu den beiden letzten Untersuchungsterminen zeigte jeweils der nach

### 3. Ergebnisse und Diskussion

---

Lu1 angebaute Weizen die höhere WL verglichen mit den Vorfrüchten Ww1 oder Rs1.

Der Anteil der Wurzeln im Ap-Horizont nahm mit zunehmender Entwicklungsdauer durch die Erschließung des Unterbodens nach allen Vorfrüchten ab (Tab. 8). Die Futterpflanzenart hatte keinen einheitlichen Einfluss auf den Anteil der WL von Sommerweizen im Oberboden. Auch die Durchwurzelungstiefe des Sommerweizens wurde über den gesamten Vegetationsverlauf nicht konsistent von den verschiedenen Vorfrucht-Varianten beeinflusst.

Die Profilwanduntersuchung wurde zu den ersten vier Untersuchungsterminen (bis zur Teigreife) nur bis 80 cm ausgeführt. Die Durchwurzelungstiefe betrug in diesem Zeitraum zwischen 35 und 62 cm (Tab. 8). Sie nahm im Zeitverlauf zu, so dass sie zur Vollreife zwischen 71 und 94 cm lag. Möglicherweise wurden Variantenunterschiede aufgrund der geringen Untersuchungstiefe (mit Ausnahme der letzten Untersuchung) nicht erfasst. Ein anderer Erklärungsansatz ist, dass Bioporen im ersten Jahr nach der Vorfruchtphase noch durch Wurzeln blockiert waren.

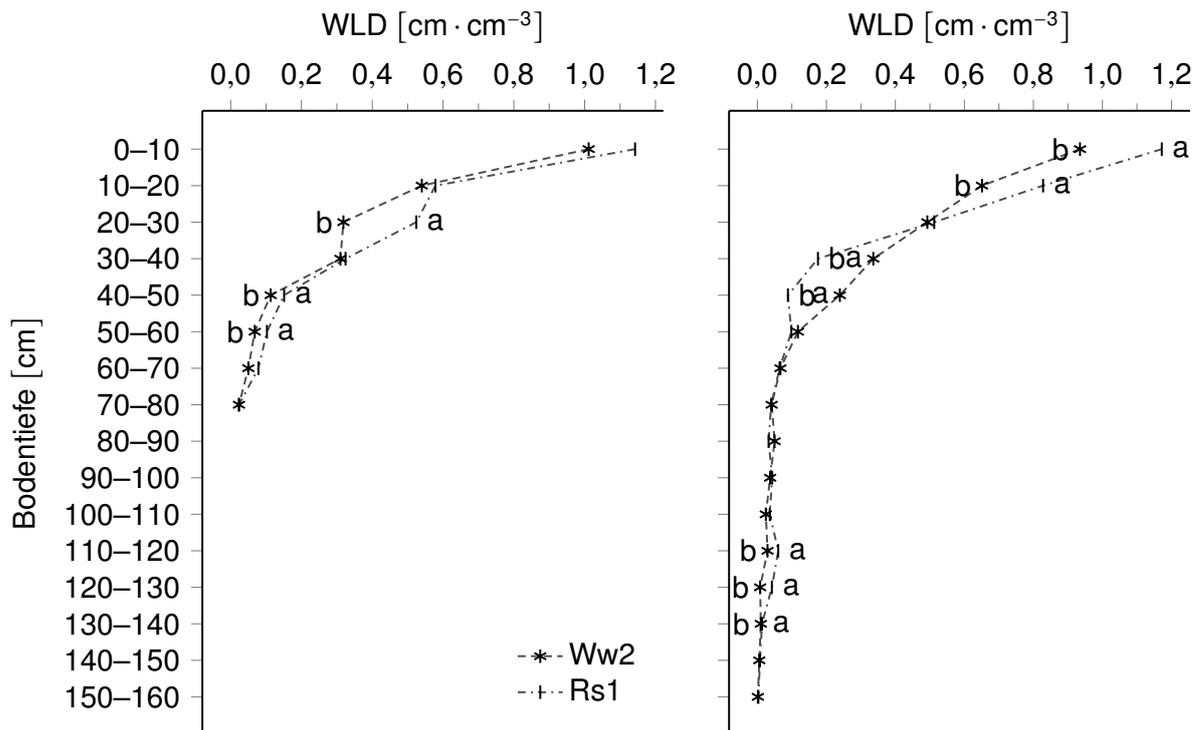
Der Einfluss der Vorfrucht-Varianten auf die WLD der Nachfrüchte in Abhängigkeit von der Bodentiefe wurde jeweils anhand der letzten beiden Untersuchungstermine betrachtet (Abb. 16, Abb. 19, Abb. 21 und Abb. 24). Die Entwicklung der WLD über den gesamten Untersuchungszeitraum ist im Anhang für alle Kulturen aufgeführt (Anhang-Abb. 1 und Anhang-Abb. 2, S. 129 f). Im Allgemeinen nahm die WLD der Nachfrüchte im Zeitverlauf über die gesamte Bodentiefe hinweg zu.

In Abhängigkeit von den Vorfrucht-Varianten Ww2 und Rs1 unterschied sich die WLD des Sommerweizens zur frühen Teigreife und zur Vollreife nur geringfügig (Abb. 16). Zur frühen Teigreife war sie nach der Vorfrucht Rs1 bis in 80 cm Bodentiefe etwas höher als nach Ww2 (Abb. 16, links). Zur Vollreife war die WLD von Sommerweizen in den Bodentiefen 30–60 cm nach Ww2 signifikant höher als nach Rs1 und in 110–140 cm Bodentiefe nach Rs1 signifikant höher als nach Ww2 (Abb. 16, rechts).

Der Einfluss der einjährigen Vorfrüchte auf die WLD von Sommerweizen ist im Anhang dargestellt (Anhang-Abb. 3, S. 131). Bis in 80 cm Bodentiefe war die WLD nach Lu1 gegenüber Ww1 und Rs1 erhöht. In tieferen Bodenschichten wurden keine Unterschiede festgestellt.

Die WLD von Sommerweizen wurde 2010 von 45 bis 105 cm Bodentiefe ergänzend mit der Monolithmethode untersucht (Abb. 17). Zwischen 45 und 85 cm Bodentiefe war die WLD nach Rs1 zumeist signifikant höher als nach Lu2 und Ww2. Nach den allorhizen Futterpflanzenarten Lu und Ww wurde in allen untersuchten Bodentiefen eine vergleichsmäßig geringe Variation der WLD ermittelt (Lu2: 0,7–1,0 cm·cm<sup>-3</sup> Ww2: 0,4–0,7 cm·cm<sup>-3</sup>). Dagegen sank die WLD nach Rs1 mit der Bodentiefe von 1,7 cm·cm<sup>-3</sup> auf 0,8 cm·cm<sup>-3</sup>, so dass unterhalb von 75 cm Bodentiefe keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt wurden.

Sommerweizen (*Triticum aestivum* L.) stellt höhere Ansprüche an den Boden als andere Getreidearten wie Wintergerste, Winterroggen und Hafer und ist außerdem auf eine ausreichende Wasserversorgung angewiesen (GEISLER 1980). Aufgrund der Saat im Frühjahr ist die Wurzelentwicklung im Vergleich zu den bereits im Herbst gesäten Getreiden geringer, so dass die Wasservorräte im Boden nicht gut ausgenutzt werden können. Passend dazu wurde im

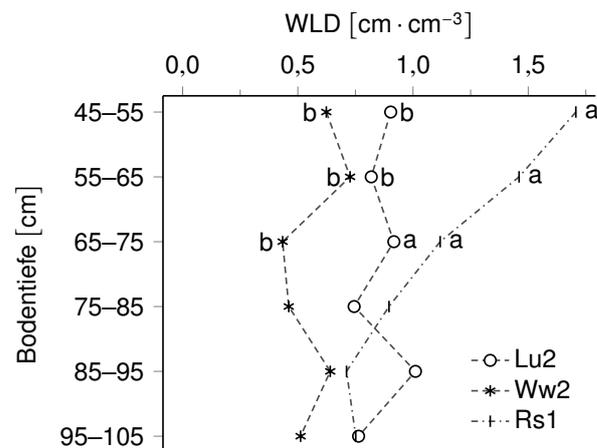


**Abb. 16: Wurzellängendichte (WLD) von Sommerweizen** (links: BBCH 83, rechts: BBCH 89) in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der Vorfrucht-Variante (Ww2: zweijähriger Wegwarteanaubau, Rs1: einjähriger Rohrschwingelanbau). Versuch A, 13.07.–16.07.2010 und 27.07.–30.07.2010, Profilwandmethode. Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede innerhalb einer Bodentiefenklasse. Mann-Whitney-U-Test ( $\alpha=0,05$ ).

Versuch beobachtet, dass die Durchwurzelungstiefe von Sommerweizen nur zwischen 71 und 94 cm lag, während die Wintergerste (vgl. Tab. 10, S. 53) deutlich tiefere Bodenschichten erreichte.

WEAVER (1926) führte zu Sommerweizen umfassende Untersuchungen an unterschiedlichen Standorten in den USA durch. An trockenen Standorten ohne Wasserreserve im Unterboden war das seitliche Wurzelwachstum auf Kosten des Tiefenwachstums besonders ausgeprägt, um geringe Niederschlagsmengen ausnutzen zu können. Bei Trockenheit und einem Unterboden mit nachgewiesener Wasserversorgung fand er tiefe Wurzeln bis 175 cm Bodentiefe (Philipsburg, Nord-Kansas). Auch im eigenen Feldversuch wurden bis in 160 cm Bodentiefe noch Wurzeln gefunden (Tab. 8, S. 45). Es muss jedoch einschränkend hinzugefügt werden, dass die von WEAVER (1926) untersuchten Genotypen deutlich von modernen Sorten abweichen können.

Im Versuchsjahr 2010 gab es zwischen Januar und Juli oft weniger Niederschlag als im Mittel der Jahre, so dass die klimatische Wasserbilanz während der gesamten Vegetationszeit negativ ausfiel (GAISER et al. 2012). Sommerweizen wuchs also von Beginn an unter relativ trockenen Bedingungen und hatte zusätzlich im Vergleich zu Winterungen weniger Zeit zur Erschließung großer Bodentiefen. Trotz der geringen Durchwurzelungstiefe war der Sommerweizen in der Lage, in der Bodenschicht von 75 bis 105 cm verfügbares Wasser zu entziehen (GAISER et al. 2012). Die höhere WLD des Sommerweizens im Ap-Horizont im Vergleich zur Futtermalve



**Abb. 17: Wurzellängendichte (WLD) von Sommerweizen** in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der Vorfrucht-Variante (Lu2: zweijähriger Luzerneanbau, Ww2: zweijähriger Wegwarte-anbau, Rs1: einjähriger Rohrschwingelanbau). Versuch A, 03.08.–05.08.2010, Monolithmethode. Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede innerhalb einer Bodentiefenstufe. Kruskal-Wallis-Test ( $\alpha=0,05$ ) mit Anschlussstest nach CAMPBELL & SKILLINGS (1985).

(beide 2010) ist ein Indiz für dessen intensive Seitenwurzelbildung (Abb. 15 und Abb. 18).

Das Maximum der WL im Oberboden wurde gegen Ende der Blüte festgestellt. Anschließend nahm die WL entsprechend dem allgemein beobachteten Verlauf im Rahmen der Kornentwicklung und Abreife ab (GREGORY et al. 1978, BARRACLOUGH & LEIGH 1984, PIETOLA & ALAKUKKU 2005). Wird die Gesamt-WL über alle Bodentiefen aggregiert und in Abhängigkeit vom gesamten Variantenspektrum betrachtet, so fällt auf, dass nur nach der Vorfrucht Ww ein Maximum zum Ende der Blüte erreicht wurde. Hingegen stieg sie nach Lu bis zum Ende (nicht signifikant, Tab. 8), möglicherweise aufgrund eines Stickstoffeffekts durch den Luzerneanbau (FOX & PIEKIELEK 1988).

Im Allgemeinen sind Leguminosen durch vergleichsweise hohe Stickstoffgehalte gekennzeichnet. Beim Umbruch verbleibt das Wurzelsystem im Boden und der Spross wird in den Boden eingearbeitet. In Untersuchungen von FOX et al. (1990) hatte der Luzernespross im Vergleich mit anderen Leguminosen den höchsten Stickstoffgehalt ( $46,8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) und zeichnete sich durch eine schnelle Mineralisierung aus. Im eigenen Versuch lag der Stickstoffgehalt der Luzerne im Mittel der Zeiternten bei  $34,3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  (KÜPPER 2014). Im Gegensatz zum Spross wurde für das Wurzelsystem der Luzerne, das hauptsächlich aus groben Wurzeln bestand, ein hohes C:N-Verhältnis von 26 ermittelt (BOLGER et al. 2003). Durch den Pflugeinsatz im Ap-Horizont werden Spross und Wurzel vermischt, so dass die Mineralisierung der Wurzel durch die Stickstoff-Freisetzung aus dem Spross gefördert werden kann. Es ist anzunehmen, dass das weite C:N-Verhältnis der Wurzeln in tieferen Bodenschichten zu einer Immobilisierung von Stickstoff und einer Verzögerung der Mineralisation führte. Dies wird dadurch verstärkt, dass die Abbaurate von organischer Substanz mit der Bodentiefe abnimmt (GILL & BURKE 2002).

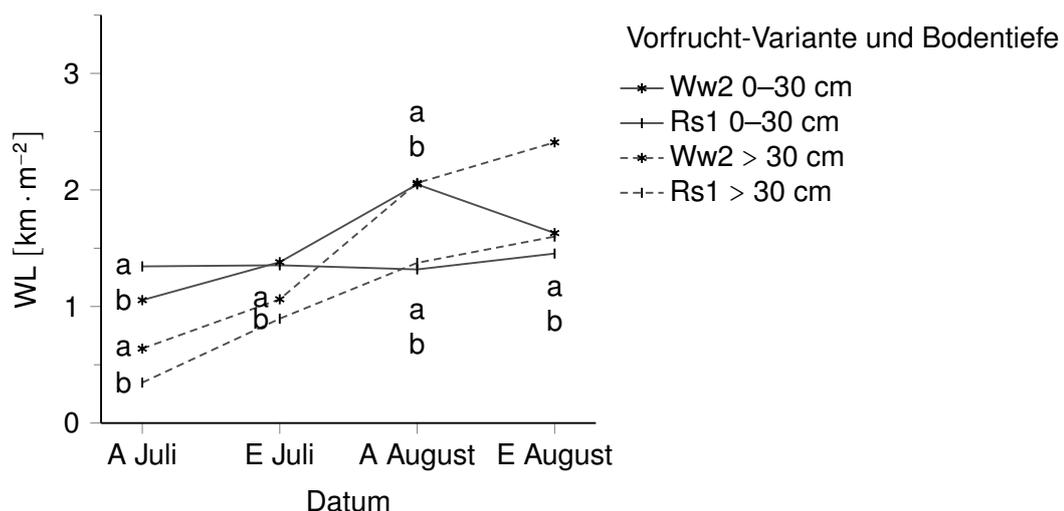
## Futtermalve

Die Futtermalve (*Malva sylvestris* L.) ist eine einjährige, relativ anspruchslose Kulturpflanze (MAAS 1993). In den 30er Jahren des letzten Jahrhunderts wurde sie als Futterpflanze intensiv erforscht und wegen ihrer hohen Masse- und Eiweißbildung als Grünfutter oder Silage genutzt. Aufgrund der geringen Saatgutkosten eignete sie sich gut als Untersaat und Stoppelfrucht (SESSOUS & SCHELL 1938). Bei der Futtermalve werden anstelle der BBCH-Stadien die Zeiträume der Erhebung angegeben, da durch die Schnittnutzung der Futtermalve eine Verjüngung erfolgt, so dass die BBCH-Stadien nicht eindeutig einzelnen Untersuchungsterminen zugeordnet werden können (s. Anhang-Tab. 3, S. 124).

Die Wurzellänge (WL) von Futtermalve nach Rs1 änderte sich im Oberboden nur geringfügig mit der Entwicklungsdauer und betrug zwischen  $1,3 \text{ km} \cdot \text{m}^{-2}$  und  $1,5 \text{ km} \cdot \text{m}^{-2}$  (Abb. 18). Nach Ww2 wurde dagegen eine Zunahme von  $1,1 \text{ km} \cdot \text{m}^{-2}$  auf  $2,1 \text{ km} \cdot \text{m}^{-2}$  festgestellt. Unterhalb von 30 cm Bodentiefe war die WL über den gesamten Vegetationsverlauf nach Ww2 signifikant höher als nach Rs1. Im Unterboden vervierfachte sich die WL im Verlauf der Vegetation nach Ww2 von 0,6 auf  $2,4 \text{ km} \cdot \text{m}^{-2}$  und nach Rs1 von 0,4 auf  $1,6 \text{ km} \cdot \text{m}^{-2}$ . Ab Anfang August war die WL in Ober- und Unterboden annähernd gleich hoch.

Die von der Futtermalve gebildete WL war mit Werten zwischen 1,0 und  $4,1 \text{ km} \cdot \text{m}^{-2}$  (Tab. 9) im gleichen Größenbereich wie der Sommerweizen und nahm im Verlauf der Entwicklung wie erwartet zu.

Der Anteil der Futtermalvenwurzeln im Oberboden nahm mit zunehmender Entwicklungsdauer signifikant ab (Tab. 9). Zum ersten und letzten Untersuchungstermin war der Anteil der WL im Ap-Horizont nach den Vorfrucht-Varianten Lu1 und Rs1 im Vergleich zu Ww1 signifi-



**Abb. 18: Wurzellänge (WL) von Futtermalve** in Abhängigkeit von Untersuchungstermin, Bodentiefenklasse und Vorfrucht-Variante (Ww2: zweijähriger Wegwarteanbau, Rs1: einjähriger Rohrschwingelanbau). Versuch A, 05.07.–20.08.2010, Profilwandmethode. A=Monatsanfang, E=Monatsende. Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede innerhalb einer Bodentiefenklasse. Mann-Whitney-U-Test ( $\alpha=0,05$ ).

### 3. Ergebnisse und Diskussion

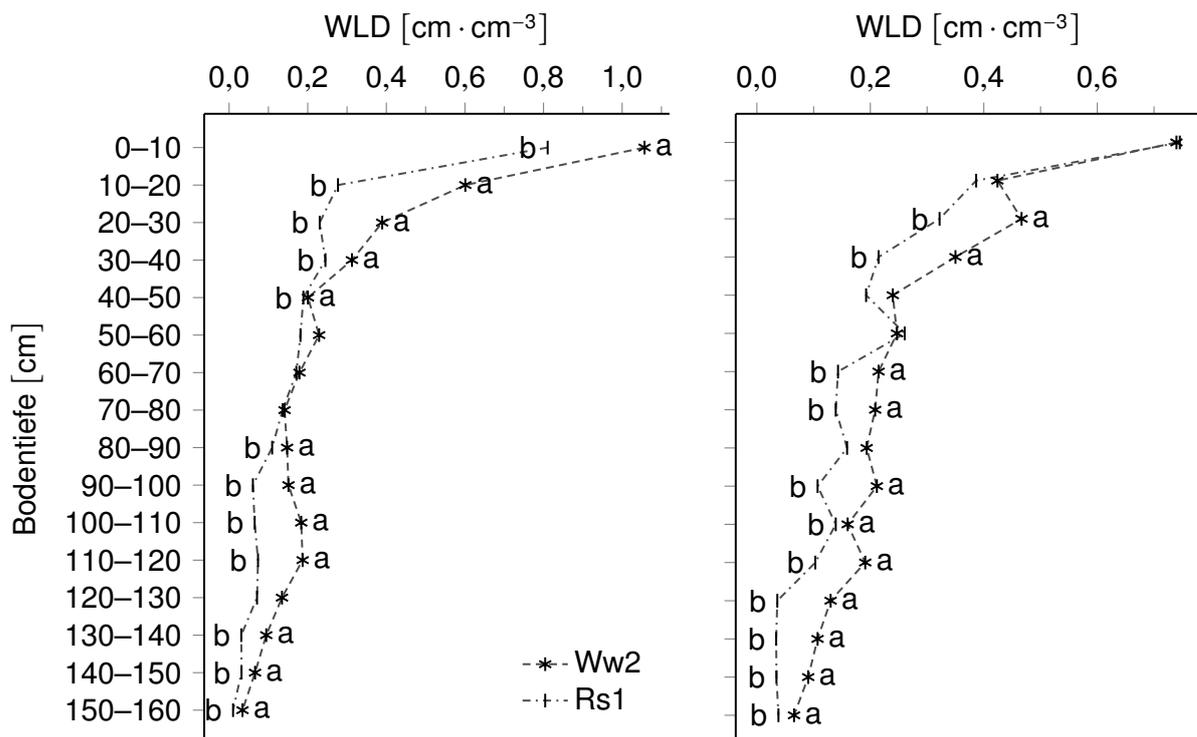
**Tab. 9: Gesamt-Wurzellänge** [ $\text{km}\cdot\text{m}^{-2}$ ], **Anteil der Wurzellänge im Ap-Horizont** [%] und **Durchwurzelungstiefe** [cm Bodentiefe] **von Futtermalve** in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium und der Vorfrucht-Variante (Kulturarten Luzerne (Lu), Wegwarte (Ww) und Rohrschwengel (Rs) mit ein- oder zweijähriger Anbaudauer). Versuch A, 06.07.–20.08.2010, Profilwandmethode. A=Monatsanfang, E=Monatsende. Kleinbuchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen Untersuchungsterminen, Großbuchstaben zwischen Vorfruchtkulturen einer Anbaudauer. Kruskal-Wallis-Test ( $\alpha=0,05$ ) mit Anschlussstest nach CAMPBELL & SKILLINGS (1985).

	A Juli		E Juli		A August		E August	
Gesamt-Wurzellänge [ $\text{km}\cdot\text{m}^{-2}$ ]								
Lu1	1,3	c B	2,3	b	3,3	a AB	3,6	a
Ww1	2,0	c A	2,5	b	3,6	a A	3,3	a
Rs1	1,7	d AB	2,2	c	2,7	b B	3,1	a
Lu2	1,0	c B	2,9	b A	3,1	b B	3,9	a
Ww2	1,7	c A	2,4	b B	4,1	a A	4,0	a
Anteil der Wurzellänge im Ap-Horizont [%]								
Lu1	79,1	a A	62,5	b	55,5	c	51,5	c A
Ww1	67,6	a B	59,0	b	52,1	c	40,3	d B
Rs1	83,1	a A	62,2	b	50,4	c	49,4	c A
Lu2	76,2	a A	61,4	b	48,9	c	40,8	d
Ww2	65,7	a B	57,2	b	50,4	c	40,8	d
Durchwurzelungstiefe [cm Bodentiefe]								
Lu1	47	d B	61	c B	115	b B	135	a A
Ww1	63	d A	68	c A	130	b A	136	a A
Rs1	42	c C	66	b AB	117	a B	113	a B
Lu2	49	d B	68	c	123	b	130	a
Ww2	58	d A	72	c	126	b	132	a

kant höher. Der Vergleich der zweijährigen Vorfrüchte zeigte zum ersten Untersuchungstermin nach Lu2 eine signifikant höhere relative WL der Futtermalve im Ap-Horizont verglichen mit Ww2, während zu den späteren Untersuchungsterminen keine signifikanten Unterschiede bestanden.

Die Durchwurzelungstiefe der Futtermalve (Tab. 9) war mit Bodentiefen bis 136 cm deutlich höher als die des Sommerweizens. Die Futtermalve erschloss im Zeitverlauf zunehmend tiefere Bodenschichten, so dass sich insbesondere nach Lu und Ww die Durchwurzelungstiefe mit jedem Untersuchungstermin signifikant erhöhte. Nach Rs1 wurde die maximale Durchwurzelungstiefe bereits zum 3. Untersuchungstermin erreicht. Ende August betrug die Durchwurzelungstiefe nach Lu1 und Ww1 etwa 135 cm. Demgegenüber war sie nach Rs1 mit 113 cm signifikant niedriger. In der Tendenz wies die Durchwurzelungstiefe der Futtermalve nach den allorhizen Vorfrüchten höhere Werte auf als nach Rohrschwengel.

Im Gegensatz zum Sommerweizen war die WLD der Futtermalve zum Untersuchungstermin



**Abb. 19: Wurzellängendichte (WLD) von Futtermalve** (links: Anfang August, rechts: Ende August) in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der Vorfrucht-Variante (Ww2: zweijähriger Wegwarteanaubau, Rs1: einjähriger Rohrschwingelanbau). Versuch A, 03.08.–05.08.2010 und 18.08.–20.08.2010, Profilwandmethode. Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede innerhalb einer Bodentiefenklasse. Mann-Whitney-U-Test ( $\alpha=0,05$ ).

Anfang August durchgehend nach der Vorfrucht-Variante Ww2 höher (Abb. 19, links). Mit Ausnahme der Bodentiefen 50–80 cm und 120–130 cm war die WLD nach Ww2 bis in 160 cm Bodentiefe signifikant höher als nach Rs1. Analog zum vorherigen Untersuchungstermin wurde die Ende August erfasste WLD der Futtermalve von der Vorfrucht-Variante Ww2 im Vergleich zu Rs1 gesteigert (Abb. 19, rechts). Bis auf wenige Ausnahmen war dieser Unterschied unterhalb von 20 cm Bodentiefe signifikant. Der Einfluss der einjährigen Vorfrüchte auf die WLD von Futtermalve ist im Anhang dargestellt (Anhang-Abb. 4, S. 132). In den tiefen Bodenschichten war die WLD Anfang August nach Ww1 und Ende August sowohl nach Ww1 als auch nach Lu1 höher als nach Rs1. Im Oberboden war die WLD nach Lu1 zu beiden Untersuchungsterminen erhöht.

*M. sylvestris* besitzt ein allorhizes Wurzelsystem, so dass sie durch die Ausbildung kräftiger tieferreichender Wurzeln ihren hohen Wasserbedarf auch in Trockenzeiten zu decken vermag. Dies zeigte sich im Versuch durch eine im Vergleich zu Sommerweizen deutlich höhere Durchwurzelungstiefe (136 cm). In einigen Untersuchungen wurde festgestellt, dass das Eindringen von Wurzeln in einen dichten Boden von höheren Wurzeldurchmessern begünstigt wurde (MATERECHERA et al. 1992, CLARK et al. 2003). Auch die Verteilung der WL in den einzelnen Bodenkompartmenten unterschied sich bei Futtermalve stark vom Sommerweizen.

### 3. Ergebnisse und Diskussion

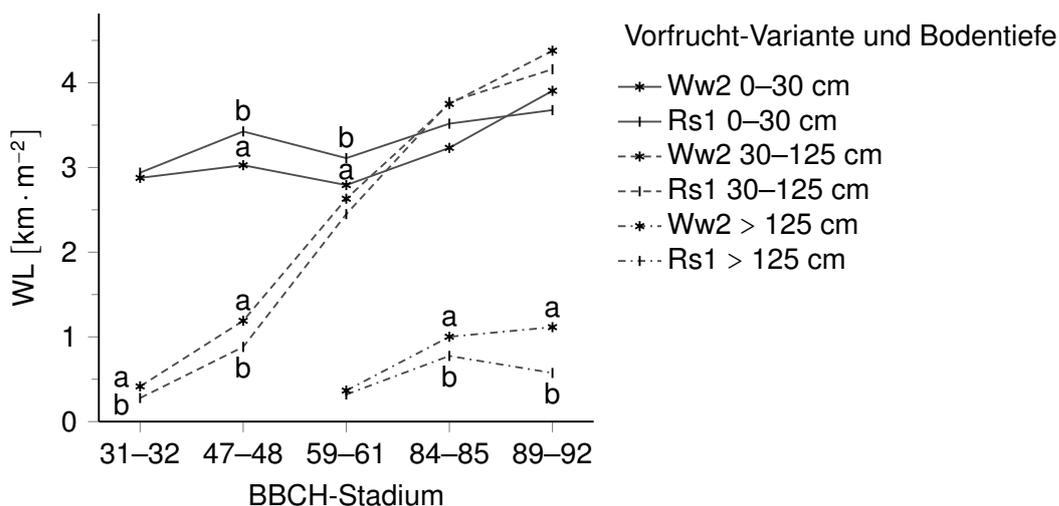
In 30–125 cm Bodentiefe wurde ab dem dritten Untersuchungstermin eine ebenso hohe Wurzellänge wie im Oberboden gefunden, während bei Sommerweizen die WL im Oberboden immer höher war als im Bt-Horizont. Unter denselben Umweltbedingungen erschloss die Futtermalve die tieferen Bodenschichten im Gegensatz zu Sommerweizen viel intensiver.

#### Wintergerste

Wintergerste (*Hordeum vulgare* L.) findet hauptsächlich als Futtergetreide Verwendung und hat eine kurze Vegetationszeit, weshalb sie auch relativ weit nördlich und im Gebirge anzutreffen ist (KUTSCHERA et al. 2009).

Die Wurzellänge von Wintergerste zeigte im Oberboden kein Maximum zur Blüte (BBCH 59–61), sondern nahm von etwa  $3 \text{ km} \cdot \text{m}^{-2}$  (BBCH 31–32) auf  $3,7$  bis  $3,9 \text{ km} \cdot \text{m}^{-2}$  (BBCH 89–92, Reife) zu (Abb. 20). Zum zweiten und dritten Untersuchungstermin bis zum Beginn der Blüte war die WL im Oberboden nach Rs1 signifikant höher als nach Ww2. In der Bodentiefenklasse 30–125 cm nahm die Wurzellänge von Wintergerste, anders als bei Futtermalve und Winterraps, über den gesamten Untersuchungszeitraum von  $0,3$  auf  $4,4 \text{ km} \cdot \text{m}^{-2}$  zu. In Folge dessen war die WL zum Ende des Untersuchungszeitraums im Unterboden höher als im Oberboden. Unterhalb von 125 cm Bodentiefe war die WL von Wintergerste insgesamt gering und blieb insbesondere nach Rs1 Vorfrucht über die gesamte Entwicklungszeit auf niedrigem Niveau. Nach Ww2-Vorfrucht wurde ab BBCH 84–85 eine signifikant höhere WL ermittelt als nach Rs1, so dass zur Reife Werte bis ca.  $1,1 \text{ km} \cdot \text{m}^{-2}$  in dieser Bodentiefe erreicht wurden.

Die Gesamt-Wurzellänge betrug bei Wintergerste zwischen  $3,2$  und  $9,5 \text{ km} \cdot \text{m}^{-2}$  (Tab. 10). Nach beiden Vorfrucht-Varianten (Ww2, Rs1) nahm sie mit jedem Untersuchungszeitpunkt



**Abb. 20: Wurzellänge (WL) von Wintergerste** in Abhängigkeit von BBCH-Stadium, Bodentiefenklasse und Vorfrucht-Variante (Ww2: zweijähriger Wegwarteanaubau, Rs1: einjähriger Rohrschwingelanbau). Versuch A, 04.04.–08.07.2011, Profilwandmethode. Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede innerhalb einer Bodentiefenklasse. Mann-Whitney-U-Test ( $\alpha=0,05$ ).

**Tab. 10: Gesamt-Wurzellänge** [ $\text{km}\cdot\text{m}^{-2}$ ], **Anteil der Wurzellänge im Ap-Horizont** [%] und **Durchwurzelungstiefe** [cm Bodentiefe] **von Wintergerste** in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium und der Vorfrucht-Variante (Ww2: zweijähriger Wegwarteanaubau, Rs1: einjähriger Rohrschwingelanbau). Versuch A, 04.04.–08.07.2011, Profilwandmethode. Kleinbuchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen Untersuchungsterminen, Großbuchstaben zwischen den Vorfrucht-Varianten Ww2 und Rs1. Kruskal-Wallis-Test ( $\alpha=0,05$ ) mit Anschlussstest nach CAMPBELL & SKILLINGS (1985).

BBCH	31–32	47–48	59–61	84–85	89–92	
Gesamt-Wurzellänge [ $\text{km}\cdot\text{m}^{-2}$ ]						
Ww2	3,3 e	4,4 d	5,8 c	8,0 b	9,5 a	A
Rs1	3,2 d	4,5 c	5,9 b	8,1 a	8,4 a	B
Anteil der Wurzellänge im Ap-Horizont [%]						
Ww2	88,0 a B	71,4 b B	48,0 c B	40,7 d B	46,8 c	
Rs1	91,4 a A	79,5 b A	53,5 c A	43,8 d A	44,1 d	
Durchwurzelungstiefe [cm Bodentiefe]						
Ww2	36 e	76 d	132 c	148 b	151 a	A
Rs1	35 e	74 d	128 c	142 a	135 b	B

zu. Nur zum letzten Untersuchungstermin war die Wurzellänge der Wintergerste nach Ww2 signifikant höher als nach Rs1. Durch die zunehmende Erschließung tieferer Bodenschichten nahm der Anteil der WL der Wintergerste im Oberboden an der Gesamt-WL im Gegensatz zur WL bis zur Teigreife (BBCH 84–85) mit jedem Untersuchungstermin signifikant ab und war nach Rs1 signifikant höher als nach Ww2 (Ausnahme BBCH 89–92). Die Durchwurzelungstiefe stieg mit zunehmender Entwicklungsdauer für beide Vorfrucht-Varianten (mit Ausnahme des letzten Untersuchungstermins nach Rs1) signifikant. Lediglich zu diesem Zeitpunkt (Totreife der Wintergerste) war die Durchwurzelungstiefe nach Ww2 (151 cm) signifikant höher als nach Rs1 (135 cm).

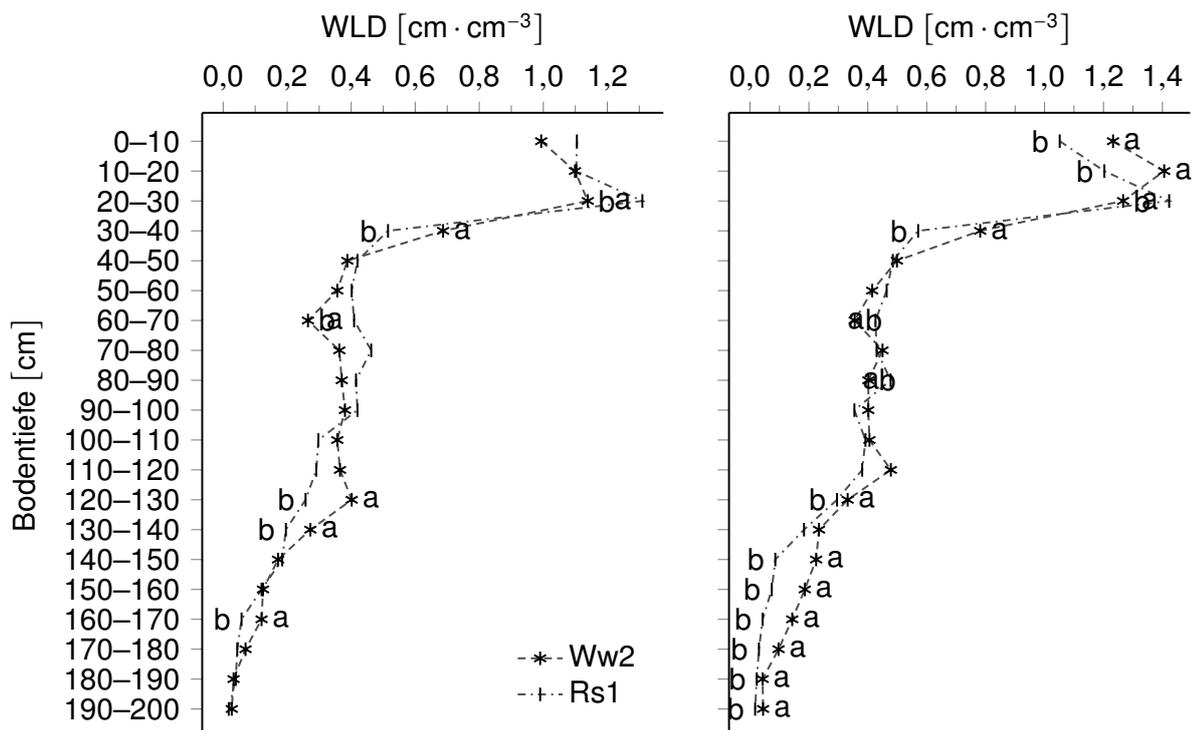
Bis in 110 cm Bodentiefe unterschied sich die WLD von Wintergerste zu BBCH 84–85 (Abb. 21, links) und BBCH 89–92 (Abb. 21, rechts) nur geringfügig aufgrund der Vorfrucht-Varianten Ww2 und Rs1. Unterhalb von 110 cm Bodentiefe war zu BBCH 84–85 wiederholt die WLD nach Ww2 höher als nach Rs1. Zu BBCH 89–92 war dieser Unterschied von 110 cm bis 200 cm Bodentiefe bis auf zwei Ausnahmen signifikant.

Die WLD der Wintergerste nach Ww2 und Rs1 wurde bis in 155 cm Bodentiefe auch mit der Monolithmethode erhoben (Abb. 22, links). Bis 125 cm Bodentiefe war kein eindeutiger Einfluss der zwei Vorfrucht-Varianten auf die WLD zu erkennen. Demgegenüber war die WLD nach Ww2 ab 125 cm Bodentiefe deutlich höher als nach Rs1. Dieser Befund bestätigt die Ergebnisse der Profilwandmethode.

Nach WEAVER (1926) bildet Wintergerste meist gut verzweigte Wurzeln bis in 91–107 cm Bodentiefe und erreicht maximale Tiefen von 137–198 cm. Im eigenen Versuch wurde zum Ende der Vegetationsperiode eine maximale Durchwurzelungstiefe von 136 cm festgestellt.

Wintergerste zeigte eine starke Abnahme der WLD unterhalb des Pflughorizonts. Ähnliche

### 3. Ergebnisse und Diskussion



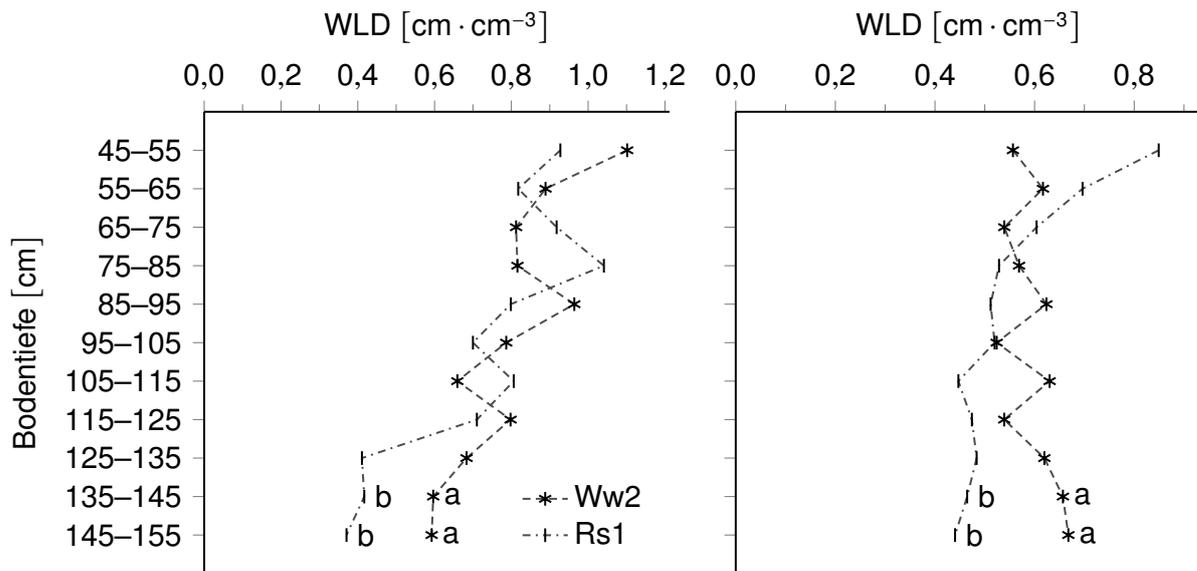
**Abb. 21: Wurzellängendichte (WLD) von Wintergerste** (links: BBCH 84–85, rechts: BBCH 89–92) in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der Vorfrucht-Variante (Ww2: zweijähriger Wegwarteanaubau, Rs1: einjähriger Rohrschwingelanbau). Versuch A, 10.06.–16.06.2011 und 01.07.–08.07.2011, Profilwandmethode. Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede innerhalb einer Bodentiefenklasse. Mann-Whitney-U-Test ( $\alpha=0,05$ ).

Ergebnisse wurden beim Vorliegen einer Pflugsohle von EHLERS et al. (1983) beobachtet. Eine ausgeprägte Verdichtung der Pflugsohle wurde im Versuch jedoch nicht festgestellt. Durch den Übergang vom gepflügten Ap-Horizont in den Bt-Horizont ist das Bodengefüge jedoch natürlicherweise durch eine höhere Lagerungsdichte charakterisiert. Zudem ist bekannt, dass Wintergerste gegenüber Verdichtungen empfindlich reagiert (GOSS 1977).

Durchgängig wurden nach Rs1 höhere Anteile der WL im Ap-Horizont festgestellt. Demgegenüber wurde die Durchwurzelungstiefe zum letzten Untersuchungstermin durch die Vorfrucht-Variante Ww2 signifikant erhöht. Diese Beobachtungen decken sich mit den Untersuchungen der Futterpflanzen, wonach Rs1 den Ap-Horizont besonders stark durchwurzelte, dafür aber den tiefen Boden nicht erschloss. Hingegen beeinflusste Ww2 das Bodengefüge bis in 180 cm Bodentiefe.

#### Winterraps

Kennzeichnend für Winterraps ist eine gleichmäßige und tiefreichende Bewurzelung (KUTSCHERA et al. 2009). Winterraps bildet eine kräftige Pfahlwurzel aus, die im Herbst Nährstoffe speichert, welche im Frühjahr zur Blättererneuerung genutzt werden. Da die Pfahlwurzel schon früh in die Tiefe wächst, wird eine gute Ausnutzung der Winterfeuchte erreicht (DIEPENB-



**Abb. 22: Wurzellängendichte (WLD) von Wintergerste (links) und Winterraps 2011 (rechts) in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der Vorfrucht-Variante (Ww2: zweijähriger Wegwarteanaubau, Rs1: einjähriger Rohrschwingelanbau). Versuch A, 14.06.–21.06.2011 und 28.06.–01.07.2011, Monolithmethode. Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede innerhalb einer Bodentiefenstufe. Mann-Whitney-U-Test ( $\alpha=0,05$ ).**

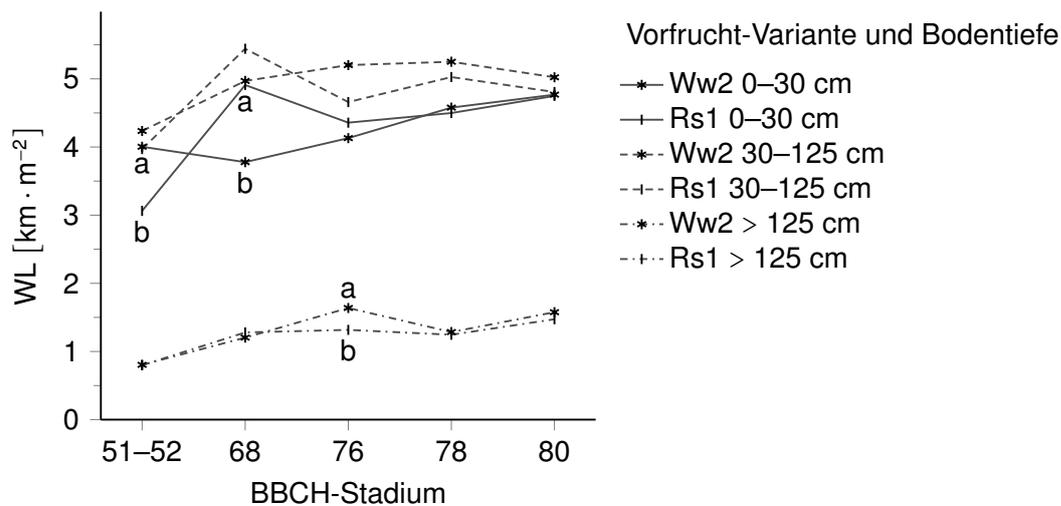
ROCK 2006). Im Oberboden nahm die Wurzellänge (WL) von Winterraps von  $3,1 \text{ km} \cdot \text{m}^{-2}$  zum ersten Untersuchungstermin bis zur finalen Erhebung auf  $4,8 \text{ km} \cdot \text{m}^{-2}$  zu (Abb. 23). Die WL im Unterboden (30–125 cm) war mit Werten zwischen  $4,0$  und  $5,4 \text{ km} \cdot \text{m}^{-2}$  etwas höher als im Oberboden. Unterhalb von 125 cm betrug die WL von Winterraps zwischen  $0,8$  und  $1,6 \text{ km} \cdot \text{m}^{-2}$ .

Das Wurzelsystem von Raps hat einen sehr hohen Feinwurzelanteil, dessen zahlreiche feine Wurzeln leicht zersetzbar und daher ein Grund für die gute Vorfruchtwirkung von Raps sind (DIEPENBROCK 2006). Dies zeigte sich auch darin, dass Winterraps im Versuch mit Abstand die höchste WL ausbildete. Die maximale Wurzellänge ist in der Regel zur Blüte festzustellen und kann bis 180 cm Bodentiefe reichen, sofern keine Verdichtungen vorliegen, denen gegenüber der Raps empfindlich reagiert (DIEPENBROCK 2006).

Der Zuwachs der Wurzellänge des Winterraps war nach Ww2 bis zu BBCH 76 signifikant und danach nur noch geringfügig (Tab. 11). Die maximale Wurzellänge des Winterraps nach Rs1 wurde bereits zum Ende der Blüte (BBCH 68) erreicht. Die Abnahme des Anteils der Wurzellänge im Ap-Horizont war beim Winterraps im Gegensatz zu den anderen Nachfrüchten nicht konsistent. Nach Rs1 wurden bis BBCH 78 signifikant höhere Anteile der Wurzellänge im Oberboden als nach Ww2 festgestellt. Die Durchwurzelungstiefe war schon zu Beginn der Untersuchung bei 140 cm und stieg im Folgenden noch bis auf etwa 160 cm an. Zu den Untersuchungsterminen BBCH 68 und 76 war die Durchwurzelungstiefe von Winterraps nach Ww2 signifikant höher als nach Rs1.

Besonders beim Winterraps im Versuchsjahr 2012 fällt auf, dass die WLD im Verlauf der

### 3. Ergebnisse und Diskussion

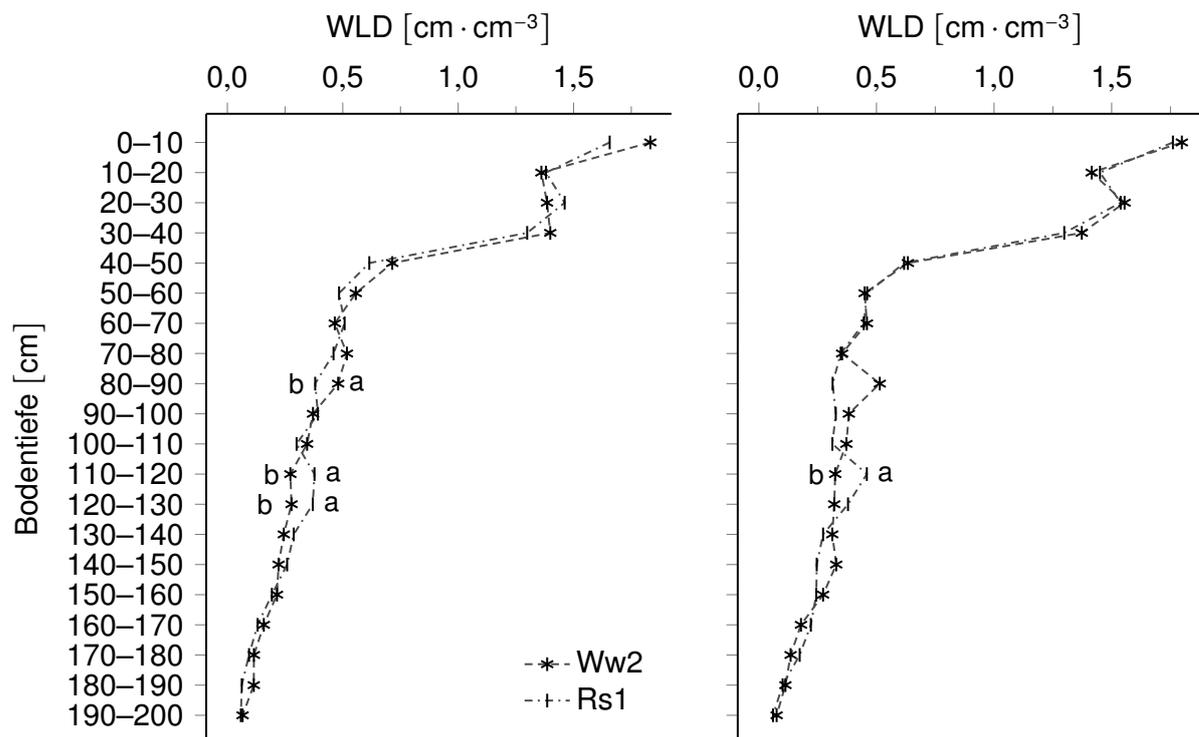


**Abb. 23: Wurzellänge (WL) von Winterraps** in Abhängigkeit von BBCH-Stadium, Bodentiefenklasse und Vorfrucht-Variante (Ww2: zweijähriger Wegwarteanaubau, Rs1: einjähriger Rohrschwingelanbau). Versuch A, 26.03.–19.06.2012, Profilwandmethode. Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede innerhalb einer Bodentiefenklasse. Mann-Whitney-U-Test ( $\alpha=0,05$ ).

**Tab. 11: Gesamt-Wurzellänge [ $\text{km}\cdot\text{m}^{-2}$ ], Anteil der Wurzellänge im Ap-Horizont [%] und Durchwurzelungstiefe [cm Bodentiefe] von Winterraps** in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium und der Vorfrucht-Variante (Ww2: zweijähriger Wegwarteanaubau, Rs1: einjähriger Rohrschwingelanbau). Versuch A, 26.03.–19.06.2012, Profilwandmethode. Kleinbuchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen Untersuchungsterminen, Großbuchstaben zwischen den Vorfrucht-Varianten Ww2 und Rs1. Kruskal-Wallis-Test ( $\alpha=0,05$ ) mit Anschlussstest nach CAMPBELL & SKILLINGS (1985).

BBCH	51–52	68	76	78	80
Gesamt-Wurzellänge [ $\text{km}\cdot\text{m}^{-2}$ ]					
Ww2	9,0 c A	10,0 b B	11,0 a	11,1 a	11,4 a
Rs1	7,8 b B	11,6 a A	10,3 a	10,8 a	11,0 a
Anteil der Wurzellänge im Ap-Horizont [%]					
Ww2	45,2 a A	38,4 c B	38,5 c B	41,3 bc	42,3 b
Rs1	39,8 B	42,5 A	42,5 A	42,5	43,0
Durchwurzelungstiefe [cm Bodentiefe]					
Ww2	140 b	155 a A	162 a A	156 a	159 a
Rs1	142 c	149 b B	154 b B	150 b	161 a

Vegetationsperiode nur in geringem Umfang zunimmt. Dies kann damit zusammenhängen, dass der Winterraps bereits im Herbst des Vorjahres den Boden ausgiebig erschlossen hatte. So wurde schon im Dezember 2011 anhand von Bohrkernen (Daten nicht dargestellt) eine Durchwurzelung unterhalb von 80 cm Bodentiefe festgestellt. Zu Beginn der Untersuchungen mit der Profilwandmethode im März 2012 betrug die Durchwurzelungstiefe bereits 140 cm. Generell war die Zunahme von WLD, WL und Durchwurzelungstiefe im Zeitverlauf gering



**Abb. 24: Wurzellängendichte (WLD) von Winterraps** (links: BBCH 78, rechts: BBCH 80) in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der Vorfrucht-Variante (Ww2: zweijähriger Wegwarte-Anbau, Rs1: einjähriger Rohrschwingelanbau). Versuch A, 29.05.–01.06.2012 und 11.06.–19.06.2012, Profilwandmethode. Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede innerhalb einer Bodentiefenklasse. Mann-Whitney-U-Test ( $\alpha=0,05$ ).

(Tab. 11). Es ist daher davon auszugehen, dass die Untersuchung idealerweise früher begonnen hätte, um den Entwicklungsverlauf besser erfassen zu können.

Bis in 80 cm Bodentiefe unterschied sich die WLD von Winterraps zu den Untersuchungsterminen zu BBCH 78 und BBCH 80 nicht voneinander und es wurden keine Effekte der Vorfrucht-Varianten festgestellt (Abb. 24). In den folgenden Tiefenklassen war der Einfluss der Vorfrucht-Varianten uneinheitlich. Ebenso wie bei Wintergerste wurde bei Winterraps eine starke Abnahme der WLD unterhalb des Pflughorizonts festgestellt (Abb. 24). Die bereits festgestellte Empfindlichkeit von Raps gegenüber Verdichtungen kann auch hier ein Erklärungsansatz sein.

Im Versuchsjahr 2011 wurde mit der Monolithmethode unterhalb von 105 cm Bodentiefe eine deutlich höhere WLD von Winterraps nach Ww2 als nach Rs1 festgestellt (Abb. 22, rechts). Im darauffolgenden Jahr wurde das Wurzelwachstum mit der Profilwandmethode zu fünf Zeitpunkten untersucht. Die Tendenz zu höherer WL bzw. WLD nach Ww2-Vorfrucht im Vergleich zu Rs1-Vorfrucht bestand zwischen 30 und 125 cm Bodentiefe weiterhin. Die geringere Differenzierung unterhalb von 125 cm Bodentiefe kann darauf hindeuten, dass sich die Unterschiede des Bodengefüges im dritten Jahr nach der Beeinflussung durch die Vorfruchtphase verringert haben.

### 3. Ergebnisse und Diskussion

---

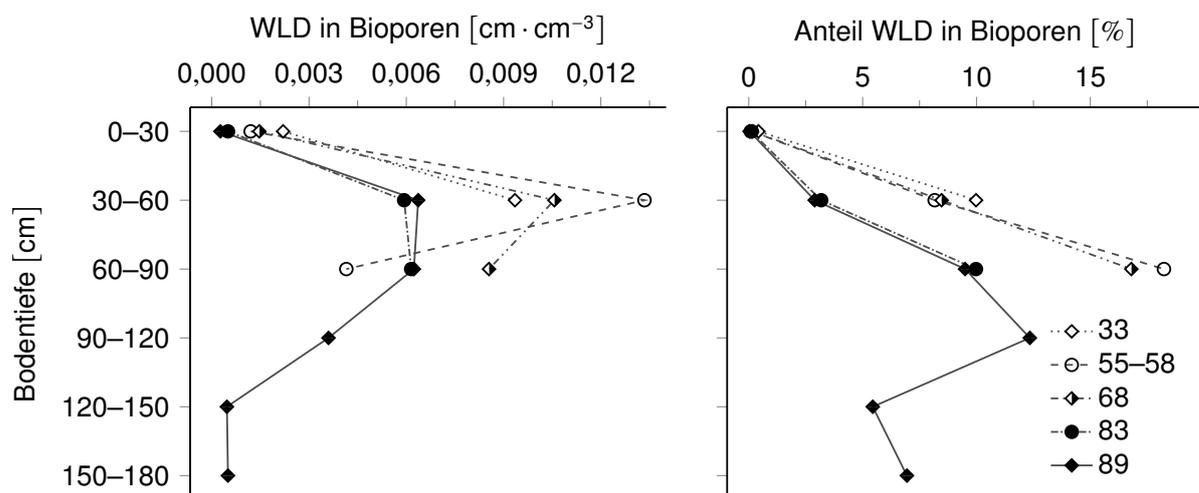
Am Übergang vom Bt-Horizont zum C-Horizont wurde zu den letzten beiden Untersuchungsterminen eine höhere WLD nach Rs1 im Vergleich zu Ww2 beobachtet (Abb. 24). Diese Förderung durch Rs1 zwischen 110 und 130 cm Bodentiefe wurde auch zum letzten Untersuchungstermin von Sommerweizen festgestellt. Aufgrund der geringen Durchwurzelungstiefe der Vorfrucht Rohrschwengel kann das Bodengefüge in dieser Bodentiefe nicht durch dessen Wurzeln verändert worden sein. Die Beobachtungen müssen daher auf eine lokale Besonderheit der untersuchten Parzellen zurückgeführt werden. Inwieweit Bioporen eine Rolle für die stärkere Durchwurzelung des tiefen Bodens spielen, wird im folgenden Abschnitt 3.B.2 näher erläutert.

### 3.B.2. Wurzelwachstum in Bioporen

Mit der Profilwandmethode wurde zu fünf Terminen das Wurzelwachstum der Nachfrüchte untersucht. Dabei wurden in Bioporen wachsende Wurzeln und Wurzeln im *bulk*-Boden getrennt erfasst. Dadurch kann die zeitliche Entwicklung der WLD in Bioporen dargestellt werden. Der Einfluss der Vorfrüchte Ww2 und Rs1 wurde zu einem Termin mit der Färbemonolithmethode quantifiziert. Die Analyse der mit der Profilwandmethode erhobenen Ergebnisse wird durch die Betrachtung von Sommerungen/Winterungen und der Vorfruchtwirkung vertieft.

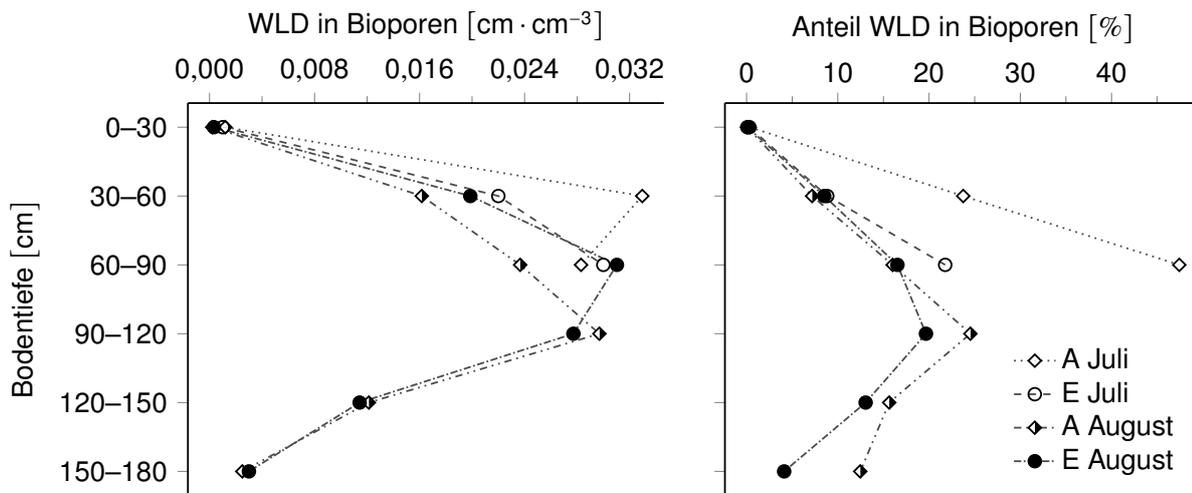
#### Einfluss von Bodentiefe und Entwicklungsdauer

**Profilwandmethode** Im Folgenden werden absolute und relative WLD in Bioporen der Nachfrüchte über die Vorfrucht-Varianten gemittelt dargestellt (Abb. 25–28). Dabei ist die relative WLD durch den Anteil von Wurzeln in Bioporen an der Gesamt-Wurzellängendichte gegeben. Um eine bessere Übersicht zu erhalten, sind die statistischen Auswertungen der Diagramme nur im Anhang aufgeführt (Anhang-Abb. 5–8, S. 135 ff.). Bei Sommerweizen, Futtermalve, Wintergerste und Winterraps war die WLD in Bioporen im Ap-Horizont sehr gering. Sie erreichte zwischen 30 und 120 cm Bodentiefe zu den jeweiligen Untersuchungsterminen ein Maximum und sank anschließend deutlich ab. Entsprechend war der prozentuale Anteil von Wurzeln in Bioporen in denselben Tiefenklassen maximal und nahm ebenfalls unterhalb von 120 cm Bodentiefe ab. Oft war dabei die relative WLD in Bioporen zu einem frühen Entwicklungsstadium deutlich höher als zu späteren Zeitpunkten. Allorhize Nachfrüchte wiesen insgesamt höhere Anteile von Wurzeln in Bioporen auf als homorhize.



**Abb. 25: Wurzellängendichte (WLD) in Bioporen von Sommerweizen** in Abhängigkeit von der Bodentiefe und dem Entwicklungsstadium (BBCH). Wurzellängendichte in Bioporen (links) und prozentualer Anteil von Wurzeln in Bioporen an der Gesamt-Wurzellängendichte (rechts). WLD über Vorfrucht-Varianten (ein- und zweijähriger Anbau von Luzerne und Wegwarte sowie einjähriger Rohrschwingelanbau) gemittelt. Versuch A, 31.05.–30.07.2010, Profilwandmethode.

### 3. Ergebnisse und Diskussion

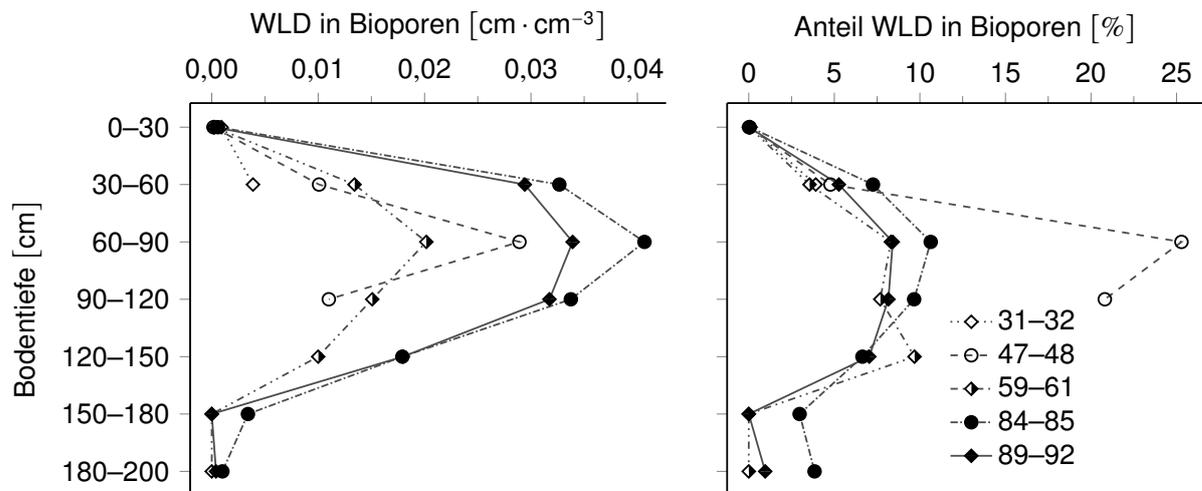


**Abb. 26: Wurzellängendichte (WLD) in Bioporen von Futtermalve** in Abhängigkeit von der Bodentiefe und dem Untersuchungstermin. Wurzellängendichte in Bioporen (links) und prozentualer Anteil von Wurzeln in Bioporen an der Gesamt-Wurzellängendichte (rechts). WLD über Vorfrucht-Varianten (ein- und zweijähriger Anbau von Luzerne und Wegwarte sowie einjähriger Rohrschwingelanbau) gemittelt. Versuch A, 05.07.–20.08.2010, Profilwandmethode. A=Monatsanfang, E=Monatsende.

**Sommerweizen 2010** Die WLD von Sommerweizen wurde von Ende Mai bis Ende Juli 2010 zu fünf Untersuchungsterminen erfasst. Zu den ersten drei Untersuchungsterminen (3-Knoten Stadium bis Ende der Blüte) war die absolute WLD von Sommerweizen in Bioporen in der Tiefenklasse 30–60 cm mit Werten zwischen 0,009 und 0,013 cm·cm<sup>-3</sup> maximal (Abb. 25, links). Zu den späteren Untersuchungsterminen (frühe Teigreife und Vollreife) wurden geringere Werte erreicht. Zur Vollreife (BBCH 89, Untersuchungstiefe 180 cm) zeigte sich nach einem Maximum in 30–90 cm Bodentiefe ein stetiger Rückgang der WLD in Bioporen bis zur Tiefenklasse 120–150 cm.

Die höchste relative WLD von Sommerweizen in Bioporen (Abb. 25, rechts) wurde mit 18 % zur Mitte des Ährenschiebens (BBCH 55–58) in der Tiefenklasse 60–90 cm erhoben, dicht gefolgt von 17 % zum Ende der Blüte (BBCH 68). Mit Ausnahme der beschriebenen Maxima stimmte die Größenordnung von 3 bis 10 % der Wurzeln des Sommerweizens in Bioporen mit den von HAN et al. (2015b) in einem Nachfolgeversuch ermittelten Werten überein. Der Anteil der Wurzeln in Bioporen zur frühen Teigreife (BBCH 83) und Vollreife (BBCH 89) unterschied sich bis zu einer Bodentiefe von 60–90 cm nicht voneinander und war deutlich geringer als zu den ersten drei Untersuchungsterminen.

**Futtermalve 2010** Die absolute und relative WLD in Bioporen von Futtermalve wurde ebenfalls im Versuchsjahr 2010 bestimmt. In 30–60 cm Bodentiefe wurde Anfang Juli mit 0,033 cm·cm<sup>-3</sup> die maximale absolute WLD in Bioporen erhoben (Abb. 26, links). Die folgenden Untersuchungstermine wiesen geringere Werte auf. Zu den beiden ersten Untersuchungsterminen im Juli wurde die maximale WLD in Bioporen in der Tiefenklasse 30–60 cm



**Abb. 27: Wurzellängendichte (WLD) in Bioporen von Wintergerste** in Abhängigkeit von der Bodentiefe und dem Entwicklungsstadium (BBCH). Wurzellängendichte in Bioporen (links) und prozentualer Anteil von Wurzeln in Bioporen an der Gesamt-Wurzellängendichte (rechts). WLD über Vorfrucht-Varianten (Ww2: zweijähriger Wegwarteanaub, Rs1: einjähriger Rohrschwingelanbau) gemittelt. Versuch A, 04.04.–08.07.2011, Profilwandmethode.

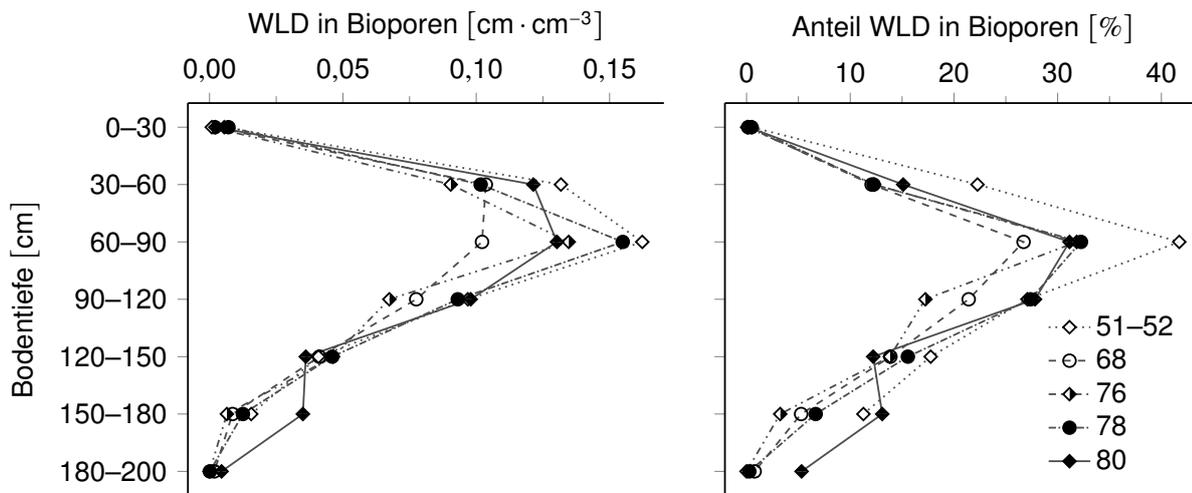
erhoben. Die Maxima verschoben sich zu späteren Untersuchungen im August in Richtung der Tiefenklassen 60–90 und 90–120 cm.

Der Anteil der Wurzeln in Bioporen war mit zunehmender Entwicklungsdauer rückläufig (Abb. 26, rechts). Zum ersten Untersuchungstermin Anfang Juli wurden mit Abstand die höchsten Anteile von 24 % in 30–60 cm und 47 % in 60–90 cm Bodentiefe ermittelt. Ende Juli waren die Werte bereits auf 9 % und 22 % in den Bodentiefenklassen 30–60 cm und 60–90 cm abgesunken. Dieser Trend setzte sich im August fort, als die höchsten Anteile in den Tiefenklassen zwischen 60–120 cm erreicht wurden. Die relative WLD in Bioporen der beiden Untersuchungstermine im August unterschied sich bis 90 cm Bodentiefe nicht voneinander. Unterhalb von 120 cm Bodentiefe nahm die relative WLD stark ab. Hier wurde Ende August eine geringere relative WLD als Anfang des Monats festgestellt.

**Wintergerste 2011** Die höchste WLD in Bioporen von Wintergerste wurde zu allen Untersuchungsterminen jeweils in der 60–90 cm Tiefenklasse erhoben, wobei die WLD in den Tiefenklassen 30–60 cm und 90–120 cm mit Ausnahme von BBCH 47–48 nur geringfügig niedriger war (Abb. 27, links). Die maximale WLD in Bioporen von Wintergerste wurde zur Teigreife (BBCH 84–85) ermittelt (0,041 cm·cm<sup>-3</sup>).

Zu den meisten Untersuchungsterminen betrug die relative WLD in Bioporen in den untersuchten Bodentiefen weniger als 11 % (Abb. 27, rechts). Bemerkenswerterweise wurden am zweiten Untersuchungstermin zum Ende des Ährenscheidens (BBCH 47–48) deutlich höhere Werte von 25 % in 60–90 cm Bodentiefe und 21 % in 90–120 cm Bodentiefe festgestellt. Dieser hohe Wert zu einem vergleichsweise frühen Entwicklungsstadium deutet darauf hin, dass große Bodentiefen zunächst durch Wurzeln in Bioporen erschlossen wurden.

### 3. Ergebnisse und Diskussion



**Abb. 28: Wurzellängendichte (WLD) in Bioporen von Winterraps** in Abhängigkeit von der Bodentiefe und dem Entwicklungsstadium (BBCH-Stadium). Wurzellängendichte in Bioporen (links) und prozentualer Anteil von Wurzeln in Bioporen an der Gesamt-Wurzellängendichte (rechts). WLD über Vorfrucht-Varianten (Ww2: zweijähriger Wegwarteanaub, Rs1: einjähriger Rohrschwingelanbau) gemittelt. Versuch A, 26.03.–19.06.2012, Profilwandmethode.

**Winterraps 2012** Winterraps bildete die höchste WLD in Bioporen in den Bodentiefen zwischen 30 und 120 cm (Abb. 28, links). In den Tiefenklassen 30–60 cm und 60–90 cm wurden die jeweils höchsten Werte (0,13 und 0,16 cm·cm<sup>-3</sup>) zum frühesten Untersuchungstermin (BBCH 51–52) erfasst. Unterhalb von 120 cm Bodentiefe ließen sich nur noch wenige Unterschiede zwischen den Untersuchungszeitpunkten feststellen. Lediglich zu BBCH 80 wurde in der Tiefenklasse 150–180 cm eine bis zu viermal höhere WLD gefunden als zu den früheren Untersuchungszeitpunkten. Dies liegt vermutlich daran, dass die Erschließung der tiefen Bodenschichten schon zu Beginn der Untersuchung weit fortgeschritten war.

Die höchste relative WLD in Bioporen wurde zu BBCH 51–52 mit 22 %, 42 % und 27 % in 30–60 cm, 60–90 cm und 90–120 cm Bodentiefe erhoben (Abb. 28, rechts). Zu den späteren Untersuchungszeitpunkten zeigte die relative WLD einen ähnlichen Verlauf, wobei teilweise nur noch 50 % der Maximalwerte erreicht wurden.

Der maximale mit der Profilwandmethode ermittelte Anteil von Wurzeln in Bioporen von Sommerweizen, Futtermalve, Wintergerste und Winterraps betrug zwischen 18 und 47 % und war damit niedriger als erwartet. Im gepflügten Ap-Horizont wuchsen nur wenige Wurzeln in Bioporen, da dort nur Poren von gerade aktiven Regenwürmern zur Verfügung gestanden haben können. Die mit zunehmender Bodentiefe erwartete Zunahme der WLD in Bioporen fand bis etwa 60–120 cm Bodentiefe statt. Maximale Werte wurden im Bt-Horizont erreicht, in dem auch die höchsten Lagerungsdichten bestimmt wurden. Daraus kann gefolgert werden, dass Bioporen von Wurzeln insbesondere zur Überwindung dichter Zonen genutzt werden.

Die Lagerungsdichten im Bt-Horizont lagen in dem für das Wurzelwachstum limitierenden

Bereich zwischen  $1,46$  und  $1,90 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  (VEIHMEYER & HENDRICKSON 1948, CAMPBELL & HENSHALL 1991). In schluffig lehmigen Bohrkernen aus einem Feldversuch mit Lagerungsdichten zwischen  $1,50$  und  $1,77 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  war das Wurzelwachstum von Sojabohne und Sudangras hauptsächlich auf natürliche Löcher und Risse beschränkt (ZIMMERMAN 1961). Die Lagerungsdichte allein ist jedoch kein ausreichender Indikator für das Wurzelwachstum. Aussagekräftiger ist der Eindringwiderstand, der maßgeblich von der Lagerungsdichte und dem Wassergehalt abhängt (HAMBLIN 1985, CAMPBELL & O'SULLIVAN 1991, UNGER & JONES 1998). Mit zunehmendem Eindringwiderstand nimmt das Wurzelwachstum ab. Der mit dem Penetrometer gemessene Eindringwiderstand ist jedoch aufgrund kleinräumiger Heterogenität 2 bis 8 mal größer als der tatsächliche von der Wurzel erfahrene Widerstand (HORN et al. 1987, BENGOUGH & MULLINS 1990, ATWELL 1993). Da es in den Versuchsjahren Trockenperioden gab, kann davon ausgegangen werden, dass die hohen Lagerungsdichten limitierend auf das Wurzelwachstum wirkten. Eine leichte Zunahme von Wurzeln in Bioporen mit zunehmender Bodentiefe von 55 bis 85 cm wurde im gleichen Feldversuch auch mit *in situ*-Endoskopie beobachtet (ATHMANN et al. 2013). Ab 115 cm Bodentiefe am Übergang vom Bt- zum C-Horizont sank die Lagerungsdichte. Gleichzeitig nahm unterhalb von 125 cm Bodentiefe auch die WLD in Bioporen stark ab. Dies entspricht nicht dem aus der Literatur bekannten Verlauf. Möglicherweise sind Bioporen im C-Horizont weniger relevant für das Wurzelwachstum als im vergleichsweise dichten Bt-Horizont. Außerdem nahm auch die Bioporendichte mit der Bodentiefe ab, so dass weniger Bioporen für das Wurzelwachstum zur Verfügung standen. Aus diesen Gründen erscheint die Abnahme der WLD in Bioporen plausibel.

Es ist davon auszugehen, dass von Wurzeln geschaffene Bioporen mit der Bodentiefe an Durchmesser abnehmen. Sinkt der Porenquerschnitt dadurch unter 2 mm, können die Bioporen an der Profilwand nicht mehr quantifiziert werden. Wurzeln, die in einer solchen sich verengenden Biopore wachsen, werden dann als im *bulk*-Boden wachsend identifiziert. Dieser Umstand kann dazu beitragen, dass die WLD in Bioporen unterhalb von 125 cm Bodentiefe abnimmt. Außerdem unterschätzt die Profilwandmethode die WLD in Bioporen besonders bei Vorliegen geringer Bioporendichten, da die Wahrscheinlichkeit abnimmt, in der angeschnittenen vertikalen Fläche eine Biopore zu treffen. Allerdings nahm die Bioporendichte kontinuierlich mit der Bodentiefe ab und kann daher die starke Abnahme der WLD in Bioporen unterhalb von 90 cm Bodentiefe nur zu einem geringen Teil erklären.

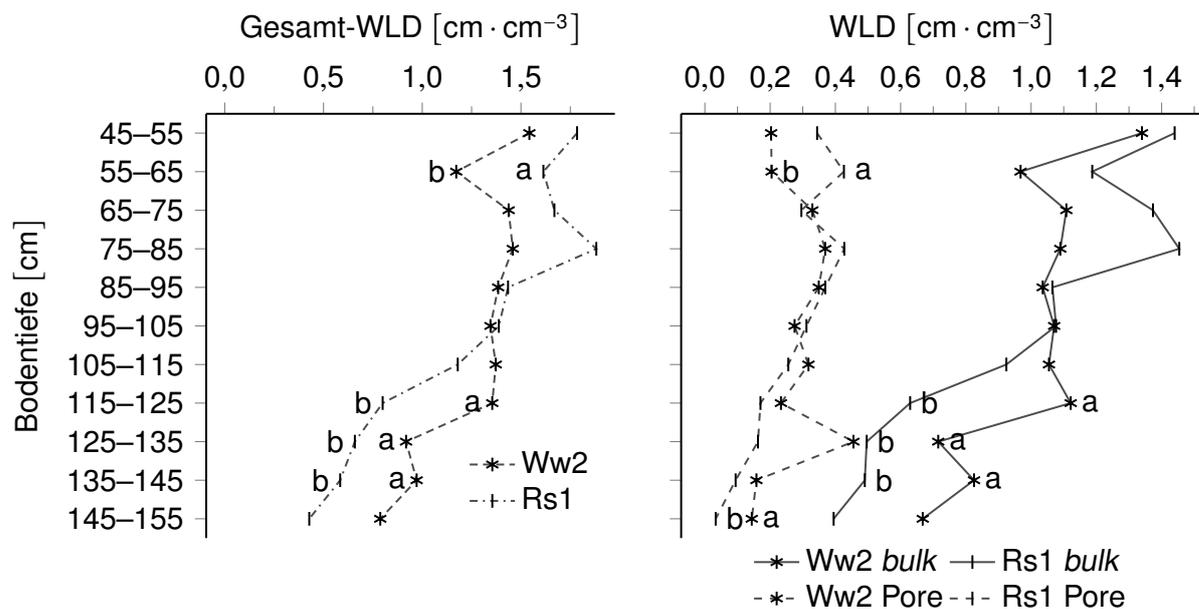
Informationen über das Wurzelwachstum in Bioporen in Abhängigkeit von der Entwicklung der Kulturpflanze im Verlauf der Vegetationsperiode sind aus der Literatur nicht bekannt. Die beschriebenen Beobachtungen sind oft nur Momentaufnahmen. Im vorliegenden Versuch konnte dagegen mit Hilfe der Profilwandmethode der zeitliche Verlauf des Wurzelwachstums in Bioporen und im *bulk*-Boden erhoben werden. Zu einem frühen Entwicklungsstadium wurde bei allen Kulturen ein wesentlich höherer prozentualer Anteil der WLD in Bioporen festgestellt als zu späteren Terminen. Wurzeln, die auf Poren treffen, sind keiner Limitierung durch die Lagerungsdichte unterworfen. Dadurch wird das Längenwachstum beschleunigt und große Bodentiefen erschlossen, bevor die Wurzeln im *bulk*-Boden in diese Bodentiefen vordringen.

Da die absolute WLD in Bioporen bei den meisten Kulturen nur geringfügig abnahm, ist die Abnahme der relativen WLD in Bioporen auf eine Zunahme der Durchwurzelung des *bulk*-Bodens zurückzuführen. Dies ist durch eine zeitverzögerte Erschließung des *bulk*-Bodens aufgrund des höheren Eindringwiderstands zu erklären. Eine ergänzende Variante dieses Erklärungsansatzes besteht darin, dass Wurzeln den tiefen Boden zuerst in Bioporen erreichen und dann aus den Bioporen auswachsen, um auch den *bulk*-Boden zu erschließen.

Die Fähigkeit von Wurzeln, aus Poren auszuwachsen, wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Hierzu zählen der Verdichtungsgrad der Porenwand und der Eindringwiderstand des *bulk*-Bodens. Auch das Relief und die Ausrichtung der Biopore haben einen Einfluss darauf, wie leicht eine Wurzel diese wieder verlassen kann (HIRTH et al. 2005). So wuchsen im Laborversuch mehr Wurzeln aus Poren mit einer rauhen Porenwandung als mit einer glatten Wandung aus. Außerdem drangen bei einer horizontaleren Ausrichtung der Biopore etwa 78 % der Wurzeln in den umliegenden Boden vor, während dies bei vertikalen Poren nur 13 % der Wurzeln möglich war. Zudem können auch Wurzelarchitektur und Wurzeldurchmesser das Auswachsen beeinflussen (BENGOUGH 2003). Wie in ungestörten Proben aus dem Feldversuch mit Röntgen-Computertomographie von PAGENKEMPER et al. (2013) gezeigt wurde, weisen die Poren kleine Seitengänge auf. Diese wurden beispielsweise durch Seitenwurzeln geprägt und erlauben den Wurzeln der aktuellen Kultur, aus der Pore auszuwachsen. Mithilfe von *in situ*-Endoskopie konnte dieser Sachverhalt auch direkt im Feldversuch beobachtet werden (ATHMANN et al. 2013). Ein aktives Auswachsen aus der Pore ist nicht die einzige Erklärung für die Erschließung des *bulk*-Bodens. Auch der bereits erwähnte Umstand, dass sich eine von Wurzeln geschaffene Biopore mit zunehmender Bodentiefe verengt, bis die Wurzel schließlich im *bulk*-Boden wächst, kann einen Einfluss haben. In Feldversuchen wurde mehrfach beobachtet, dass Wurzeln dazu neigen, in vertikalen Poren zu verbleiben (EHLERS et al. 1983, HIRTH et al. 2005) oder Regenwurmrohren solange folgen, bis diese enden (WANG et al. 1986).

**Färbemonolithmethode** Die Färbemonolithmethode ermöglicht die Unterteilung der Gesamt-Wurzellängendichte in die Anteile der WLD im *bulk*-Boden und in Bioporen. Es wurde der Einfluss der Vorfrucht-Varianten (Ww2 und Rs1) und der Bodentiefe auf die WLD von Wintergerste im *bulk*-Boden und in Bioporen ermittelt (Abb. 29). Die Gesamt-WLD der Wintergerste war in den Tiefenstufen von 45–105 cm nach Rs1 höher als nach Ww2 (Abb. 29, links). Unterhalb von 105 cm Bodentiefe war hingegen die WLD nach Ww2 höher als nach Rs1. In den Tiefenstufen von 115 bis 145 cm war dieser Unterschied signifikant.

Analog zur Gesamt-Wurzellängendichte war auch die WLD im *bulk*-Boden und in Bioporen zunächst nach Rs1 höher als nach Ww2 (Abb. 29, rechts), während sich das Verhältnis unterhalb von 105 cm Bodentiefe umkehrte. Für die WLD in Bioporen war dieser Unterschied in der Bodentiefe 145–155 cm signifikant, für die WLD im *bulk*-Boden von 115–145 cm Bodentiefe. Die WLD in Bioporen ( $0,05\text{--}0,5\text{ cm}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) war im Vergleich zum *bulk*-Boden ( $0,4\text{--}1,45\text{ cm}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) gering und wies eine geringe Variabilität mit der Bodentiefe auf. Dies liegt darin begründet, dass im Ap-Horizont oder unterhalb von 155 cm Bodentiefe, wo nur



**Abb. 29: Gesamt-Wurzellängendichte** (Gesamt-WLD, links) und **Wurzellängendichte in Bioporen und bulk-Boden** (WLD, rechts) von Wintergerste in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der Vorfrucht-Variante (Ww2: zweijähriger Wegwarteanaubau, Rs1: einjähriger Rohrschwingelanbau). Versuch A, 27.06.–19.07.2011, Färbemonolithmethode. Varianten mit verschiedenen Buchstaben innerhalb einer Tiefenstufe unterscheiden sich signifikant. Mann-Whitney-U-Test ( $\alpha=0,05$ ).

geringe Bioporendichten vorliegen, keine Untersuchung durchgeführt wurde.

Mit der Färbemonolithmethode konnten die Ergebnisse der Profilwandmethode, dass nur geringe Anteile der Wurzeln der untersuchten Nachfruchtulturen in Bioporen wuchsen, bestätigt werden. Der ermittelte Anteil der WLD in Bioporen von Wintergerste betrug etwa 20 % der Gesamt-WLD. Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zu früheren Studien, wonach sich die meisten (KÖPKE 1981, EHLERS et al. 1983) oder alle Wurzeln im Unterboden in Bioporen befinden (KLÄSENER 1924).

**Fläche der Bioporen** Grundlage für die Berechnung des Anteils der Bioporenfläche an der untersuchten Bodenfläche ist die in Abbildung 9 auf S. 34 dargestellte Bioporendichte über die Bodentiefe. Dabei wurden für die Porenklassen 2–5 mm und > 5 mm Durchmesser mittlere Durchmesser von 4 bzw. 8 mm angenommen, um die Oberfläche der Bioporen in einer Tiefenstufe zu berechnen (Tab. 12). Da die Bioporendichte mit zunehmender Bodentiefe abnahm, reduzierte sich auch die Fläche der Bioporen mit der Bodentiefe.

Die Oberfläche der Bioporen (Durchmesser > 2 mm) betrug gemittelt über die Bodentiefen nach Ww2 1,7 % und nach Rs1 1,3 % der Bodenfläche (Tab. 12). Bei einer zufälligen oder gleichmäßigen Verteilung der Wurzeln im Boden wäre daher ein Anteil von etwa 1,5 % der Wurzeln in Bioporen zu erwarten. Demgegenüber war der vorgefundene Anteil Wurzeln in Bioporen deutlich höher: Im Durchschnitt betrug er nach Ww2 19,7 % und nach Rs1 21,0 % (Tab. 12).

### 3. Ergebnisse und Diskussion

Folglich wurde trotz der vergleichsweise geringen relativen WLD in Bioporen eine Präferenz der Wurzeln für Bioporen gezeigt. Gründe dafür sind der geringere mechanische Widerstand (LOGSDON & LINDEN 1992), eine verbesserte Sauerstoffverfügbarkeit (DEXTER 1986a) und die nährstoffangereicherte Bioporenwand (EDWARDS & LOFTY 1980). Die Feststellung, dass in der Biopore günstigere Bedingungen für das Wurzelwachstum im Vergleich zum *bulk*-Boden vorliegen, vermag nicht den Prozess der Besiedelung von Bioporen durch Wurzeln zu erklären. Hierfür gibt es zwei Erklärungsversuche. Der erste Ansatz ist es, von einem aktiven Wachstum der Wurzel in Richtung Biopore und der förderlichen Bedingungen auszugehen. So beobachtete DEXTER (1986b), dass Wurzeln im sauerstoffarmen Boden bevorzugt auf Bioporen zuwuchsen, aber im gut durchlüfteten Boden keine Präferenz bestand. Es wird davon ausgegangen, dass Wurzeln bestimmter Genotypen Gradienten von Bodeneigenschaften wie Sauerstoffverteilung oder Eindringwiderstand wahrnehmen können (BENGOUGH 2003, MCKENZIE et al. 2009). Beim zweiten Ansatz wird angenommen, dass die Wurzel zufällig auf eine Biopore trifft. In Versuchen entsprachen die in Bioporen einwachsenden Wurzeln oft dem bei einer zufälligen Verteilung erwarteten Anteil (DEXTER 1986b, HIRTH et al. 1997).

Für die Anhäufung von Wurzeln in Poren bei einem zufälligen Eintritt der Wurzel in die Biopore können verschiedene Erklärungen angeführt werden. Wie bereits beschrieben kann der Ansatz, dass die Wurzeln in der Pore „gefangen“ sind (STIRZAKER et al. 1996),

**Tab. 12: Anteil der Oberfläche von Bioporen [%] an der untersuchten horizontalen Bodenfläche** (Annahmen: mittlere Durchmesser von 4 bzw. 8 mm für die Porenklassen 2–5 mm und > 5 mm Durchmesser) sowie **absolute und relative WLD in Bioporen von Wintergerste** [ $\text{cm}\cdot\text{cm}^{-3}$  und %] in Abhängigkeit von der Vorfrucht-Variante (Ww2: zweijähriger Wegwarteanaubau, Rs1: einjähriger Rohrschwingelanbau) und der Bodentiefe [cm], die der Oberkante des Monoliths entspricht. Versuch A, 27.06.–19.07.2011, Färbemonolithmethode. Hellgrau hinterlegte Werte sind höher, dunkelgrau hinterlegte Werte sind signifikant höher als der ungefärbte Wert. Mann-Whitney-U-Test ( $\alpha=0,05$ ).

Bodentiefe [cm]	Bioporenfläche [%]		WLD in Bioporen [ $\text{cm}\cdot\text{cm}^{-3}$ ]		WLD in Bioporen [%]	
	Ww2	Rs1	Ww2	Rs1	Ww2	Rs1
45	2,3	1,5	0,20	0,34	13,9	18,9
55	3,3	2,4	0,20	0,43	18,6	26,2
65	2,6	1,9	0,33	0,30	22,3	17,5
75	2,2	2,0	0,37	0,43	24,5	23,1
85	1,8	1,5	0,35	0,37	25,8	26,2
95	1,6	1,3	0,28	0,31	19,9	24,7
105	1,6	1,0	0,32	0,26	23,4	24,0
115	1,3	0,7	0,23	0,17	16,7	23,0
125	1,0	0,7	0,46	0,16	22,5	24,1
135	0,7	0,7	0,16	0,09	14,5	16,1
145	0,5	0,5	0,14	0,03	15,1	7,2
∅	1,7	1,3	0,27	0,26	19,7	21,0

für den vorliegenden Boden nicht als Erklärung dienen. Vielmehr ist die Wurzel in Poren weniger Limitationen als im *bulk*-Boden ausgesetzt. Bei einer hohen Lagerungsdichte wurde für Gerste eine vermehrte Bildung von Seitenwurzeln beschrieben (GOSS 1977). Durch eine hohe Anzahl Seitenwurzeln wird die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass die Wurzel auf eine Pore trifft. Auch die hohen Nährstoffgehalte in der Porenwandung können zu einer verstärkten Seitenwurzelsbildung der in die Pore eingewachsenen Wurzel führen. Eine Erhöhung der Durchwurzelung (beispielsweise Wurzellänge, Initiierung von Seitenwurzeln) durch lokal höhere Nährstoffgehalte ist vielfach gezeigt worden (HODGE 2004, ROSE et al. 2009, GROSSMAN & RICE 2012). Es gibt Belege, dass zumindest bei Getreide die Bildung von Seitenwurzeln im gesamten Wurzelsystem koordiniert wird. Sind einzelne Wurzeln nicht förderlichen Bedingungen ausgesetzt, können im Ausgleich andere Teile des Wurzelsystems gefördert werden. Hierzu ist es nicht notwendig, dass sich die direkten Umweltbedingungen der geförderten Wurzeln, beispielsweise hinsichtlich der Nährstoffverfügbarkeit, ändern (BALL et al. 2005). Diese Reaktion ist genotypspezifisch. Mit Keimpflanzen von Gerste wurde in einem *split-root*-Gefäßversuch gezeigt, dass im lockeren Boden mehr und im harten Boden weniger Wurzeln als in den jeweils homogenen Kontrollen gebildet wurden (BINGHAM & BENGOUGH 2003). Dieser Effekt kann auch im strukturierten Boden eine Rolle spielen und die Erschließung von Bioporen fördern.

Eine hohe WLD kann sich bei Kontakt der Wurzeln zur Porenwand vorteilhaft für die Pflanze auswirken, da sie so Zugang zu Wasser und Nährstoffen hat (WHITE & KIRKEGAARD 2010). Weder mit der Profilwand- noch mit der Färbemonolithmethode kann der Kontakt der Wurzel zur Porenwand bestimmt werden. Allerdings zeigten ATHMANN et al. (2013) im gleichen Feldversuch mit Hilfe von *in situ*-Endoskopie, dass etwa 85 % der Wurzeln von Wintergerste und Winterrapss Kontakt zur Bioporenwand hatten. Außerdem wurden sowohl in die Pore einwachsende als auch aus der Pore auswachsende Wurzeln beobachtet.

Können Wurzeln die Pore nicht verlassen, kommt es zu Konkurrenz und zu einer schlechten Ausnutzung des Bodens, da nicht alle Wurzeln Kontakt zur Porenwand haben (PASSIOURA 1991). In einem Gefäßversuch waren Wurzeln in großlumigen künstlichen Poren eingeschlossen. Unter dieser Bedingung wurde in der Variante mit trockenem Boden eine Zunahme des Blattflächenindex festgestellt (STIRZAKER et al. 1996). Die Anhäufung von vielen Wurzeln in einer Pore schränkt nicht nur die räumliche Verfügbarkeit von Wasser und Nährstoffen ein, sondern erhöht auch den Kontakt zu bodenbürtigen Pathogenen dadurch, dass die höhere Konzentration an Wurzel-Exsudaten das Wachstum von wirtsspezifischen Wurzelpathogenen fördert (NITTA 1991).

### Vergleich von Sommerungen und Winterungen

Jeweils für den zweiten und letzten Untersuchungstermin wurde für die in den Versuchsjahren 2010–2012 angebauten Kulturarten die absolute und relative WLD in Bioporen (Profilwandmethode) über die Bodentiefe verglichen (Tab. 13). Die Unterschiede zwischen den Sommerungen Sommerweizen und Futtermalve 2010 sowie den Winterungen Wintergerste 2011 und Win-

### 3. Ergebnisse und Diskussion

terraps 2012 wurden statistisch getestet. Da die Winterungen in zwei verschiedenen Jahren untersucht wurden, lässt sich ein Jahreseffekt durch die Witterung nicht ausschließen.

Aufgrund der längeren Vegetationszeit erschlossen die Winterungen Bioporen intensiver als die Sommerungen (Tab. 13). Der Vergleich der Sommerungen Sommerweizen und Futtermalve mit den Winterungen Wintergerste und Winterraps zeigte, dass ein deutlicher Einfluss des Wurzelsystems auf die Besiedelung von Bioporen bestand (Tab. 13). Die allorhizen Kulturen Futtermalve und Winterraps besiedelten Bioporen stärker als die homorhizen Kulturen. Insbesondere beim Vergleich von Wintergerste und Winterraps treten die Unterschiede zwischen allorhizem und homorhizem Wurzelsystem deutlich hervor. Der Kontakt zur Porenwand war bei beiden Kulturen gleich hoch. Der Unterschied bestand lediglich darin, dass bei Winterraps der Kontakt in erster Linie über laterale und bei Wintergerste vorwiegend über vertikale Wurzeln hergestellt wurde (ATHMANN et al. 2013). Die stärkere Verzweigung und Bildung von vielen Seitenwurzeln durch Winterraps im Vergleich zu Wintergerste kann auch die Ursache der stärkeren Durchwurzlung sein. Allerdings bestand in der Untersuchung von ATHMANN et al. (2013) im Gegensatz zu den hier vorgestellten Daten zwischen Wintergerste und Winterraps kein Unterschied bezüglich der Anzahl der Wurzeln in Bioporen. Eine Erklärung hierfür kann in der Untersuchungsmethode begründet sein. Wegen der besonders zeitintensiven *in situ*-Endoskopie wurde über einen langen Zeitraum hinweg beprobt, während die Daten von der Profilwand zeitlich schärfer aufgelöst sind.

**Tab. 13: Absolute und relative Wurzellängendichte (WLD) in Bioporen.** Vergleich der Sommerungen **Sommerweizen** 2010 (W) und **Futtermalve** 2010 (M) sowie der Winterungen **Wintergerste** 2011 (G) und **Winterraps** 2012 (Ra) zu zwei Untersuchungsterminen. Profilwandmethode. Hellgrau hinterlegte Werte sind höher, dunkelgrau hinterlegte Werte sind signifikant höher als der ungefärbte Wert. Mann-Whitney-U-Test ( $\alpha=0,05$ ).

	Bodentiefe [cm]	2. Untersuchungstermin				letzter Untersuchungstermin			
		W	M	G	Ra	W	M	G	Ra
WLD [cm·cm <sup>-3</sup> ]	0–30	0,000	0,000	0,000	0,002	0,001	0,000	0,000	0,002
	30–60	0,011	0,011	0,012	0,104	0,002	0,016	0,029	0,121
	60–90	0,005	0,043	0,024	0,102	0,005	0,024	0,034	0,130
	90–120			0,012	0,078	0,007	0,038	0,032	0,098
	120–150				0,041	0,001	0,012	0,018	0,036
	150–180				0,009	0,000	0,001	0,000	0,035
	180–200				0,002			0,000	0,005
WLD [%]	0–30	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1	0,0	0,0	0,1
	30–60	9,5	5,7	6,8	17,3	1,5	7,5	6,3	20,3
	60–90	15,2	28,1	24,9	25,6	11,3	11,8	8,2	30,7
	90–120			17,5	20,7	19,4	21,7	7,1	26,5
	120–150				12,7	8,9	14,0	5,5	12,5
	150–180				4,6	0,0	1,0	0,0	14,3
	180–200				2,2			0,5	3,7

Da Winterraps eine um ein Vielfaches höhere WLD in Bioporen ausbildete, war potentiell eine stärkere Ausnutzung der Nährstoffvorräte der Bioporenwandung gegeben als bei Wintergerste. Kritisch muss dabei betrachtet werden, dass es zu intraspezifischer Konkurrenz der Winterrapswurzeln kommen kann, wenn die Dichte in einer Pore zu hoch ist (PASSIOURA 1991, STIRZAKER et al. 1996).

### Vergleich der Vorfrucht-Varianten Ww2 und Rs1

Im Folgenden wird die absolute und relative Wurzellängendichte (WLD) in Bioporen nach Varianten getrennt dargestellt. Dabei wird der Einfluss der Vorfrucht-Varianten Ww2 und Rs1 auf die WLD in Bioporen von Sommerweizen, Futtermalve, Wintergerste und Winterraps näher betrachtet.

Vor der Blüte des Sommerweizens (BBCH 33 und 55–58) wurde nach Rs1 eine höhere relative WLD in Bioporen festgestellt (Tab. 14). Zu den ersten beiden Untersuchungsterminen war jeweils die absolute WLD in Bioporen in der unteren beprobten Tiefenklasse nach Ww2 und Rs1 sehr ähnlich. Aufgrund der geringeren WLD im *bulk*-Boden war jedoch der relative Anteil nach Rs1 höher als nach Ww2. Ab dem Ende der Blüte (BBCH 68) war die absolute und prozentuale WLD in Bioporen (bei BBCH 83 nicht einheitlich) nach Ww2 höher. Dieser Unterschied war in der Tiefenklasse von 30–60 cm (BBCH 68 und BBCH 89) signifikant und wird durch Untersuchungen in Versuch B von HAN et al. (2015b) bestätigt.

**Tab. 14: Absolute Wurzellängendichte (WLD) in Bioporen und prozentualer Anteil von Wurzeln in Bioporen an der Gesamt-WLD von Sommerweizen** in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium, der Bodentiefe und der Vorfrucht-Variante (Ww2: zweijähriger Wegwarteanaubau, Rs1: einjähriger Rohrschwingelanbau). Versuch A, 31.05.–30.07.2010, Profilwandmethode. Hellgrau hinterlegte Werte sind höher, dunkelgrau hinterlegte Werte sind signifikant höher als der ungefärbte Wert. Mann-Whitney-U-Test ( $\alpha=0,05$ ).

	Bodentiefe [cm]	BBCH 33		BBCH 55–58		BBCH 68		BBCH 83		BBCH 89	
		Ww2	Rs1	Ww2	Rs1	Ww2	Rs1	Ww2	Rs1	Ww2	Rs1
WLD [ $\text{cm}\cdot\text{cm}^{-3}$ ]	0–30	0,001	0,008	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000
	30–60	0,008	0,007	0,006	0,015	0,021	0,003	0,006	0,001	0,005	0,000
	60–90			0,006	0,005	0,021	0,005	0,003	0,007	0,007	0,003
	90–120									0,010	0,005
	120–150									0,002	0,000
	150–180									0,000	0,000
WLD [%]	0–30	0,2	1,5	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0
	30–60	6,6	8,8	5,5	7,8	14,5	1,6	3,4	0,4	2,5	0,0
	60–90			13,6	20,0	47,9	19,4	5,8	11,3	14,4	7,8
	90–120									33,1	10,2
	120–150									27,2	0,0
	150–180									0,0	0,0

### 3. Ergebnisse und Diskussion

**Tab. 15: Absolute Wurzellängendichte (WLD) in Bioporen und prozentualer Anteil von Wurzeln in Bioporen an der Gesamt-WLD von Futtermalve** in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium, der Bodentiefe und der Vorfrucht-Variante (Ww2: zweijähriger Wegwarteanaubau, Rs1: einjähriger Rohrschwingelanbau). Versuch A, 05.07.–20.08.2010, Profilwandmethode. Hellgrau hinterlegte Werte sind höher, dunkelgrau hinterlegte Werte sind signifikant höher als der ungefärbte Wert. Mann-Whitney-U-Test ( $\alpha=0,05$ ).

Bodentiefe [cm]		A Juli		E Juli		A August		E August	
		Ww2	Rs1	Ww2	Rs1	Ww2	Rs1	Ww2	Rs1
WLD [cm·cm <sup>-3</sup> ]	0–30	0,004	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	30–60	0,035	0,030	0,011	0,011	0,010	0,037	0,017	0,016
	60–90	0,072	0,007	0,038	0,048	0,012	0,021	0,036	0,013
	90–120					0,047	0,010	0,025	0,051
	120–150					0,020	0,004	0,021	0,003
	150–180					0,006	0,004	0,002	0,000
WLD [%]	0–30	1,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	30–60	22,3	25,6	4,7	5,2	4,7	16,6	7,1	8,9
	60–90	63,1	43,3	19,4	37,6	8,0	15,5	17,7	9,9
	90–120					27,5	10,5	13,9	42,8
	120–150					22,1	8,7	17,6	13,6
	150–180					14,0	26,9	2,3	0,0

Bei der Futtermalve wurde nach der Vorfrucht-Variante Ww2 Anfang Juli eine höhere absolute WLD in allen Tiefenklassen als nach Rs1 festgestellt (Tab. 15). Während es Ende Juli und Anfang August keine deutlichen Unterschiede aufgrund der Vorfrucht-Variante gab, war die absolute WLD in Bioporen Ende August in den meisten Bodentiefenklassen nach Ww2 höher, aber nur in einer Tiefenklasse signifikant. Insgesamt war der Einfluss der Vorfrucht-Varianten Ww2 oder Rs1 auf die relative WLD in Bioporen von Futtermalve nicht einheitlich.

Die absolute WLD in Bioporen von Wintergerste wurde von den Vorfrucht-Varianten ebenfalls nicht konsistent beeinflusst (Tab. 16). Zu BBCH 84–85 war die absolute WLD in Bioporen nach Rs1 in der Tiefenklasse 30–60 cm signifikant höher als nach Ww2, während dies beim folgenden Untersuchungstermin umgekehrt war. Auch die relative WLD in Bioporen wurde nicht konsistent von der Vorfrucht-Variante beeinflusst. Zu BBCH 84–85 wurde in den meisten Tiefenklassen nach Rs1 ein höherer Anteil als nach Ww2 festgestellt. Demgegenüber war die relative WLD zu BBCH 89–92 nach Ww2 in der Tiefenklasse 30–60 cm signifikant höher als nach Rs1.

Beim Winterraps war der Einfluss der Vorfrucht-Variante auf die absolute und relative WLD in Bioporen nur gering (Tab. 17). Zum ersten Untersuchungstermin war die WLD in Bioporen zwischen 30–60 cm Bodentiefe nach Rs1 höher. Dagegen war die WLD von 60 bis 180 cm Bodentiefe nach Ww2 höher. Zu den folgenden Untersuchungsterminen wurden meist höhere Werte nach Ww2 erhoben. Zum letzten Untersuchungstermin (BBCH 80) war dieser Sachverhalt in den Tiefenklassen 0–30 und 180–200 cm signifikant.

**Tab. 16: Absolute Wurzellängendichte (WLD) in Bioporen und prozentualer Anteil von Wurzeln in Bioporen an der Gesamt-WLD von Wintergerste** in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium, der Bodentiefe und der Vorfrucht-Variante (Ww2: zweijähriger Wegwarteanaubau, Rs1: einjähriger Rohrschwingelanbau). Versuch A, 04.04.–08.07.2011, Profilwandmethode. Hellgrau hinterlegte Werte sind höher, dunkelgrau hinterlegte Werte sind signifikant höher als der ungefärbte Wert. Mann-Whitney-U-Test ( $\alpha=0,05$ ).

	Bodentiefe [cm]	BBCH 31–32		BBCH 47–48		BBCH 59–61		BBCH 84–85		BBCH 89–92	
		Ww2	Rs1								
WLD [cm·cm <sup>-3</sup> ]	0–30	0,001	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000
	30–60	0,002	0,006	0,010	0,011	0,017	0,010	0,034	0,032	0,043	0,016
	60–90			0,036	0,022	0,013	0,027	0,032	0,049	0,038	0,029
	90–120			0,001	0,015	0,014	0,016	0,035	0,033	0,016	0,046
	120–150					0,013	0,007	0,016	0,020	0,015	0,019
	150–180					0,000	0,000	0,003	0,002	0,000	0,000
	180–200					0,000	0,000	0,000	0,003	0,001	0,000
WLD [%]	0–30	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
	30–60	1,4	6,4	3,9	5,7	4,1	3,0	7,2	7,3	7,7	2,8
	60–90			29,5	21,1	5,8	10,9	9,6	11,7	9,7	7,1
	90–120			2,0	39,6	7,1	8,3	9,7	9,7	3,8	11,9
	120–150					12,0	7,3	5,7	7,5	6,1	7,9
	150–180					0,0	0,0	2,8	3,1	0,0	0,0
	180–200					0,0	0,0	0,0	7,7	1,9	0,0

Der Einfluss der Vorfrucht-Variante auf das mit der Profilwandmethode bestimmte Wurzelwachstum der Nachfrüchte in Bioporen war weniger deutlich als der Effekt des Wurzelsystems. Da nach Ww2-Vorfrucht im Mittel über den Feldversuch mehr Bioporen zur Verfügung standen, wäre zu erwarten, dass die absolute WLD nach Ww2 höher war als nach Rs1. Für Sommerweizen traf dies für die Untersuchungstermine ab der Blüte zu. Zu diesen Terminen war auch die relative WLD nach Ww2 höher (Tab. 14). Bei den anderen Kulturen Futtermalve, Wintergerste und Winterraps konnten allerdings keine durchgehenden Muster beobachtet werden. Die Untersuchungen zu Bioporendichte und WLD wurden nicht in denselben Parzellen durchgeführt. Da anzunehmen ist, dass die Bioporendichte kleinräumigen Schwankungen unterlag, kann es in einigen der untersuchten Parzellen deutliche Abweichungen vom Mittel des Feldversuchs gegeben haben.

Bei Wintergerste (2011) wurde mit der Färbemonolithmethode in der gleichen Parzelle die Bioporendichte und die WLD in Bioporen erhoben. Beide Parameter wurden von der Vorfrucht-Variante beeinflusst. Die im gleichen Jahr mit der Profilwandmethode erhobene WLD in Bioporen von Wintergerste bestätigte dagegen diese Ergebnisse nicht. Insgesamt war der Einfluss der Vorfrucht-Variante auf die WLD in Bioporen gering und wurde mit der Profilwandmethode nicht gut abgebildet. Zur Bestimmung des Varianteneinflusses auf das Wurzelwachstum in Bioporen war die Treffgenauigkeit der Färbemonolithmethode höher als

### 3. Ergebnisse und Diskussion

**Tab. 17: Absolute Wurzellängendichte (WLD) in Bioporen und prozentualer Anteil von Wurzeln in Bioporen an der Gesamt-WLD von Winterraps in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium, der Bodentiefe und der Vorfrucht-Variante (Ww2: zweijähriger Wegwarteanaubau, Rs1: einjähriger Rohrschwingelanbau). Versuch A, 26.03.–19.06.2012, Profilwandmethode. Hellgrau hinterlegte Werte sind höher, dunkelgrau hinterlegte Werte sind signifikant höher als der ungefärbte Wert. Mann-Whitney-U-Test ( $\alpha=0,05$ ).**

	Bodentiefe [cm]	BBCH 51–52		BBCH 68		BBCH 76		BBCH 78		BBCH 80	
		Ww2	Rs1	Ww2	Rs1	Ww2	Rs1	Ww2	Rs1	Ww2	Rs1
WLD [ $\text{cm}\cdot\text{cm}^{-3}$ ]	0–30	0,002	0,009	0,003	0,001	0,002	0,000	0,011	0,003	0,004	0,000
	30–60	0,110	0,153	0,104	0,103	0,110	0,071	0,119	0,084	0,130	0,113
	60–90	0,188	0,136	0,092	0,112	0,170	0,100	0,166	0,144	0,163	0,097
	90–120	0,109	0,085	0,063	0,093	0,068	0,067	0,080	0,106	0,099	0,097
	120–150	0,043	0,039	0,054	0,028	0,049	0,044	0,028	0,064	0,036	0,036
	150–180	0,025	0,006	0,012	0,005	0,002	0,009	0,014	0,007	0,019	0,040
	180–200			0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,010	0,000
WLD [%]	0–30	0,2	0,8	0,3	0,1	0,1	0,0	0,7	0,2	0,3	0,0
	30–60	17,3	27,3	12,7	11,4	15,3	9,4	13,7	10,8	15,7	14,6
	60–90	47,0	36,5	25,6	27,8	34,7	29,0	34,3	30,2	36,0	26,3
	90–120	29,4	24,8	16,8	26,0	16,4	18,1	25,1	29,7	28,5	27,1
	120–150	19,5	16,0	18,3	9,5	14,1	13,6	11,4	19,7	11,6	12,8
	150–180	17,7	4,8	7,4	3,1	1,1	5,4	8,5	4,9	9,9	16,3
	180–200			1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	10,6	0,0

die der Profilwandmethode.

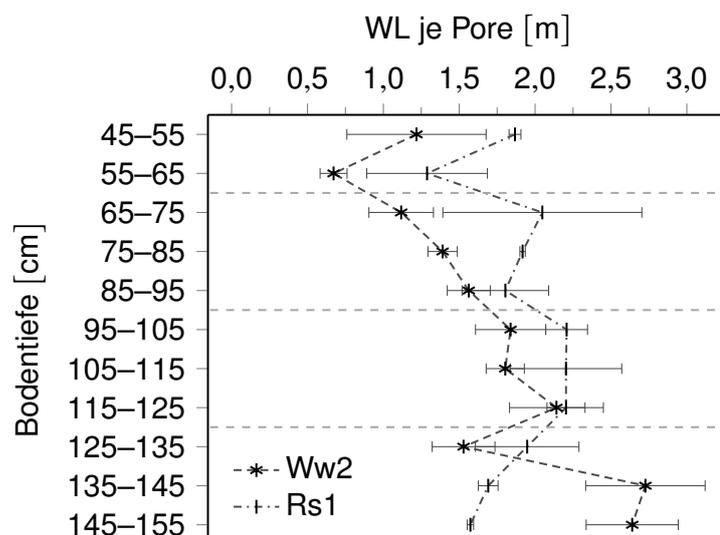
In absoluten Zahlen wurde mit der Färbemonolithmethode unterhalb von 105 cm Bodentiefe nach Ww2 eine höhere WLD in Bioporen festgestellt als nach Rs1 (Tab. 12, S. 66). Die oft nach Ww2 Vorfrucht festgestellte höhere Gesamt-WLD der Nachfrüchte im tiefen Unterboden ist nicht ausschließlich durch die höhere WLD in Bioporen zu erklären. Die Aufteilung der WLD nach *bulk*-Boden und Bioporen mit der Färbemonolithmethode zeigt, dass der Varianten-Effekt schon im *bulk*-Boden signifikant ist (Abb. 29, S. 65). Wie bereits beschrieben, kann das Auswachsen von Wurzeln aus Bioporen dieses Ergebnis erklären. Es ist aber auch denkbar, dass andere Faktoren einen Einfluss haben. Messungen im Feldversuch haben gezeigt, dass der Wassergehalt nach Ww2 Vorfrucht geringer war als nach Rs1 (GAISER et al. 2012), ein Sachverhalt, der sich durch eine höhere Wasseraufnahme von Wegwarte im Vergleich zu Rohrschwingel erklären läßt. Eine hohe Wasseraufnahme kann Schrumpfungsprozesse fördern und dadurch zu Mikrorissen führen, die wiederum die Durchdringbarkeit des Bodens für nachfolgende Kulturen erleichtern können (UTEAU et al. 2013).

**Konkurrenz in Bioporen** Im Folgenden werden ausschließlich die Verhältnisse innerhalb der Bioporen betrachtet. Durch den Bezug der absoluten WLD auf die Anzahl der vorhandenen Bioporen ergibt sich ein Maß für die Konkurrenz der Wurzeln untereinander.

Trotz der geringeren Porendichte nach Rs1 (Abb. 9, S. 34) war die absolute WLD in Bioporen von Wintergerste nach Rs1 in den Bodentiefen zwischen 45 und 65 cm höher als nach Ww2. Zwischen 65 und 125 cm Bodentiefe unterschied sich die absolute WLD in Bioporen kaum aufgrund der Vorfrucht-Variante (Abb. 29, S. 65). Durch die höhere Bioporendichte nach Ww2 in dieser Bodentiefe waren die Wurzeln nach Ww2 aber auf mehr Poren verteilt als nach Rs1. Dies wird besonders deutlich, wenn man die WL auf die Bioporendichte bezieht (Abb. 30).

Dazu wurde für jede 10 cm Tiefenstufe die WL der Monolithe berechnet und auf die Bioporendichte der Oberfläche des entsprechenden Monoliths bezogen. Bei der Annahme, dass die Bioporen genau senkrecht verlaufen, ist jede Biopore in einer Tiefenstufe ebenfalls 10 cm lang. Dann bedeutet beispielsweise die WL von etwa 2 m je Pore in der Bodentiefenstufe 65 bis 75 cm nach Rs1-Vorfrucht, dass in dieser Bodentiefe absolut betrachtet etwa 20 Wurzeln in jeder erhobenen Biopore nebeneinander wachsen. Von 45 bis in 135 cm Bodentiefe war die WL je Pore nach Rs1 höher als nach Ww2. In den zwei Tiefenstufen darunter kehrte sich dieses Ergebnis um. Damit war die Konkurrenz der Wurzeln in einer Biopore der Tendenz nach bis in 135 cm Bodentiefe nach Rs1 höher als nach Ww2 Vorfrucht (Abb. 30).

Die Werte von 1 bis 2,5 m Wurzeln in einer Biopore (10 bis 25 Wurzeln nebeneinander in einer Pore) erscheinen hoch, entsprechen aber durchaus den an der Profilwand und mit *in situ*-Endoskopie gewonnenen Ergebnissen. Zusätzlich kann in Betracht gezogen werden,



**Abb. 30: Wurzellänge (WL) je Biopore [m] von Wintergerste** in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der Vorfrucht-Variante (Ww2: zweijähriger Wegwarteanaubau, Rs1: einjähriger Rohrschwingelanbau). Versuch A, 27.06.–19.07.2011, Färbemonolithmethode. Fehlerbalken stellen den Varianzoeffizienten dar. Keine signifikanten Unterschiede. Mann-Whitney-U-Test ( $\alpha=0,05$ ).

dass die Färbemolymethode dazu neigt, die WLD in Bioporen zu überschätzen (vgl. Abschnitt 3.C.2). Zwar sind exakte Vergleichswerte aus der Literatur nicht bekannt. Allerdings wird eine Anhäufung von Wurzeln in Bioporen an verschiedenen Stellen beschrieben (PIERRET et al. 1999, WATT et al. 2006, WHITE & KIRKEGAARD 2010).

#### 3.B.3. Wurzeldurchmesser

Die Wurzeldurchmesser für Wintergerste 2011 und Winterraps 2012 wurden nach der Vorfrucht-Variante Ww2 erhoben. Die Wintergerste 2011 erreichte mittlere Durchmesser zwischen 0,37 und 0,52 mm (Anhang-Tab. 11, S. 133). Etwa 80–90 % der WL wurde in Durchmesserklassen kleiner 0,6 mm erhoben. Winterraps 2012 hatte Wurzeldurchmesser zwischen 0,17 und 0,31 mm (Anhang-Tab. 12, S. 134). Etwa 90 % der WL wurde in Durchmesserklassen kleiner 0,4 mm ermittelt. Es bestand kein Einfluss der Bodentiefe auf die relative WL in den verschiedenen Wurzeldurchmesserklassen.

Die mittleren Durchmesser der Wurzeln von Wintergerste 2011 befanden sich mit Werten zwischen 0,37 und 0,52 mm in dem von WATT et al. (2008) für Getreide angegebenen Wertebereich von 0,05 bis 0,6 mm. In anderen Versuchen mit Wintergerste wurden etwas geringere Wurzeldurchmesser zwischen 0,32 und 0,45 mm erhoben (GENC et al. 2007, GROSSMAN & RICE 2012).

Die mittleren Wurzeldurchmesser von Winterraps 2012 waren mit Werten zwischen 0,17 und 0,31 mm geringer als die der Wintergerste. Dies ist plausibel, da das Wurzelsystem von Raps einen sehr hohen Feinwurzelanteil besitzt (DIEPENBROCK 2006). Beispielsweise betrug der Anteil der Wurzeln mit einem Durchmesser größer 1 mm in einem Versuch von PIETOLA & ALAKUKKU (2005) nur 0,6 % der WLD. Unter Ausschluss dieser Wurzeln wurde in 0–60 cm Bodentiefe für Winterraps ein geringerer mittlerer Durchmesser (0,23 mm) als für Wintergerste (0,29 mm) gefunden (PIETOLA & ALAKUKKU 2005).

Im Jahr 2011 wurde für die Kulturen Wintergerste und Winterraps sowohl mit Ww2 als auch mit Rs1 als Vorfrucht-Variante der Wurzeldurchmesser von 45 bis 155 cm Bodentiefe bestimmt (Tab. 18). Die Ergebnisse für Wintergerste nach Ww2 sind ein Teilergebnis aus Anhang-Tab. 11, S. 133. In der Durchmesserklasse 0–0,2 mm war die relative WL nach Rs1 in allen Bodentiefen höher als nach Ww2. Ab 85 cm Bodentiefe war der Unterschied signifikant (Tab. 18, oben). In derselben Klasse stieg nach Rs1 die relative WL mit zunehmender Bodentiefe, während sie nach Ww2 abnahm. In allen anderen Klassen bestand nach Rs1 kein deutlicher Einfluss der Bodentiefe auf die relative WL. In den Durchmesserklassen größer 0,2 mm war der Anteil der WL nach Ww2 tendenziell höher als nach Rs1.

Analog zur Wintergerste war auch die relative WL von Winterraps in der Durchmesserklasse 0–0,2 mm nach Rs1 meist signifikant höher als nach Ww2 (Tab. 18, unten). In den Klassen von 0,4 mm bis 1,0 mm nahm die relative WL nach Ww2 mit der Bodentiefe tendenziell zu. Hingegen wurde die relative WL nach Rs1 geringer bzw. nicht konsistent von der Bodentiefe beeinflusst. In den Durchmesserklassen größer 0,2 mm war die relative WL nach Ww2 tenden-

**Tab. 18: Prozentuale Verteilung der Wurzellänge [%] auf sechs Durchmesserklassen [mm] und mittlerer Durchmesser [mm] von Wintergerste (oben, 14.06.–21.06.2011) und Winterraps (unten, 28.06.–01.07.2011) in Abhängigkeit der Bodentiefe und von der Vorfrucht-Variante (Ww2: zweijähriger Wegwarteanbau, Rs1: einjähriger Rohrschwingelanbau). Versuch A, Monolithmethode. Hellgrau hinterlegte Werte sind höher, dunkelgrau hinterlegte Werte sind signifikant höher als der ungefärbte Wert. Mann-Whitney-U-Test ( $\alpha=0,05$ ).**

Bodentiefe [cm]	0-0,2		0,2-0,4		0,4-0,6		0,6-0,8		0,8-1		> 1		$\emptyset$ [mm]		
	Ww2	Rs1	Ww2	Rs1	Ww2	Rs1	Ww2	Rs1	Ww2	Rs1	Ww2	Rs1	Ww2	Rs1	
Wintergerste 2011	45-55	16,6	18,4	58,7	54,6	14,3	15,4	5,4	5,9	2,3	2,5	2,8	3,2	0,43	0,45
	55-65	15,6	17,8	56,6	55,4	15,3	15,2	6,2	6,2	2,7	2,5	3,6	2,8	0,46	0,44
	65-75	16,5	18,9	55,1	54,4	15,6	14,6	6,3	6,2	2,8	2,7	3,6	3,2	0,45	0,44
	75-85	15,0	16,5	52,9	54,7	16,5	16,4	7,2	6,6	3,5	2,7	4,8	3,1	0,49	0,45
	85-95	14,7	18,2	55,5	52,1	16,4	15,8	6,8	6,6	2,9	3,1	3,8	4,2	0,47	0,47
	95-105	12,6	20,2	55,7	52,6	17,7	14,7	7,2	6,0	3,1	2,8	3,6	3,8	0,47	0,45
	105-115	12,3	21,5	55,6	53,6	17,6	14,3	7,6	5,4	3,2	2,4	3,7	2,9	0,48	0,43
	115-125	12,5	21,9	55,8	52,9	17,8	14,0	7,4	5,7	2,9	2,5	3,6	3,0	0,47	0,43
	125-135	11,9	21,9	54,3	50,8	19,3	14,4	7,9	6,2	3,1	2,7	3,6	4,0	0,48	0,45
	135-145	10,2	22,4	52,6	50,1	21,9	14,5	8,5	5,8	3,3	2,7	3,4	4,6	0,49	0,46
145-155	8,7	24,3	49,2	48,7	24,3	14,0	10,4	6,0	3,8	2,8	3,6	4,2	0,51	0,45	
Winterraps 2011	45-55	24,9	31,6	50,6	48,6	12,5	10,1	5,6	4,6	2,4	2,2	3,9	3,0	0,44	0,39
	55-65	24,3	32,8	51,5	49,8	12,5	9,6	5,5	4,0	2,5	1,8	3,7	1,9	0,43	0,37
	65-75	25,5	30,4	53,0	47,4	11,9	10,9	4,8	5,2	2,0	2,5	2,8	3,7	0,40	0,41
	75-85	24,1	31,2	52,7	46,6	12,9	10,5	5,4	5,0	2,2	2,5	2,8	4,1	0,41	0,41
	85-95	23,2	30,3	52,6	48,3	12,7	10,4	5,6	5,1	2,5	2,3	3,4	3,6	0,42	0,41
	95-105	24,1	29,4	51,9	48,1	13,4	11,2	5,2	5,2	2,3	2,5	3,0	3,5	0,41	0,41
	105-115	23,2	30,2	49,8	47,7	13,9	10,5	6,4	5,3	2,9	2,5	3,9	3,9	0,44	0,42
	115-125	21,3	28,8	50,3	48,6	14,4	11,0	6,6	5,1	2,9	2,3	4,4	4,2	0,46	0,43
	125-135	19,3	28,2	48,9	48,9	17,1	11,2	7,7	5,2	3,2	2,5	3,8	4,0	0,46	0,43
	135-145	17,7	29,1	47,9	48,0	18,0	11,1	8,4	5,0	3,7	2,4	4,3	4,4	0,48	0,43
145-155	15,7	27,3	48,9	48,2	17,9	11,4	8,6	5,3	3,7	2,7	5,1	5,1	0,50	0,45	

ziell, zum Teil auch signifikant höher als nach Rs1. Der Wurzeldurchmesser war auch beim Winterraps nach Ww2 (0,40–0,50 mm) höher als nach Rs1 (0,37–0,45 mm). Nach beiden Vorfrucht-Varianten wurde eine leichte Zunahme mit zunehmender Bodentiefe festgestellt.

Die Wurzeldurchmesser des Winterraps in den Versuchsjahren 2011 und 2012 unterschieden sich deutlich. Der Winterraps wies im Versuchsjahr 2011 mit 0,39 bis 0,45 mm höhere Wurzeldurchmesser als im Versuchsjahr 2012 (0,17–0,31 mm) auf, wobei die niedrigeren Werte aus dem Jahr 2012 besser zu den aus der Literatur bekannten Werten passen (PIETOLA & ALAKUKKU 2005). Im Vergleich mit Wintergerste 2011 waren die Wurzeldurchmesser nur geringfügig niedriger. Eine mögliche Fehlerquelle bei der Erfassung der Durchmesser ist die Veränderung des Schwellenwerts bei der Analyse der eingescannten Wurzeln. Sind bei der Analyse nicht ausreichend viele feine Wurzeln erfasst worden, kann der Schwellenwert manuell angepasst werden. Dies hat zur Folge, dass auch hellere Grautöne als Wurzel klassifiziert werden. Gleichzeitig steigt der Durchmesser der Wurzeln, die bereits mit einem höheren Schwellenwert aus der vorherigen Einstellung erkannt wurden. Möglicherweise ist dies der Grund für die Unterschiede zwischen den Werten aus den zwei Versuchsjahren 2011 und 2012, in denen der Raps untersucht wurde.

Trotz der höheren mittleren Durchmesser von Winterraps im Versuchsjahr 2011 war der Feinwurzelanteil mit Durchmessern von 0 bis 0,2 mm höher (15,7–32,8 %) als bei Wintergerste (8,7–24,3 %). In der Durchmesserklasse >1 mm wurden geringfügig höhere mittlere Anteile bei Winterraps (1,9–5,1 %) als bei Wintergerste (2,8–4,6 %) festgestellt, die möglicherweise auf das allorhize Wurzelsystem des Winterraps zurückzuführen sind. Die Wurzeldurchmesser beider Kulturen wurden in gleicher Weise von der Vorfrucht-Variante beeinflusst. In der kleinsten Durchmesserklasse war die relative Wurzellänge in allen Bodentiefen nach Rs1 meist signifikant höher (Tab. 18, S. 75). Dies weist darauf hin, dass die intensive Durchwurzelung des Rohrschwingels, der einen mittleren Wurzeldurchmesser von 0,3 mm aufwies, ein feines Porennetz im Unterboden hinterlassen hat. Bestärkt wird diese Annahme durch ein etwas höheres Porenvolumen, die reduzierte Lagerungsdichte und die höhere Luftkapazität in Rohrschwingel-Varianten (vgl. PERKONS et al. 2014). Diese Bedingungen waren potentiell von Vorteil für das Wurzelwachstum besonders feiner Wurzeln. Dem steht die Tatsache gegenüber, dass die beschriebenen Effekte auch in Bodentiefen gezeigt wurden, die unterhalb der Durchwurzelungstiefe von 80 cm des einjährigen Rohrschwingels lagen.

In den Wurzeldurchmesserklassen von 0,2–1 mm wurden dagegen eine höhere relative WL sowie höhere mittlere Wurzeldurchmesser von Wintergerste und Winterraps (2011) nach Ww2 festgestellt. Poren mit einem Durchmesser > 2 mm sind deutlich größer als der Wurzeldurchmesser, so dass die Wurzel in diesen Poren keinen Widerstand erfährt und räumlich nicht eingeschränkt ist. Daher sind die Wurzeldurchmesser hier möglicherweise höher als in engen Bodenrissen, in denen Wurzeln oft verformt oder abgeplättet sind, um sich dem vorhandenen Raum anzupassen (WHITE & KIRKEGAARD 2010).

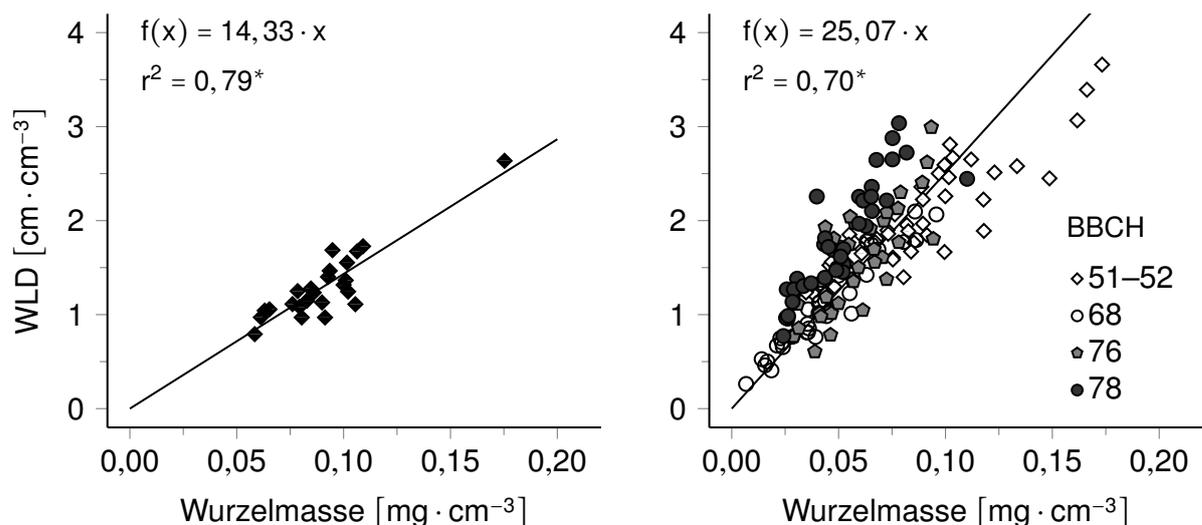
Es lässt sich zusammenfassend feststellen, dass die bekannten Charakteristika hinsichtlich des Wurzeldurchmessers der untersuchten Kulturen durch die vorliegenden Ergebnisse bestätigt

werden. Nach Rs1-Vorfrucht wurden bei Gerste und Raps mehr besonders feine Wurzeln festgestellt. In allen Wurzel Durchmesserklassen über 0,2 mm war dagegen die relative WL nach Ww2-Vorfrucht erhöht. Dieses Ergebnis wurde auch durch weitere Untersuchungen in Versuch B bestätigt (HAN et al. 2016).

### 3.B.4. Wurzelmasse

In allen Versuchsjahren zeigte sich ein linearer Zusammenhang zwischen Wurzellängendichte (WLD) und Wurzelmasse. Im ersten Versuchsjahr 2010 war die Korrelation mit  $r^2=0,56$  vergleichsweise gering (nicht dargestellt). Demgegenüber bestand in den Jahren 2011 und 2012 mit  $r^2=0,79$  und  $r^2=0,70$  ein engerer Zusammenhang (Abb. 31).

Mithilfe der aufgestellten Regressionsgleichung kann in Zukunft aufgrund der mit der Monolithmethode ermittelten WLD von Wintergerste und Winterraps die Wurzelmasse geschätzt werden. Dabei muss darauf geachtet werden, die gleichen Methoden zur Entnahme und Aufbereitung der Monolithe zu verwenden. Besonders entscheidend ist die Maschenweite des Siebes. Wird beispielsweise ein gröberes Sieb verwendet, kann die erhobene Wurzellängendichte erheblich sinken, während der Einfluss auf das Wurzelgewicht gering ist (AMATO & PARDO 1994). Eine Verringerung des Probennahmenvolumens kann zu einer starken Unterschätzung der Wurzelbiomasse führen (PING et al. 2010).



**Abb. 31: Beziehung zwischen der Wurzellängendichte (WLD) und der Wurzelmasse von Wintergerste (links, BBCH 89–92: 08.07.2011) und Winterraps (rechts, BBCH 51–52: 28.03.2012, BBCH 68: 09.05.2012, BBCH 76: 23.05.2012 und BBCH 78: 01.06.2012). Monolithmethode. Bestimmtheitsmaß nach Pearson ( $r^2$ ). Signifikanter Zusammenhang (\*) bei  $\alpha=0,01$ .**

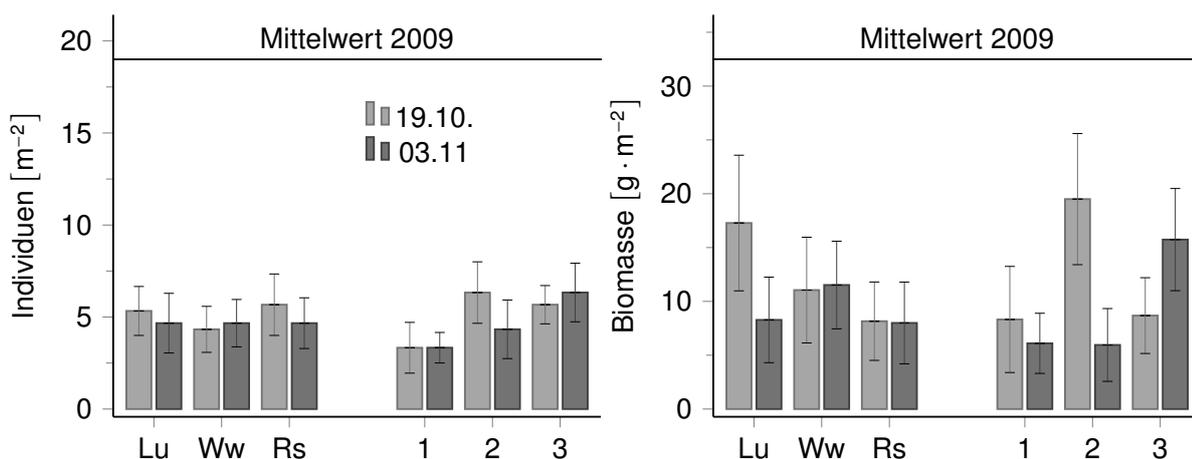
### 3.B.5. Regenwürmer

Die Abundanz und Biomasse von *Lumbricus terrestris* wurden im Versuch A am 19.10.2010 und am 03.11.2010 nach der Einsaat von Wintergerste (07.10.2010) bestimmt. Die Daten weisen aufgrund der sehr geringen Individuenanzahl keine Normalverteilung auf, so dass auf eine statistische Auswertung verzichtet wurde.

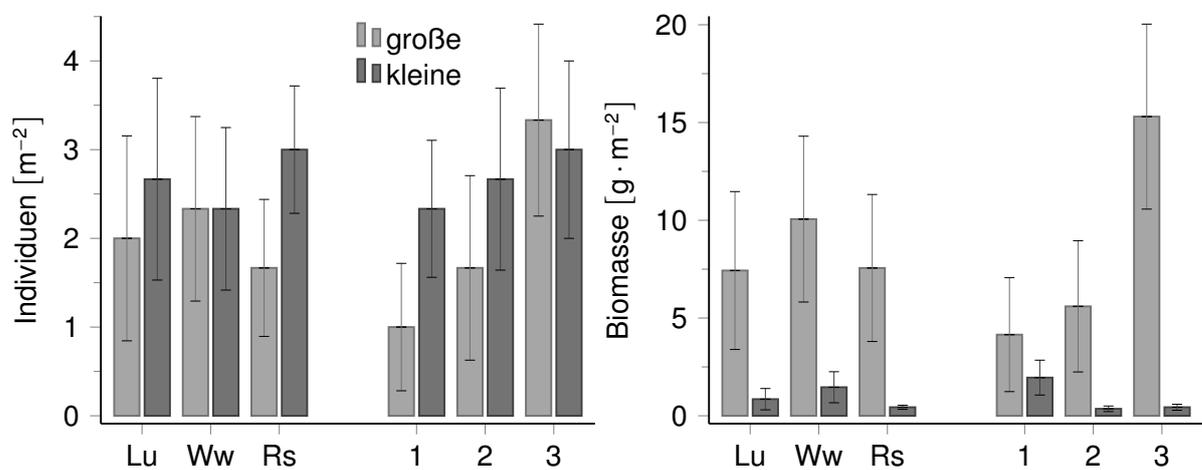
Der Umbruch der Vorfrüchte nach ein- bis dreijähriger Bodenruhe mit anschließender Bodenbearbeitung und Saatbettbereitung reduzierte die Abundanz und die Biomasse der Regenwürmer im Vergleich zur Vorfruchtphase stark (Abb. 32). Es wurden lediglich 5,1 und 4,7 Ind. $\cdot$ m<sup>-2</sup> und eine Biomasse von 12,2 und 9,3 g $\cdot$ m<sup>-2</sup> festgestellt, während zum Ende der Vorfruchtphase im Mittel noch etwa 19 Ind. $\cdot$ m<sup>-2</sup> und 32 g $\cdot$ m<sup>-2</sup> erhoben wurden. Die starke Dezimierung einer Population durch Bodenbearbeitung ist aus der Literatur bekannt (CURRY et al. 2002, PEIGNÉ et al. 2009, ROGER-ESTRADE et al. 2010, KOTCON 2011).

Trotz der niedrigen Abundanz nach der Bodenbearbeitung war der positive Effekt der vorhergehenden Bodenruhe bei der Aufschlüsselung nach großen und kleinen Individuen auf einem niedrigen, statistisch nicht abgesicherten Niveau noch festzustellen (Abb. 33). Die Biomasse der großen Individuen wurde positiv von der Bodenruhe beeinflusst, während die Biomasse der kleinen Individuen nach einjährigem Anbau höher war als nach zwei- und dreijährigem Anbau. Es muss also davon ausgegangen werden, dass die einmalige Bodenruhe nur eine geringe langfristige Wirkung auf die Population hat. Eine Fruchtfolge mit vermehrter Bodenruhe kann die Regenwurmpopulation jedoch langfristig stärken (CHAN 2001).

Die festgestellte Regenwurm-Abundanz war zu niedrig, um neue Poren zu schaffen. Dennoch können die vorhandenen Regenwürmer Einfluss auf die Porenqualität nehmen.



**Abb. 32: Abundanz (links) und Biomasse (rechts) von *Lumbricus terrestris* in Abhängigkeit von der Kulturart (Lu: Luzerne, Ww: Wegwarte, Rs: Rohrschwengel, jeweils über die Anbaudauer gemittelt) und der Anbaudauer (ein-, zwei- und dreijähriger Anbau, jeweils über die Kulturart gemittelt). Versuch A, 19.10.2010 und 03.11.2010. Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar.**



**Abb. 33: Abundanz (links) und Biomasse (rechts) von *Lumbricus terrestris*** in Abhängigkeit von der Kulturart (Lu: Luzerne, Ww: Wegwarte, Rs: Rohrschwengel, jeweils über die Anbaudauer gemittelt) und der Anbaudauer (ein-, zwei- und dreijähriger Anbau, jeweils über die Kulturart gemittelt). Aufgeschlüsselt nach großen ( $> 2$  g) und kleinen ( $< 2$  g). Versuch A, 03.11.2010. Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar.

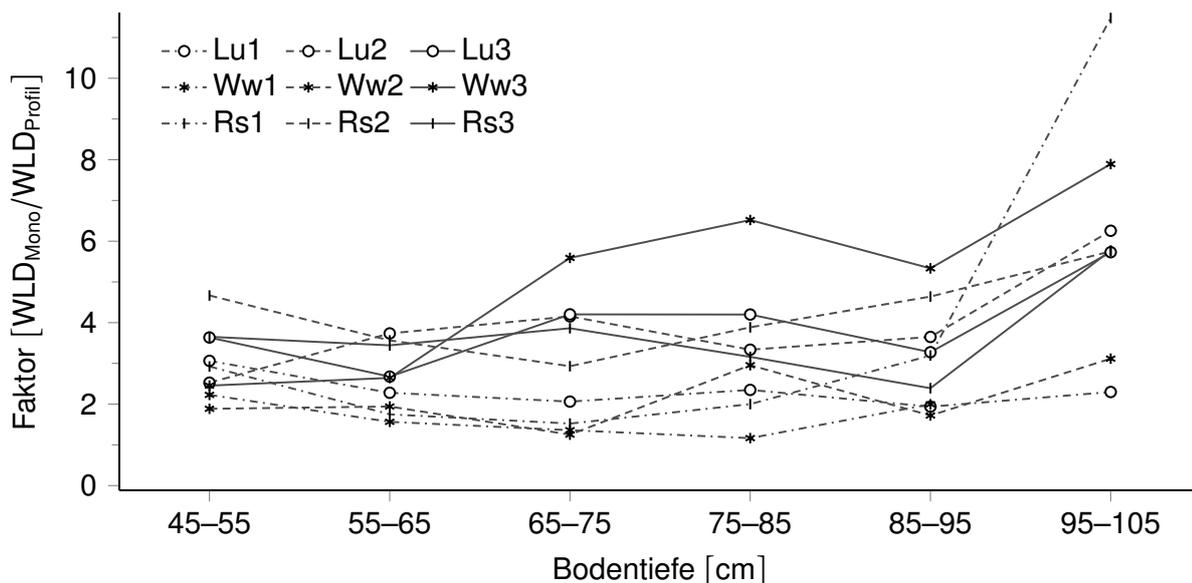
### 3.C. Methodenkritik

Dieser Abschnitt enthält eine kritische Betrachtung der Methoden, mit denen die Ergebnisse für diese Arbeit erhoben wurden. Dazu zählen die Profilwand- und die Monolithmethode zur Erhebung des Wurzelwachstums von Vor- und Nachfrüchten. Desweiteren wird die Färbemonolithmethode begutachtet, die eine Erweiterung der Monolithmethode ist. Sie wurde verwendet, um Wurzeln aus Bioporen und *bulk*-Boden zu differenzieren. Schließlich wird das Vorgehen zur Erfassung der Bioporendichte betrachtet.

#### 3.C.1. Profilwand- und Monolithmethode

Mit der Profilwandmethode werden in der Regel geringere Wurzelichten festgestellt als mit der Monolithmethode (KÖPKE 1979). Daher wurde das Wurzelwachstum im Versuch zusätzlich zu einigen Untersuchungsterminen und Bodentiefen auch mit der Monolithmethode untersucht.

Ergänzend zur Erhebung der WLD der Vorfrüchte an der Profilwand wurde in der vierten Feldwiederholung die WLD in der Bodentiefe von 45 bis 105 cm mit der Monolithmethode erfasst. Zur Kalibrierung der Profilwanddaten wurde ein Umrechnungsfaktor bestimmt. Der Einfluss der Variante auf den Umrechnungsfaktor in Abhängigkeit von der Bodentiefe ist in Abb. 34 dargestellt. Mit der Profilwandmethode wurde die tatsächliche WLD zum Teil deutlich unterschätzt, so dass eine breite Streuung der Faktoren (1,2 bis 11,5) ermittelt wurde. In der Tiefenstufe 105 cm waren die Faktoren mit Ausnahme der Varianten Lu1 und Ww2 deutlich



**Abb. 34:** Faktor zur Umrechnung der Wurzellängendichte (WLD) der Vorfrüchte von der Profilwandmethode ( $\text{WLD}_{\text{Profil}}$ ) in die Monolithmethode ( $\text{WLD}_{\text{Mono}}$ ) in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der Vorfrucht-Variante (jeweils ein-, zwei- und dreijähriger Anbau von Luzerne (Lu), Wegwarte (Ww) und Rohrschwengel (Rs)). Versuch B, 19.09.2011–29.09.2011.

höher als in den darüberliegenden Bodenschichten.

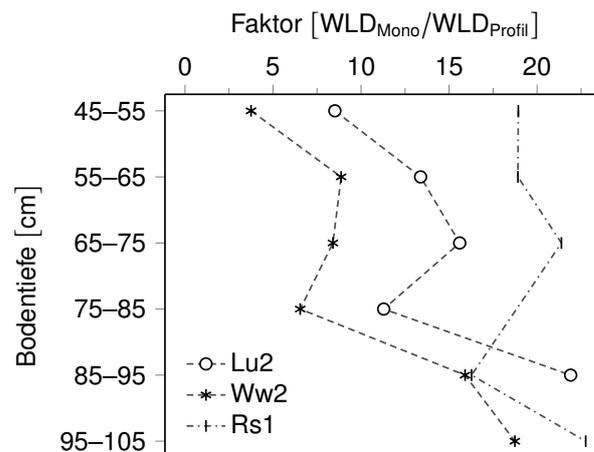
Die Profilwandmethode ist dafür bekannt, die Wurzellängendichte (WLD) zu unterschätzen. Gründe dafür sind der Verlust von Wurzeln beim Vorbereiten der Wand und das Zusammenkleben von Wurzeln durch Wasser, so dass beim Schätzen diese Wurzeln nicht bzw. nicht vollständig erfasst werden (KÖPKE 1981, ATKINSON & DAWSON 2000). Im vorliegenden Versuch war die mit der Profilwandmethode geschätzte WLD immer niedriger als die mit der Monolithmethode ermittelte WLD. Die Umrechnungsfaktoren waren zum Teil deutlich höher als die aus der Literatur bekannten. Beispielsweise nennt KÖPKE (1979) einen Umrechnungsfaktor von 2,06.

Die Umrechnungsfaktoren für die mit der Profilwand geschätzte WLD der Vorfrüchte war bei der Variante Ww3 zwischen 65 und 105 cm besonders hoch. Es ist von einer starken Unterschätzung der WLD an der Profilwand auszugehen, da für diesen Untersuchungstermin in der entsprechenden Parzelle ein besonders dichter Bt-Horizont vorlag. Aufgrund des sehr harten Bodens wurde vermutlich zu wenig Material weggespült und in der Folge zu wenige Wurzeln freigelegt. Der Umrechnungsfaktor von 11,5 für Rs1 in 95–105 cm Bodentiefe kann als Ausreißer betrachtet werden, da alle anderen ermittelten Werte deutlich niedriger waren. Zudem wurde die Kalibrierung nur für eine Feldwiederholung durchgeführt, so dass auch die räumliche Heterogenität der Bodenverhältnisse eine Rolle gespielt haben kann.

Die Umrechnungsfaktoren der einjährigen Vorfrüchte betragen zwischen 1,7 und 2,3 (Abb. 34, S. 80) und lagen im gleichen Wertebereich wie Ergebnisse von KÖPKE (1979). Dagegen waren die Umrechnungsfaktoren für die zwei- und dreijährig angebauten Vorfruchtarten, mit Ausnahme von Ww2, nahezu doppelt so hoch (Lu: 3,9–4,0; Ww: 2,1–5,1 und Rs: 4,2–3,7). Bei mehrjährig wachsenden Pflanzen ist zu erwarten, dass einige der Wurzeln zum Untersuchungszeitpunkt bereits abgestorben waren. Die Trennung von Alt- und Frischwurzeln ist eine große Fehlerquellen bei der Monolithmethode (WATT et al. 2008, WHITE & KIRKEGAARD 2010). An der Profilwand gelang die Unterscheidung von Alt- und Frischwurzeln dagegen möglicherweise präziser als mit der Monolithmethode, so dass es bei den Monolithproben zu einer Überschätzung der WLD durch die Einbeziehung bereits abgestorbener Wurzeln kam. Nach wie vor kann der Mensch besser als technische Verfahren lebende von toten Wurzeln unterscheiden (BENJAMIN & NIELSEN 2004). Trotzdem ist ein Bearbeitereffekt nicht auszuschließen, da aufgrund des großen Probenaufkommens auch in größeren Teams gearbeitet wurde. Eine weitere Fehlerquelle bei der Monolithmethode ist die Maschenweite des verwendeten Siebs. Mit geringerer Maschenweite reduzieren sich die Verluste an Wurzeln, was aber mit einem erhöhten Arbeitsaufwand einhergeht.

Im Jahr 2010 wurden zu einem Untersuchungstermin von Sommerweizen sowohl Profilwandmethode als auch Monolithmethode angewendet. Die Umrechnungsfaktoren sind in Abb. 35 in Abhängigkeit von der Bodentiefe dargestellt. Die Faktoren der Varianten unterschieden sich deutlich. Zwischen 45 und 85 cm Bodentiefe waren sie nach Ww2 am niedrigsten (3,8–8,9) und nach Rs1 (18,9–21,4) am höchsten, während die Faktoren nach Lu2 (8,5–15,6) eine mittlere Stellung einnahmen. Unterhalb von 85 cm Bodentiefe stieg der Umrechnungsfaktor

### 3. Ergebnisse und Diskussion



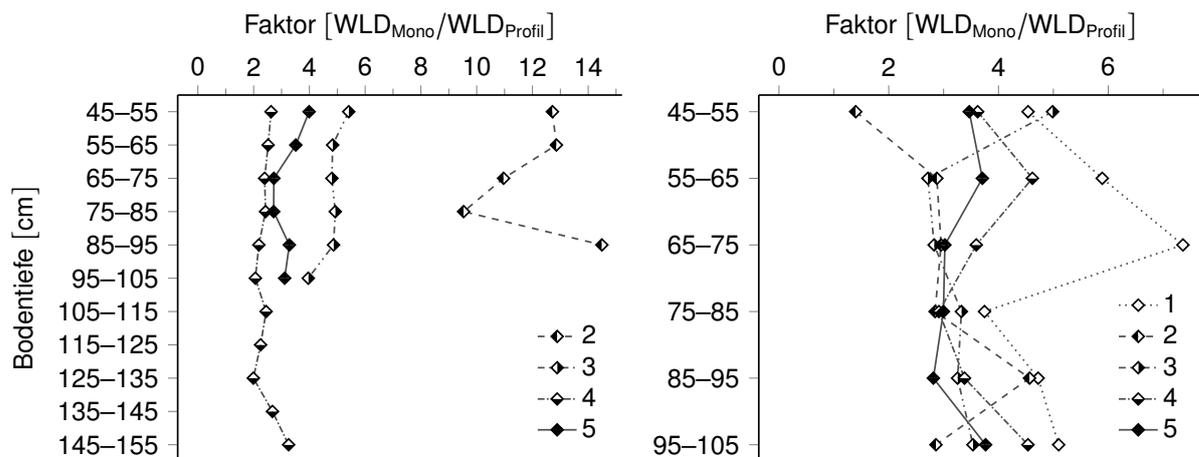
**Abb. 35: Faktor zur Umrechnung der Wurzellängendichte (WLD) von Sommerweizen von der Profilwandmethode ( $\text{WLD}_{\text{Profil}}$ ) in die Monolithmethode ( $\text{WLD}_{\text{Mono}}$ ) in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der Vorfrucht-Variante (Lu2: zweijähriger Luzerneanbau, Ww2: zweijähriger Wegwarte anbau, Rs1: einjähriger Rohrschwingelanbau). Versuch A. Profilwandmethode: 27.–30.07.2010. Monolithmethode: 03.–05.08.2010.**

nach Lu2 und Ww2 deutlich an.

Im ersten Nachfruchtjahr (2010) bestanden im Gegensatz zur Erhebung im Versuchsjahr 2011 erhebliche Variantenunterschiede bei der nur zu einem Untersuchungstermin durchgeführten Kalibrierung. Zusätzlich zu der Schwierigkeit, Alt- und Frischwurzeln richtig voneinander zu trennen, mussten auch Wurzeln der Vorfrüchte treffsicher entfernt werden. Da erst im Frühjahr 2010 der Umbruch der Vorfrüchte stattfand, waren ihre Wurzeln im Boden zum Teil noch nicht abgestorben. Dadurch wurde die WLD nach Rs1 vermutlich stärker überschätzt als nach Ww2 und Lu2, da Getreidewurzeln einfacher von Wegwarte- als von Rohrschwingelwurzeln unterschieden werden können (vgl. PERKONS et al. 2014).

Dieses methodische Problem entfiel bei einer zweijährigen Brache zwischen Vor- und Nachfruchtphase. Außerdem stünden alle durch Wurzeln geschaffenen Poren für die Nachfrüchte zur Verfügung, da die Wurzeln der Vorfrucht bis dahin weitgehend abgebaut wären. Eine interessante Alternative zur manuellen Sortierung von Wurzeln verschiedener Arten stellt die Infrarot-Spektroskopie dar. Nach eingehender Eichung kann mit ihrer Hilfe ohne eine manuelle Sortierung der Anteil einzelner Arten in der Gesamtprobe quantifiziert werden (NAUMANN et al. 2010, REWALD et al. 2012).

Im Jahr 2011 wurden ebenfalls beide Methoden zur Bestimmung der WLD von Wintergerste nach Ww2 zu vier Untersuchungsterminen angewendet (Abb. 36, links). Zum 4. Untersuchungstermin wurde zusätzlich auch Wintergerste nach Rs1 bis in 155 cm Bodentiefe untersucht. Da zu diesem Untersuchungstermin keine Variantenunterschiede auftraten, sind diese nicht differenziert dargestellt. Der früheste Untersuchungstermin wies im Vergleich zu den anderen Untersuchungsterminen sehr hohe Umrechnungsfaktoren (9,5–14,5) auf. Alle anderen Untersuchungstermine wiesen Umrechnungsfaktoren zwischen 2 und 6 auf, wobei die niedrigsten Werte zu Untersuchungstermin 4 (2,0–3,3) festgestellt wurden. Im Unterschied zu



**Abb. 36: Faktor zur Umrechnung der Wurzellängendichte (WLD) von Wintergerste 2011 (links) und Winterraps 2012 (rechts) von der Profilwandmethode (WLD<sub>Profil</sub>) in die Monolithmethode (WLD<sub>Mono</sub>) in Abhängigkeit von der Bodentiefe und dem Untersuchungstermin. Die Vorfrucht-Variante war jeweils zweijähriger Wegweideanbau (Ww2). Versuch A. Die Untersuchungstermine sind Anhang-Tab. 4 zu entnehmen.**

2010 war der Einfluss der Bodentiefe auf den Umrechnungsfaktor relativ gering. Zum zweiten Untersuchungstermin stieg der Faktor in der letzten untersuchten Bodentiefe (85–95 cm) an. Auch bei der Beprobung bis in 155 cm Bodentiefe stieg der Umrechnungsfaktor in den Bodentiefen unterhalb von 135 cm an.

Im Jahr 2012 unterschieden sich die Faktoren der einzelnen Untersuchungstermine von Winterraps nur geringfügig voneinander (Abb. 36, rechts). Es wurden Umrechnungsfaktoren zwischen 1,4 und 7,4 errechnet. Wie im Jahr zuvor wies der erste Untersuchungstermin die höchsten Faktoren auf (3,7–7,4). Die geringste Änderung des Umrechnungsfaktors mit der Bodentiefe wies der 5. Untersuchungstermin mit Werten zwischen 2,8 und 3,8 auf. Zu vier Untersuchungsterminen stieg der Umrechnungsfaktor in der letzten untersuchten Bodentiefe (95–105 cm) an.

Die Umrechnungsfaktoren aller Vorfrucht-Varianten stiegen in der Bodentiefe 95–105 cm (Abb. 34, S. 80), was sich auch in der Nachfruchtphase an einigen Terminen beobachten ließ (Abb. 35 und 36). Da der C-Horizont in etwa in dieser Tiefe beginnt und der Löss eine viel hellere Farbe als der tonangereicherte Bt-Horizont hat, kann vermutet werden, dass helle, fast durchsichtige Wurzeln auf diesem Hintergrund leichter übersehen werden. Bei einer niedrigen Durchwurzelung wird die WLD mit der Profilwandmethode aufgrund des geringen untersuchten Volumens stärker unterschätzt. Eine Beeinflussung der Umrechnungsfaktoren durch bodenphysikalische Bedingungen wird auch von ATKINSON & DAWSON (2000) beschrieben.

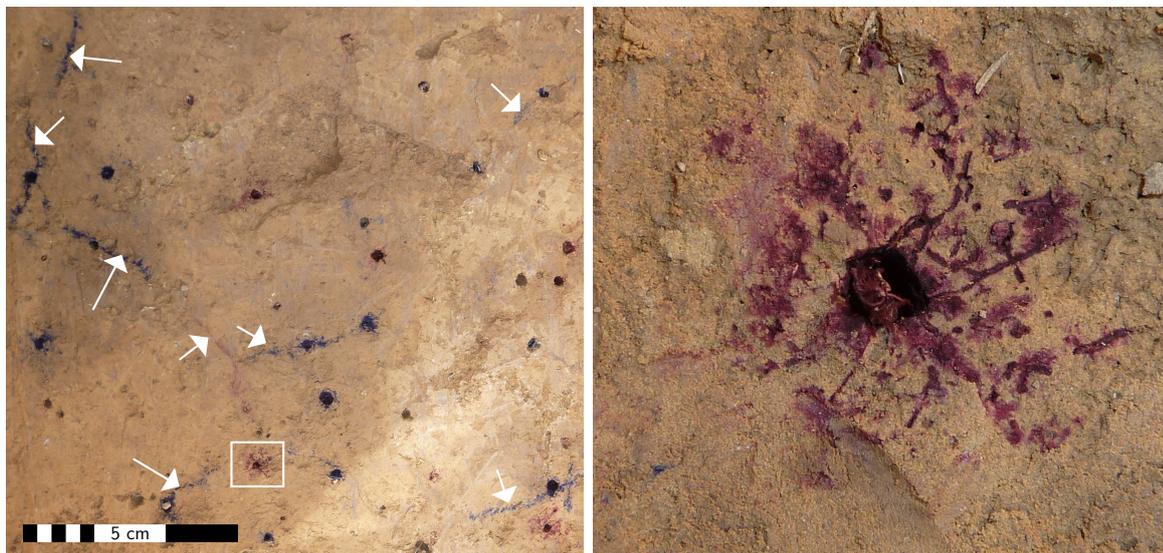
Ebenfalls auffällig ist, dass zu frühen Untersuchungsterminen bis zu doppelt so hohe Umrechnungsfaktoren bestimmt wurden wie zu späteren Terminen. Diese Beobachtung wurde auch von KÖPKE (1979) beschrieben und auf die geringe Wurzelverteilung zurückgeführt. Ein starker Einfluss des Beprobungszeitpunktes auf den Umrechnungsfaktor wurde auch bei Zuckerrüben festgestellt, so dass die Verwendung

eines mittleren Umrechnungsfaktors von GÄTH & MEUSER (1989) nicht empfohlen wird.

#### 3.C.2. Färbemonolithmethode

Bei Anwendung der Färbemonolithmethode wurde festgestellt, dass die Färbelösung auch in angrenzende Bodenrisse und in verbundene Feinporen gelangt (Abb. 37). Bodenrisse sind oft direkt mit Bioporen verbunden und häufiger als bei zufälliger Verteilung erwartet in der Nähe von Regenwurmröhren anzutreffen (CHADŒUF et al. 1994). Dass eine Verbindung von Bioporen größer 2 mm mit einem Feinporensystem besteht, wurde in Proben aus dem untersuchten Feldversuch mittels Röntgen-Computertomographie bestätigt (PAGENKEMPER et al. 2013). Das Feinporensystem wurde in dieser Arbeit nicht näher untersucht, da die angewandten Methoden auf die Untersuchung von Makroporen ausgelegt sind und keine ausreichende Auflösung erreichen.

Es ist also davon auszugehen, dass die Färbemonolithmethode die Wurzellängendichte in Bioporen überschätzt. Für Wintergerste wurde in drei Tiefenstufen eine arbeitsintensive manuelle Beerntung der Bioporen von 45 bis 75 cm Bodentiefe durchgeführt (KAUTZ et al. 2013b). Die Wiederholungen in einer Tiefenstufe entsprachen dabei der Größe der Färbemonolithen. Wurzeln aus Bioporen und *bulk*-Boden wurden getrennt gescannt. Die erhobenen Anteile an Wurzeln in Bioporen waren mit 6,6 bis 12,1 % deutlich geringer als bei der Färbemonolithmethode (13,9 bis 26,2 %). Demgegenüber ergab der Vergleich von Profilwandmethode und manueller Beerntung ähnliche Anteile, wobei die absoluten Werte



**Abb. 37: Aufsicht auf eine für die Erfassung der Bioporendichte vorbereitete Fläche in 105 cm Bodentiefe (links).** Die Bioporen wurden durch die Anwendung der Färbemonolithmethode mit Methylenblau und Neutralrot angefärbt. Pfeile markieren Bodenrisse. Die umrandete Biopore mit einem Durchmesser von etwa 0,5 mm wird (rechts) als Nahaufnahme gezeigt. 12.07.2011, Färbemonolithmethode. Parzelle 76, Vorfrucht-Variante Ww2 (zweijähriger Wegwarteanbau).

bei der Profilwandmethode niedriger waren. Dieser Sachverhalt lässt sich damit begründen, dass bei beiden Methoden trennscharf zwischen Biopore und *bulk*-Boden oder angrenzendem Feinporensystem unterschieden werden kann (KAUTZ et al. 2013b). Eine derartige Trennung ist mit der Färbemonolithmethode nicht möglich. Die Überschätzung der WLD in Bioporen erfolgt daher zu Lasten der WLD im *bulk*-Boden, so dass mit der Färbemonolithmethode auch mit Bioporen assoziierte Wurzeln erfasst werden. Zusätzlich konnte aufgrund der Färbung der Wurzeln keine Differenzierung von Alt- und Frischwurzeln vorgenommen werden. Auch dieser Aspekt trägt zu einer Überschätzung der WLD in Bioporen und im *bulk*-Boden bei.

### 3.C.3. Erfassung der Bioporen

Der Vergleich von Bioporendichten aus unterschiedlichen Jahren gestaltet sich oft schwierig. Dies liegt unter anderem daran, dass der Zustand des Bodens zum Erhebungszeitpunkt einen großen Einfluss hat. Bei feuchten Bodenbedingungen kann es passieren, dass Poren verschmieren und nicht aufgefunden werden. Eine Abhilfe stellt die von EHLERS et al. (1983) beschriebene Trocknung der Erdoberfläche mit einer Gasflamme dar. Weiterhin sind Poren nicht dauerhaft stabil, so dass sie kollabieren oder ihren Durchmesser ändern können (MCCALLUM et al. 2004). Desweiteren kann ein Bearbeitereffekt auftreten, so dass es von Vorteil ist, wenn die Daten zum Vergleich der Bioporendichte verschiedener Jahre von derselben Person erhoben werden. Die Methode zur Freilegung von Bioporen ist hingegen gut geeignet, um Unterschiede zwischen Varianten innerhalb eines Jahres zu bestimmen.

Auch durch lückige Bestände kann es trotz gleicher Bewirtschaftung zu einer heterogenen Verteilung der Bioporen kommen. Deswegen ist es trotz der Unsicherheiten beim Vergleich von Daten aus verschiedenen Jahren von Vorteil, die Ausgangsbioporendichte vor Versuchsbeginn zu erfassen, um sichere Aussagen über die Bioporengese treffen zu können.

## 4. Generaldiskussion

Insbesondere im Organischen Landbau ist die Fruchtfolgeplanung von zentraler Bedeutung bei der Organisation des landwirtschaftlichen Betriebs (KÖNNECKE 1967, KAHNT & KÖPKE 1997). Der Einfluss der Vorfrucht auf nachfolgende Kulturen ist sehr vielfältig und reicht beispielsweise von der Veränderung der Nährstoff- und Wasserverfügbarkeit sowie des Bodengefüges bis zu phytosanitären und allelopathischen Effekten (KIRKEGAARD et al. 2008). In der vorliegenden Arbeit wurde ein Fruchtfolgeabschnitt untersucht, der den ein- und mehrjährigen Anbau von homo- und allorhizen Futterpflanzen und den darauf folgenden Nachfrüchten umfasste. In der Vorfruchtphase lag der Fokus auf der Vorfruchtwirkung der Futterpflanzen hinsichtlich des Bodengefüges, wobei der Aspekt der Bioporengese im Vordergrund stand. Zunächst wurde dazu das Wurzelsystem der Vorfrüchte untersucht, um ihr Potential zur Bioporengese abzuschätzen. Außerdem wurde die Bioporendichte bestimmt. Anschließend wurde dann in der Nachfruchtphase die Reaktion der Nachfrüchte auf das geänderte Bodengefüge untersucht. Im Folgenden werden die Ergebnisse aus dem vorhergehenden Kapitel anhand der zu Beginn der Arbeit aufgestellten Arbeitshypothesen eingeordnet.

Zunächst kann übergreifend festgestellt werden, dass grundlegende Erkenntnisse über das Wurzelwachstum im eigenen Versuch bestätigt werden konnten. Die Zone mit der intensivsten Durchwurzelung war der Oberboden (Ap-Horizont) von 0 bis 30 cm Bodentiefe. Der Anteil des Wurzelsystems im Ap-Horizont nahm bei allen Kulturen trotz steigender absoluter Wurzellängendichte (WLD) im Zeitverlauf ab. Dieser Sachverhalt ist auf die Erschließung der Bodentiefen unterhalb von 30 cm mit fortschreitender Pflanzenentwicklung zurückzuführen. Die Zunahme der WLD erfolgte in allen Bodentiefen und war bei Wintergerste stark und bei Winterraps gering ausgeprägt. Die WLD aller Kulturen nahm erwartungsgemäß und in Übereinstimmung mit allen vorliegenden Literaturquellen mit der Bodentiefe ab (KLÄSENER 1924, KIRBY & RACKHAM 1971, HAMBLIN & TENNANT 1987, BARRACLOUGH et al. 1989, THORUP-KRISTENSEN 2006, KUTSCHERA et al. 2009).

Nach **Hypothese H1** wurden Unterschiede hinsichtlich Wurzellängendichte, Wurzeldurchmesser und Durchwurzelungstiefe der im Versuch angebauten Futterpflanzenarten Luzerne (Lu), Wegwarte (Ww) und Rohrschwengel (Rs) erwartet. Es wurde ebenfalls von einem positiven Einfluss auf die genannten Parameter bei einer Steigerung der Anbaudauer ausgegangen. Homorhize (Rs) und allorhize (Lu, Ww) Wurzelsysteme ließen sich deutlich voneinander unterscheiden, während die Unterschiede zwischen den allorhizen Vorfrüchten nur gering ausgeprägt waren. Mehrjähriger Anbau führte im Vergleich zur einjährigen Kultur zu einer Zunahme der genannten Parameter. Eine Differenzierung zwischen zwei- und dreijährigem Anbau war dagegen nicht möglich. Bei mehrjähriger Kultur wurde eine höhere WLD sowie eine gesteigerte Durchwurzelungstiefe der Vorfrüchte festgestellt. Durch signifikante Effekte von Vorfruchtart und Anbaudauer auf die Durchwurzelung der Vorfrüchte war im Versuch die

---

Grundvoraussetzung für eine differenzierte Prägung des Bodens gegeben.

Laut **Hypothese H2** ist die Bioporendichte eine Funktion der angebauten Futterpflanzenart und nimmt mit zunehmender Anbaudauer der Futterpflanzen zu. Ein Einfluss der Futterpflanzenart auf die Bioporendichte konnte bestätigt werden, da nach Ww in allen Porengrößenklassen die höchste Bioporendichte ermittelt wurde. Die Vorfrüchte Lu und Rs ergaben wesentlich geringere Bioporendichten. Pfahlwurzeln der Wegwarte waren im Versuch in der Lage, Poren zu generieren oder bestehende Poren zu stabilisieren. Die Genese von Poren durch Pflanzenwurzeln wurde in zahlreichen Gefäß- und Feldversuchen belegt (BLACKWELL et al. 1990, DREESMANN 1994, MCCALLUM et al. 2004, NUTTALL et al. 2008). Der Effekt der Anbaudauer auf die Bioporendichte war nicht deutlich genug, um die Hypothese zu bestätigen.

Es wurde davon ausgegangen, dass die Futterpflanzenart die Abundanz und Biomasse anösischer Regenwürmer beeinflusst (**Hypothese H3 a**). Dies konnte im Versuch nur zu einem von sieben Untersuchungsterminen festgestellt werden, so dass Hypothese H3 a abgelehnt werden muss. Gemäß **Hypothese H3 b** gab es einen signifikanten Einfluss der Anbaudauer auf die Regenwurmpopulation. Eine mehrjährige Bodenruhe in Kombination mit Futterverfügbarkeit förderte sowohl die Abundanz als auch die Biomasse von *Lumbricus terrestris* in der Vorfruchtphase. Bei diesen Untersuchungen unterschieden sich zwei- und dreijähriger Anbau, mit Ausnahme eines Untersuchungstermins, nicht voneinander. Sowohl die Abundanz juveniler als auch adulter Individuen wurde signifikant erhöht, wobei der Anstieg der juvenilen Exemplare besonders stark war. In Folge der Bodenbearbeitung zum Ende der Vorfruchtphase wurde die Population jedoch stark dezimiert, bevor die geförderten juvenilen Regenwürmer geschlechtsreif wurden. Erst bei einer länger anhaltenden Bodenruhe (> 3 Jahre) können sich auch diese Regenwürmer vermehren, so dass in der Folge eine wesentlich stärkere Zunahme der Population zu erwarten ist.

*L. terrestris* besitzt in der Regel nur eine Wohnröhre mit wenigen Verzweigungen im Oberboden. Zudem nutzen juvenile Regenwürmer intensiv bereits vorhandene Röhren (BASTARDIE et al. 2005, KAUTZ et al. 2014). Daher waren die erhobenen Regenwurmabundanzen im Feldversuch insgesamt zu gering (im Mittel 19 Ind. $\cdot$ m<sup>-2</sup> zum Ende der Vorfruchtphase), um die Porenanzahl (im Mittel 292 Poren $\cdot$ m<sup>-2</sup>) signifikant zu steigern. Trotzdem ist von einer Beeinflussung der Qualität der Porenwand auszugehen (LOGSDON & LINDEN 1992, DON et al. 2008). Aufgrund der Nährstoffanreicherung in der Porenwand kann auch eine vorübergehende Förderung der Regenwurmabundanz pflanzenbaulich relevant sein.

Nach **Hypothese H4 a** besteht ein Einfluss der Vorfruchtnutzung auf das Wurzelwachstum der Nachfrüchte. Zu den meisten Untersuchungsterminen wurde die WLD der Nachfrüchte im Oberboden und im oberen Teil des Bt-Horizonts durch einjährigen Rohrschwingelanbau gefördert. Beispielsweise wurde für die Kulturen Sommerweizen, Wintergerste und Winterrap anhand von Profilwand- und Monolithmethode wiederholt eine gesteigerte Durchwurzelung bis in Bodentiefen von 85 cm nach Rs1 festgestellt. Im tieferen Boden wurde insbesondere nach Ww2-Vorfrucht eine höhere WLD festgestellt. Das Wurzelsystem der Futtermalve wurde hingegen sowohl im Oberboden als auch unterhalb von 30 cm Bodentiefe durch Ww2-Vorfrucht

gefördert. Das im Vergleich zu Wegwarte sehr intensive Wurzelwachstum des Rohrschwingels bis in 60 cm Bodentiefe führte zu einer Änderung des Bodengefüges. Dieser Sachverhalt zeigte sich darin, dass in 45 und 60 cm Bodentiefe nach Rs1 eine signifikant höhere Luftkapazität als nach Ww2 gemessen wurde. Außerdem wurde ein leicht erhöhtes Porenvolumen und eine etwas geringere Lagerungsdichte festgestellt (PERKONS et al. 2014). Es ist zu erwarten, dass das veränderte Bodengefüge einen positiven Einfluss auf das Wurzelwachstum ausgeübt hat. Diese Ergebnisse bestätigen Teil a der Hypothese H4.

Die Vorprägung des Bodens durch zweijährigen Wegwarte-Anbau führte mit Ausnahme des Sommerweizens bei allen Nachfruchtkulturen zu höheren Durchwurzelungstiefen. Daher kann **Hypothese H4 b**, dass mit zunehmender Bioporendichte die Durchwurzelungstiefe steigt, angenommen werden. Im Versuch zeigte sich auch, dass die Durchwurzelung von Winterungen tiefer reichte als die der Sommerungen. Winterungen haben eine längere Vegetationsperiode und entwickeln früher als Sommerungen tiefreichende Wurzeln (THORUP-KRISTENSEN et al. 2009). Insbesondere zur Absicherung gegen Trockenheit und zur Stickstoffaufnahme ist es für die Pflanze von Vorteil, früh in der Vegetationsperiode tiefreichende Wurzeln zu bilden (WHITE et al. 2013, LYNCH & WOJCIECHOWSKI 2015). Die Durchwurzelungstiefe ist zur Bestimmung des Wasseraufnahmepotentials der Pflanze ein aussagekräftigeres Maß als die Wurzellängendichte (HAMBLIN & TENNANT 1987, EHLERS et al. 1991). Die Wasserversorgung der Kulturen nach Ww2 wurde somit potentiell positiv beeinflusst.

Mithilfe eines Modellansatzes auf Basis der im Feldversuch gewonnenen Daten zu Bioporendichte und Wurzelwachstum zeigten GAISER et al. (2013), dass Bioporen für Wurzeln wichtig sind, um schnell Bodenhorizonte mit hohen Lagerungsdichten zu durchdringen und so tiefere, feuchte Schichten zu erreichen. Gleichzeitig schützen sie den Boden durch eine erhöhte Infiltration vor Erosion und erhöhen dadurch den Wasservorrat, der wiederum den Pflanzen zur Verfügung steht. Diese Funktionen der Bioporen haben insbesondere im Hinblick auf den Klimawandel Relevanz, da Prognosen für Mitteleuropa eine Zunahme von Wetterextremen wie Trockenperioden und Starkregenereignissen zeigen (GORNALL et al. 2010, HERTEL & BALDOS 2016).

Eine hohe Durchwurzelungstiefe kann auch durch Züchtung und Auswahl von Sorten erreicht werden, die an heterogene Böden angepasst sind. Die Züchtung moderner Sorten ist meist stark auf homogene Böden mit hohen Nährstoffgehalten fokussiert (GROSSMAN & RICE 2012). Diese Fokussierung kann dazu führen, dass die Anpassungsfähigkeit der Pflanzen verloren geht. Im Ökologischen Landbau werden Sorten mit einem tiefreichenden Wurzelsystem benötigt, die in der Lage sind, auch unter ungünstigen oder heterogenen Bodenverhältnissen ausreichend Wasser und Nährstoffe aufzunehmen (LAMMERTS VAN BUEREN et al. 2002). Ein stark ausgebautes Wurzelsystem ist unter wasserlimitierten Bedingungen von Vorteil für den Ertrag, insbesondere, wenn die Pflanze ihren Wasserbedarf hauptsächlich durch Niederschlag deckt. Ist dagegen der Wasservorrat des Bodens die einzige Wasserquelle, kann sich das kräftige Wurzelsystem durch eine Erschöpfung des Wasservorrats vor Vollendung der Kornfüllung nachteilig auswirken (PALTA et al. 2011). Unter mitteleuropäischen Bedingungen ist dieses

---

Szenario allerdings von geringer Bedeutung.

Im Gegensatz zum Oberboden wurde insbesondere unterhalb von 70 cm Bodentiefe meist eine höhere WLD der Nachfrüchte nach Ww2-Vorfrucht beobachtet. Eine Ausnahme war Sommerweizen, dessen Wurzelsystem nicht durch zweijährigen Wegwarteanaubau gefördert wurde. Eine Prägung durch die Vorfrucht Ww2 bis in den tiefen Boden ist möglich, da deren Durchwurzelungstiefe 180 cm Bodentiefe betrug, während bei Rs1 nur 80 cm Bodentiefe erreicht wurden. **Hypothese H4 c**, mit der unterhalb von 45 cm Bodentiefe eine Steigerung der WLD in Varianten mit hoher Bioporendichte angenommen wurde, muss also im Hinblick auf die Bodentiefe korrigiert werden.

Auf Basis der Literatur wurde erwartet, dass der überwiegende Teil der Wurzeln im Unterboden in Bioporen vorliegt sowie eine Zunahme des Wurzelwachstums in Bioporen mit der Bodentiefe erfolgt (**Hypothese H5**). Im Versuch betrug der Anteil der Wurzeln in Bioporen bei homorhizen Kulturen 3 bis 13 % und bei allorhizen Kulturen 5 bis 30 %. Die Besiedelung der Bioporen durch Wurzeln war im Versuch bei einem allorhizen Wurzelsystem deutlich stärker ausgeprägt. Mit *in situ*-Endoskopie wurde beschrieben, dass trotz unterschiedlicher Morphologie der homo- und allorhizen Wurzeln in Bioporen der Anteil der Wurzeln mit Kontakt zur Porenwand identisch war (ATHMANN et al. 2013). Demzufolge sollten Pflanzen mit einem allorhizen Wurzelsystem aufgrund der intensiveren Erschließung der Bioporen stärker von Nährstoffen in der Bioporenwand profitieren können. Die relative WLD in Bioporen nahm mit der Bodentiefe nur bis 120 cm Bodentiefe zu. Der prozentuale Anteil der WLD in Bioporen war demnach vor allem im tiefen Boden geringer als erwartet, so dass Hypothese H5 abgelehnt werden muss. Unter den gegebenen Standortbedingungen wurde das Wurzelwachstum im tiefen Boden hauptsächlich im *bulk*-Boden festgestellt und nicht, wie aus der älteren Literatur bekannt (KÖPKE 1981, EHLERS et al. 1983), vorwiegend in Bioporen. Eine Präferenz der Wurzeln für Bioporen wurde trotzdem festgestellt, da der Wurzelanteil in Bioporen höher war, als bei einer rein zufälligen Verteilung der Wurzeln zu erwarten wäre.

Lediglich zu frühen Untersuchungsterminen wurde bei allen Nachfrüchten eine hohe relative WLD in Bioporen ermittelt. Bei homorhizen Wurzelsystemen wurden über 18 % und bei allorhizen Wurzelsystemen über 40 % der WLD in Bioporen erhoben. HAN et al. (2015b) bestimmte die höchste relative WLD in Bioporen von Sommerweizen ebenfalls zu einem vergleichbaren Entwicklungsstadium. Zu späteren Untersuchungsterminen war der Anteil in Bioporen wie oben beschrieben geringer. Eine bestimmte Bodentiefe wurde demnach zunächst mehrheitlich durch Wurzeln in Bioporen erschlossen. Erst im weiteren Zeitverlauf stieg die WLD im *bulk*-Boden an. Dabei kann der Anstieg der WLD im *bulk*-Boden sowohl auf das langsamere Wurzelwachstum durch den *bulk*-Boden als auch auf das Auswachsen von Wurzeln aus Bioporen zurückzuführen sein.

Je mehr Bioporen vorhanden sind, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine Wurzel auf eine Biopore trifft und damit die absolute WLD in Bioporen steigt. Im Versuch wurde nach Ww2-Vorfrucht sowohl eine höhere Bioporendichte als auch eine höhere WLD in Bioporen als nach Rs1-Vorfrucht festgestellt. Da nach Ww2 für die höhere WLD auch mehr Bioporen zur

Verfügung standen, war die Konkurrenz der Wurzeln innerhalb einer Biopore geringer.

Bioporen können Wurzeln dazu dienen, schlecht durchdringbare Bodenschichten zu überwinden, um schließlich im weniger dichten C-Horizont in den *bulk*-Boden auszuwachsen. Sowohl die zeitige Erschließung von tiefen Bodenschichten als auch die geringere Konkurrenz innerhalb einer Biopore stellen potentiell einen Vorteil für die Pflanze dar. Unter dem Gesichtspunkt, dass die Biopore durch auswachsende Wurzeln zur Erschließung des *bulk*-Bodens beiträgt, ist die oft beobachtete höhere WLD nach Ww2 im Vergleich zu Rs1 im tiefen Boden plausibel, obwohl sie hauptsächlich auf einer höheren WLD im *bulk*-Boden beruht.

Der Versuch wurde auf einem für die Pflanzenproduktion günstigen Standort durchgeführt. Es ist daher denkbar, dass auf weniger guten Standorten mit Bodenverdichtung, flachgründigem oder nährstoffarmem Boden die Effekte deutlicher hervortreten. Daher ist es interessant, die Untersuchungen mit einem eingeschränkten Variantenspektrum unter anderen Umweltbedingungen zu wiederholen. Ein weiterer wichtiger Ansatzpunkt ist die Verteilung der Niederschläge. Durch einen Versuch mit Regendach könnte unter ansonsten gleichen Umweltbedingungen die Hypothese geprüft werden, dass die Bioporendichte bei Trockenheit einen stärkeren Einfluss auf die Pflanze hat.

Für künftige Versuche zur Bioporengnese ist es von entscheidender Bedeutung, die Ausgangsbioporendichte erfassen, um die festgestellten Unterschiede sicher auf die Versuchsfaktoren zurückführen zu können. Weiterhin sollte es ein Ziel für künftige Untersuchungen sein, den Bearbeitereffekt durch den Einsatz geeigneter neuer Methoden zu verringern. Beispielsweise können anhand von Infrarot-Spektroskopie nach eingehender Eichung Wurzeln verschiedener Arten getrennt erfasst werden (REWALD et al. 2012). Eine solche Vorgehensweise hat den Vorteil, mit einem konstanten Fehler zu arbeiten.

In verschiedenen Modellansätzen und auch in Gefäßversuchen konnte unter kontrollierten Bedingungen eine positive Wirkung von pflanzeninduzierten Bioporen auf die nachfolgende Kultur beobachtet werden (JAKOBSEN & DEXTER 1988, STIRZAKER et al. 1996, NUTTALL et al. 2008). Unter Feldbedingungen hat es sich dagegen wiederholt als schwierig erwiesen, positive Effekte nachzuweisen (CRESSWELL & KIRKEGAARD 1995, MCCALLUM et al. 2004). Einige Autoren kommen zu dem Schluss, dass der potentielle Nutzen von Bioporen nur unter ungünstigen Umweltbedingungen, z. B. hinsichtlich der Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit, zum Tragen kommt (PASSIOURA 2002, MCCALLUM et al. 2004).

Die Nährstoffgehalte im Unterboden sind zwar relativ gering, können aber zur Ernährung der Pflanzen beitragen (KAUTZ et al. 2013a). Im Unterschied zum Oberboden sind die Nährstoffe hier heterogener verteilt. Insbesondere in der Drilosphäre sind die Nährstoffgehalte höher als im umgebenden Boden (KAUTZ et al. 2013a). Durch eine hohe WLD im *bulk*-Boden sowie durch Kontakt zur Porenwand und tieferes Wachstum der Wurzeln kann die Nährstoffaufnahme der Pflanze gefördert werden. Die Schaffung von Bioporen ist daher eine geeignete Strategie zur effizienten Nutzung von Nährstoffressourcen. Dabei ist der Nutzen umso größer, je weniger Nährstoffe im Oberboden vorhanden sind und je trockener dieser ist (KUHLMANN & BAUMGÄRTEL 1991).

---

Im Versuch wurde gezeigt, dass eine höhere Bioporenverfügbarkeit, wie sie nach zweijährigem Wegwarte-Anbau realisiert wurde, eine tiefere Durchwurzelung zur Folge hatte. Dadurch kann auch Stickstoff aus dem tieferen Boden genutzt werden. Gerade Wurzeln, die durch Bioporen früh in der Vegetationsperiode große Bodentiefen erreichen, haben das Potential, verlagerten Stickstoff aufzunehmen und eine Auswaschung ins Grundwasser zu vermeiden.

Ein weiterer Vorteil einer tieferen Durchwurzelung ist, dass der Boden zu einer Senke für in der Wurzel gebundenen atmosphärischen Kohlenstoff wird. Mit der Wurzelbiomasse wird organisches Material in große Bodentiefen eingebracht, in denen der Abbau aufgrund geringer Sauerstoffzufuhr und weiterer Faktoren mit zunehmender Tiefe verlangsamt ist.

Bioporen beugen außerdem der Bodenerosion durch eine verbesserte Infiltration von Niederschlägen vor (MEEK et al. 1990, MCCALLUM et al. 2004). Unterstützend wirkt sich die Förderung von Regenwürmern aus, die nach der Bodenbearbeitung eine Verbindung von der Bodenoberfläche zum Porennetz im tiefen Boden schaffen (EHLERS 1975, VAN SCHAİK et al. 2013)

Die Bioporengese ist ein Teilaspekt des Themas Bodenfruchtbarkeit. Viele Ansätze, die im Ökologischen Landbau zur Erhaltung und Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit verfolgt werden, haben auch eine positive Wirkung auf die Genese von Bioporen. Zu nennen sind hier exemplarisch der Anbau von Zwischenfrüchten und Untersaaten sowie die Förderung von Regenwürmern durch reduzierte Bodenbearbeitung oder Bedeckung des Bodens mit Mulch. Generell ist eine vielfältige Fruchtfolge mit mehrjährigem Anbau von Pfahlwurzlern anzustreben. Aufgrund ökonomischer Zwänge wird allerdings eine zunehmende Spezialisierung der Betriebe und eine Verengung der Fruchtfolge beobachtet (PREISSEL et al. 2015). Dieser Rückgang der Vielfalt in der Fruchtfolge muss kritisch gesehen werden.

Bioporen können auch durch die *cut and carry* Strategie geschaffen werden. Dabei wird die Biomasse vom Geberfeld z.B. im silierten Zustand zur langfristig angelegten Düngung und Steigerung der Bodenfruchtbarkeit auf einem Nehmerfeld ausgebracht (STUMM & KÖPKE 2015). Dies ermöglicht auch reinen Marktfruchtbetrieben ohne Kooperationen mit viehhaltenden Betrieben die Nutzung von überjährig angebautem Klee gras. Vorteile im Sinne der Bioporengese ergeben sich auf dem Geberfeld durch Schaffung von Bioporen durch Pflanzenwurzeln und die Förderung der Regenwurmpopulation durch Bodenbedeckung und anfallende Streu. Auf dem Nehmerfeld kann das Bodengefüge durch organische Substanz und Nahrung für Regenwürmer sowie weiteres Bodenleben erhöht werden.

Solange durch Bioporen keine deutliche Steigerung des Ertrags nachgewiesen wird und sich andere Vorteile der Bioporen nicht monetär darstellen lassen, ist eine gezielte Umsetzung in die Praxis schwierig. Nichtsdestotrotz kann die Bioporengese im Rahmen der Verbesserung und des Erhalts der Bodenfruchtbarkeit gefördert werden. Alle Maßnahmen, die einen bestenfalls mehrjährigen Anbau von Pfahlwurzlern und die Förderung von Regenwürmern verfolgen, sind förderlich für die Bioporengese. In diesem Sinn ist eine vielfältige Fruchtfolge mit dem Anbau von Leguminosen und mehrjährigem Futterbau, wie sie im Organischen Landbau angestrebt wird, als günstig zu betrachten.

## 5. Zusammenfassung

Durch Pflanzenwurzeln oder Regenwürmer generierte Bioporen schaffen für Wurzeln nachfolgender Kulturen einen vereinfachten Zugang zu Wasser und Nährstoffen in großen Bodentiefen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Änderung des Bodengefüges hinsichtlich der Bioporendichte in Abhängigkeit von verschiedenen Wurzelsystemen und deren Anbaudauer erfasst. Der Schwerpunkt lag in der Vorfruchtphase auf der Genese von Bioporen. In der Nachfruchtphase wurde die Reaktion des Wurzelwachstums auf das veränderte Bodengefüge untersucht. Der Fokus lag dabei auf der Quantifizierung von in Bioporen wachsenden Wurzeln.

Die Feldversuche wurden am Campus Klein-Altendorf, einer Lehr- und Forschungsstation der Universität Bonn auf einer tiefgründigen Normparabraunerde aus Löss, durchgeführt. Der Versuch wurde als dreifaktorielle Streifenanlage mit den Versuchsfaktoren Vorfrucht, Anbaudauer und Nachfrucht angelegt. Die Vorfrüchte Luzerne (*Medicago sativa* L., Lu) und Wegwarte (*Cichorium intybus* L., Ww) bilden Pfahlwurzelsysteme, wohingegen Rohrschwengel (*Festuca arundinacea* SCHREB., Rs) ein homorhizes Wurzelsystem besitzt. Die Anbaudauer der Vorfrüchte betrug ein bis drei Jahre und entsprach einer Bodenruhe, da eine Bodenbearbeitung während dieser Zeit unterblieb. Der Pflanzenaufwuchs wurde gemulcht und auf der Fläche belassen. Die untersuchten Nachfrüchte waren Futtermalve (*Malva sylvestris* L.), Sommerweizen (*Triticum aestivum* L.), Wintergerste (*Hordeum vulgare* L.) und Winterraps (*Brassica napus* L.).

Die Charakterisierung der Wurzelsysteme und die Erfassung des Wurzelwachstums in Bioporen erfolgte durch Untersuchungen mit der Profilwandmethode und der Monolithmethode mit anschließender Bildanalyse. Zur Erfassung der Wurzeln in Bioporen wurde die Monolithmethode erweitert, indem Wurzeln innerhalb der Pore gefärbt und anschließend nach Farbe sortiert wurden. Die Bioporendichte wurde durch Auszählen einer horizontal freigelegten Bodenfläche in 45 cm Bodentiefe erfasst. Es wurde jeweils nach Porendurchmesser zwischen großen Poren (> 5 mm), mittleren Poren (2–5 mm) und kleinen Poren (< 2 mm) unterschieden. Die Erfassung erfolgte zunächst nach der Vorfruchtphase und erneut nach zweijähriger Brache, um auch Bioporen zu erfassen, die zuvor noch durch Wurzeln blockiert waren. Zu einem weiteren Zeitpunkt wurde die Bioporendichte in 10 cm Schritten bis in 145 cm Bodentiefe erhoben. Die Regenwurmabundanz und -biomasse wurde zu verschiedenen Versuchsstadien jeweils im Herbst erfasst.

**Vorfruchtphase** Zum Ende der Vorfruchtphase wurden die Wurzelsysteme der Vorfrüchte hinsichtlich Durchwurzelungsintensität (Wurzellängendichte (WLD), Wurzellänge (WL), Anteil der WL im Ap-Horizont), Durchwurzelungstiefe und Wurzeldurchmesser untersucht, um ihren Einfluss auf das Bodengefüge zu quantifizieren. Es wurde erwartet, dass sich diese Parameter aufgrund der Vorfruchtart unterscheiden und positiv von einer Steigerung der Anbaudauer

---

beeinflusst werden.

Insbesondere in den oberen 60 cm Bodentiefe dominierte Rohrschwengel in Bezug auf die WLD und durchwurzelte den Oberboden etwa doppelt so intensiv wie Wegwarte und Luzerne. Hingegen war die Durchwurzelungstiefe (die Bodentiefe, bis zu der > 95 % der Gesamtwurzellänge bestimmt wurde) von Rs deutlich geringer als die der allorhizen Kulturen. Bei einer mehrjährigen Anbaudauer nahm die Durchwurzelungstiefe bei allen Kulturen zu. Von 60 bis 150 cm Bodentiefe zeigten die allorhizen Kulturen Luzerne und Wegwarte eine höhere WLD. Unterhalb von 150 cm war schließlich die WLD von Ww am höchsten, während Rs hier die geringste WLD aufwies. Eine mehrjährige Anbaudauer resultierte in einer höheren WLD, wobei zweijähriger Anbau oft zu einer höheren WLD führte als dreijähriger Anbau. Den signifikant höchsten Wurzeldurchmesser hatte Wegwarte gefolgt von Luzerne und Rohrschwengel. Rs wies dabei mit 90 % der WL in der Durchmesserklasse < 0,4 mm den höchsten Feinwurzelanteil auf. Im Vergleich waren 85 % (Lu) und 69 % (Ww) der Wurzeln der allorhizen Kulturen in dieser Durchmesserklasse.

Der Einfluss der arttypisch ausgestalteten Wurzelsysteme der Vorfrüchte zeigte sich auch in der nachfolgend erhobenen Bioporendichte. Die über alle Varianten gemittelte Bioporendichte (> 2 mm) betrug 292 Poren·m<sup>-2</sup>, wobei sie nach Wegwarte-Vorfrucht signifikant höher als nach Luzerne- oder Rohrschwengel-Vorfrucht war. Ein signifikanter Einfluss der Anbaudauer ließ sich dagegen nicht feststellen. Die Bioporendichte nahm erwartungsgemäß mit der Bodentiefe ab. Nach Ww2-Vorfrucht war sie mit Durchmesser 2–5 mm zwischen 105 und 125 cm Bodentiefe signifikant höher als nach Rs1 Vorfrucht. In der Durchmesserklasse > 5 mm war die Bioporendichte mit Ausnahme der Bodentiefen 135 und 145 cm ebenfalls nach Ww2 höher.

Im Gegensatz zur Bioporendichte nahmen Biomasse und Abundanz der tiefgrabenden Regenwurmart *Lumbricus terrestris* mit steigender Anbaudauer zu, während kein Einfluss der Futterpflanzenart bestand. Zum Ende der Vorfruchtphase wurden im Mittel 19 Ind.·m<sup>-2</sup> und eine mittlere Biomasse von 32,5 g·m<sup>-2</sup> festgestellt. Die Differenzierung großer und kleiner Individuen nach Gewicht ergab eine besonders starke Förderung von juvenilen Exemplaren durch Bodenruhe. Aufgrund der vorhergehenden Bodenbearbeitung mit Pflugeinsatz wurde nach der Saat von Wintergerste im Herbst 2010 zu Beginn der Nachfruchtphase ein starker Rückgang der Regenwurmpopulation festgestellt. Die Bioporengenesse erfolgte im Versuch vorwiegend durch Pflanzenwurzeln. Dennoch können Regenwürmer die Qualität der Poren beeinflusst haben.

**Nachfruchtphase** In der Nachfruchtphase wurde ein Einfluss der Vorfruchtnutzung auf das Wurzelwachstum von Sommerweizen, Futtermalve, Wintergerste und Winterraps erwartet. Der Einfluss auf das Wurzelsystem des Sommerweizens war über alle Untersuchungen vergleichsweise gering oder nicht nachweisbar. Die Nachfrüchte Futtermalve, Wintergerste und Winterraps erreichten hingegen nach Ww2 durchgehend höhere Durchwurzelungstiefen als nach Rs1.

Es wurde postuliert, dass hohe Bioporendichten, wie sie nach Wegwarte als Vorfrucht

gefunden wurden, zu einer intensiveren Durchwurzelung des Unterbodens führen als niedrige Bioporendichten. Die WL von Futtermalve und Wintergerste war unterhalb von 30 cm Bodentiefe nach Ww2 durchgängig höher als nach Rs1. Mit der Monolithmethode wurde im Versuchsjahr 2011 eine Förderung der WLD von Winterraps nach Ww2 unterhalb von 115 cm Bodentiefe festgestellt. Dieses Ergebnis konnte im Versuchsjahr 2012 mit der Profilwandmethode für einen Untersuchungstermin bestätigt werden. Die Durchwurzelung von Futtermalve, Wintergerste und Winterraps war nach der Vorfrucht-Variante Ww2 im tiefen Boden häufig höher als nach Rs1. Dabei ließ sich ein Einfluss insbesondere unterhalb von 70 cm Bodentiefe nachweisen.

Im Versuchsjahr 2011 wurde der Einfluss der Vorfrucht-Varianten Ww2 und Rs1 auf den Wurzeldurchmesser von Wintergerste und Winterraps untersucht. In der geringsten Durchmesserklasse 0-0,2 mm wurden nach Rs1 signifikant mehr Wurzeln erfasst, während in allen größeren Durchmesserklassen der Anteil nach Ww2 höher war. Dementsprechend war auch der mittlere Durchmesser der Wurzeln nach Ww2 höher.

Neben den beschriebenen Auswirkungen auf das Wurzelwachstum im tiefen Boden wurde auch eine Erhöhung der Gesamt-WL nach Ww2 festgestellt. Der Einfluss der Vorfrucht-Variante auf das Wurzelwachstum im Oberboden war, im Gegensatz zum tiefen Boden, über Untersuchungszeitpunkte und Nachfrüchte nicht konsistent. Zusammenfassend lässt sich die These bestätigen, dass höhere Bioporendichten eine stärkere Durchwurzelung tiefer Bodenschichten begünstigen.

**Wurzelwachstum in Bioporen** Es wurde angenommen, dass das Wurzelwachstum der Nachfrüchte (Sommerweizen, Futtermalve, Wintergerste und Winterraps) im Unterboden vorwiegend in Bioporen stattfindet und der Anteil von Wurzeln in Bioporen mit der Bodentiefe zunimmt. Durch Überstauung von Bioporen mit einem Farbstoff wurden die darin wachsenden Wurzeln der Wintergerste markiert. Im Mittel über die Bodentiefen (45 bis 145 cm) wurde 19,7 % (Ww2-Vorfrucht) und 21,0 % (Rs1-Vorfrucht) der WLD in Bioporen festgestellt. Dieser Anteil war geringer als erwartet. Trotzdem wurde im Versuch eine Präferenz der Wurzeln für Bioporen festgestellt, da der Flächenanteil der erhobenen Bioporendichten gemittelt über die Bodentiefen 1,7 % (Ww2-Vorfrucht) und 1,3 % (Rs1-Vorfrucht) der Bodenoberfläche entsprach. Demnach wuchsen etwa 10 bis 15 Mal mehr Wurzeln in Bioporen, als bei einer zufälligen Verteilung zu erwarten gewesen wäre.

Die WLD von Wintergerste war nach Ww2 im Vergleich zu Rs1 erhöht. Wurde das Wurzelsystem in *bulk*-Boden und in Bioporen separat voneinander analysiert, so zeigte sich, dass der Vorfruchteffekt in beiden Fällen signifikant war. Mit der Profilwandmethode wurden im Ap-Horizont aufgrund der Pflugbearbeitung nahezu keine Wurzeln in Bioporen festgestellt. Die maximale absolute und relative WLD in Bioporen wurde bei allen untersuchten Nachfrüchten zwischen 30 und 120 cm Bodentiefe ermittelt.

Entgegen der Erwartungen nahm die WLD in Bioporen nur bis 120 cm Bodentiefe zu, während im C-Horizont (unterhalb von 120 cm Bodentiefe) eine starke Abnahme festgestellt

---

wurde. Hier wuchsen wahrscheinlich aufgrund der geringeren Lagerungsdichte deutlich weniger Wurzeln in Bioporen als im Bt-Horizont. Dies zeigt, dass Bioporen im Versuch besonders wichtig waren, um den dichten Bt-Horizont zu durchdringen.

Oft war die relative WLD in Bioporen zu einem frühen Entwicklungsstadium deutlich höher als zu späteren Zeitpunkten. Dies zeigt, dass die Bioporen früh in der Vegetationsperiode von den Wurzeln genutzt wurden, um große Bodentiefen zu erreichen. Dabei kann die Abnahme der WLD in Poren zu späteren Untersuchungsterminen entweder auf dem Auswachsen der Wurzeln aus Bioporen in den *bulk*-Boden beruhen oder auf der verzögerten Erschließung des *bulk*-Bodens ohne Beteiligung von Bioporen. Eine Nutzung der Bioporen erfolgte insbesondere durch das allorhize Wurzelsystem von Futtermalve und Winterrops, welche mit 5 bis 30 % deutlich höhere Anteile von Wurzeln in Bioporen aufwiesen als die homorhizen Nachfrüchte Sommerweizen und Wintergerste (3 bis 13 %).

Um die Konkurrenz von Wurzeln der Wintergerste untereinander innerhalb einer Pore abschätzen zu können, wurde die WL je Biopore für die verschiedenen Bodentiefen berechnet. Bis in 135 cm Bodentiefe wuchsen nach Rs1 deutlich mehr Wurzeln in einer Pore als nach Ww2. Ausschlaggebend hierfür war die geringere Bioporendichte nach Rs1-Vorfrucht. Von 135 bis 155 cm Bodentiefe war die WL von Wintergerste in Bioporen nach Ww2-Vorfrucht höher als nach Rs1-Vorfrucht, während die Bioporendichten beider Varianten annähernd gleich waren. Insgesamt betrachtet war die intraspezifische Konkurrenz der Wintergerstenwurzeln in Bioporen nach Ww2 somit in den meisten Bodentiefen geringer als nach Rs1.

**Schlussfolgerungen und Ausblick** Im Rahmen dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass durch den Anbau allorhizer Futterpflanzen Bioporen generiert oder stabilisiert werden. Dieser Vorfruchteffekt führte zu einer höheren WLD sowie zu höheren Durchwurzelungstiefen bei Futtermalve, Wintergerste und Winterrops. Die Nutzung der Bioporen war zu Beginn der Pflanzenentwicklung und bei Vorliegen eines allorhizen Wurzelsystems besonders ausgeprägt. Die schnellere Erschließung großer Bodentiefen durch Wurzeln in Bioporen erleichtert den Zugang zu im Boden gespeichertem Wasser. Außerdem sind die Nährstoffgehalte der Porenwand im Vergleich zum *bulk*-Boden erhöht. Dadurch haben Bioporen das Potential, die Wasser- und Nährstoffversorgung zu verbessern und so zur Stabilisierung von Erträgen beizutragen. Diese Aspekte können in Zukunft an Bedeutung gewinnen, da im Zuge des Klimawandels häufigere Trockenperioden in Mitteleuropa erwartet werden. Tiefreichende Wurzeln stellen zudem eine Kohlenstoffsенke dar und können der Atmosphäre klimawirksames Kohlendioxid langfristig entziehen.

Grundsätzlich wirken sich viele im Organischen Landbau angewandte Strategien zur Förderung der Bodenfruchtbarkeit positiv auf die Bioporengese aus. Zur gezielten Nutzung der beschriebenen Vorteile unter Praxisbedingungen bedarf es aber weiterer Forschung, die auch die wirtschaftlichen Aspekte beleuchtet. Insbesondere erscheint es in Anbetracht der vorgestellten Ergebnisse lohnenswert, das Potential weiterer Pflanzen hinsichtlich der Bioporengese, die Dauer der beschriebenen Effekte und den Einfluss auf den Ertrag beispielsweise bei Wasser- oder Nährstoffmangel in zukünftigen Studien zu untersuchen.

# 6. Verzeichnisse

## 6.1. Literaturverzeichnis

- ADL, S. M. (2003) *The ecology of soil decomposition*. CABI Pub., Wallingford.
- AMATO, M., F. LUPO, G. BITELLA, R. BOCHICCHIO & M. ABDEL AZIZ (2012) A high quality low-cost digital microscope minirhizotron system. *Comput. Electron. Agr.*, 80: 50–53.
- AMATO, M. & A. PARDO (1994) *Root length and biomass losses during sample preparation with different screen mesh sizes*. *Plant Soil*, 161(2): 299–303.
- ANGERS, D. A. & J. CARON (1998) *Plant-induced changes in soil structure: Processes and feedbacks*. *Biogeochemistry*, 42(1-2): 55–72.
- ASSENG, S., L. A. G. AYLMOORE, J. S. MACFALL, J. W. HOPMANS & P. J. GREGORY (2000) *Computer-assisted tomography and magnetic resonance imaging*. In A. L. SMIT, A. G. BENGOUGH, C. ENGELS, M. VAN NOORDWIJK, S. PELLERIN & S. C. VAN DE GEIJN (Hg.), *Root Methods*, 343–363. Springer, Berlin.
- ATHMANN, M., T. KAUTZ, R. PUDE & U. KÖPKE (2013) *Root growth in biopores – evaluation with in situ endoscopy*. *Plant Soil*, 371(1-2): 179–190.
- ATKINSON, D. & L. A. DAWSON (2000) *Root growth: Methods of measurement*. In K. A. SMITH & C. E. MULLINS (Hg.), *Soil and Environmental Analysis*, Books in soils, plants, and the environment, 435–498. M. Dekker, New York.
- ATWELL, B. J. (1993) *Response of roots to mechanical impedance*. *Environ. Exp. Bot.*, 33(1): 27–40.
- BALL, B. C., I. BINGHAM, R. M. REES, C. A. WATSON & A. LITTERICK (2005) *The role of crop rotations in determining soil structure and crop growth conditions*. *Can. J. Soil Sci.*, 85(5): 557–577.
- BARRACLOUGH, P. B., H. KUHLMANN & A. H. WEIR (1989) *The Effects of Prolonged Drought and Nitrogen Fertilizer on Root and Shoot Growth and Water Uptake by Winter Wheat*. *J. Agron. Crop Sci.*, 163(5): 352–360.
- BARRACLOUGH, P. B. & R. A. LEIGH (1984) *The growth and activity of winter-wheat roots in the field - the effect of sowing date and soil type on root-growth of high-yielding crops*. *J. Agric. Sci.*, 103(1): 59–74.

- BASTARDIE, F., Y. CAPOWIEZ, P. RENAULT & D. CLUZEAU (2005) *A radio-labelled study of earthworm behaviour in artificial soil cores in term of ecological types*. Biol. Fertil. Soils, 41(5): 320–327.
- BENGOUGH, A. G. (2003) *Root growth and function in relation to soil structure, composition and strength*. In H. D. KROON & E. J. VISSER (Hg.), *Root ecology*, 151–171. Springer, Berlin.
- BENGOUGH, A. G. (2012) *Root elongation is restricted by axial but not by radial pressures: so what happens in field soil?* Plant Soil, 360(1-2): 15–18.
- BENGOUGH, A. G., B. M. MCKENZIE, P. D. HALLETT & T. A. VALENTINE (2011) *Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits*. J. Exp. Bot., 62(1): 59–68.
- BENGOUGH, A. G. & C. E. MULLINS (1990) *Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses*. J. Soil Sci., 41(3): 341–358.
- BENJAMIN, J. G., M. MIKHA, D. C. NIELSEN, M. F. VIGIL, F. CALDERÓN & W. B. HENRY (2007) *Cropping Intensity Effects on Physical Properties of a No-till Silt Loam*. Soil Sci. Soc. Am. J., 71(4): 1160–1165.
- BENJAMIN, J. G. & D. C. NIELSEN (2004) *A method to separate plant roots from soil and analyze root surface area*. Plant Soil, 267(1-2): 225–234.
- BEVEN, K. & P. GERMANN (1982) *Macropores and water flow in soils*. Water Resour. Res., 18(5): 1311–1325.
- BINGHAM, I. J. & A. G. BENGOUGH (2003) *Morphological plasticity of wheat and barley roots in response to spatial variation in soil strength*. Plant and Soil, 250(2): 273–282.
- BINGHAM, I. J., A. M. D. GLASS, H. J. KRONZUCKER, D. ROBINSON & C. M. SCRIMGEOUR (2000) *Isotope Techniques*. In A. L. SMIT, A. G. BENGOUGH, C. ENGELS, M. VAN NOORDWIJK, S. PELLERIN & S. C. VAN DE GEIJN (Hg.), *Root Methods*. Springer, Berlin.
- BLACKWELL, P., T. GREEN & W. MASON (1990) *Responses of biopore channels from roots to compression by vertical stresses*. Soil Sci. Soc. Am. J., 54(4): 1088–1091.
- BÖHM, W. (1979) *Methods of Studying Root Systems*. Ecological studies. Springer-Verlag, Berlin.
- BOLGER, T. P., J. F. ANGUS & M. B. PEOPLES (2003) *Comparison of nitrogen mineralisation patterns from root residues of Trifolium subterraneum and Medicago sativa*. Biol. Fertil. Soils, 38(5): 296–300.

- BOLINDER, M. A., D. A. ANGERS, G. BÉLANGER, R. MICHAUD & M. R. LAVERDIÈRE (2002) *Root biomass and shoot to root ratios of perennial forage crops in eastern Canada*. *Can. J. Plant Sci.*, 82(4): 731–737.
- BOUCHÉ, M. B. (1975) *Action de la faune sur les états de la matière organique dans les écosystèmes*. In G. KILBERTUS, O. REISINGER, A. MOUREY & J. A. CANCELA DA FONSECA (Hg.), *Biodégradation et humification*. Pierron, Sarreguemines.
- BOUMA, T. J., K. L. NIELSEN & B. KOUTSTAAL (2000) *Sample preparation and scanning protocol for computerised analysis of root length and diameter*. *Plant Soil*, 218(1/2): 185–196.
- BRAMLEY, H., J. HUTSON & S. D. TYERMAN (2003) *Floodwater infiltration through root channels on a sodic clay floodplain and the influence on a local tree species Eucalyptus largiflorens*. *Plant Soil*, 253(1): 275–286.
- BREWER, R. (1964) *Fabric and mineral analysis of soils*. John Wiley & Sons, New York.
- BROWN, G. G., C. A. EDWARDS & L. BRUSSAARD (2004) *How earthworms affect plant growth: Burrowing into the Mechanisms*. In C. A. EDWARDS (Hg.), *Earthworm Ecology*. CRC Press, Boca Raton.
- LAMMERTS VAN BUEREN, E. T., P. C. STRUIK & E. JACOBSEN (2002) *Ecological concepts in organic farming and their consequences for an organic crop ideotype*. *Neth. J. Agr. Sci.*, 50(1): 1–26.
- BUNDT, M., A. ALBRECHT, P. FROIDEVAUX, P. BLASER & H. FLÜHLER (2000) *Impact of Preferential Flow on Radionuclide Distribution in Soil*. *Environ. Sci. Technol.*, 34(18): 3895–3899.
- CAMPBELL, D. J. & J. K. HENSHALL (1991) *Bulk density*. In K. A. SMITH & C. E. MULLINS (Hg.), *Soil Analysis*, Books in soils, plants, and the environment, 329–366. M. Dekker, New York.
- CAMPBELL, D. J. & M. F. O’SULLIVAN (1991) *The cone penetrometer in relation to trafficability, compaction, and tillage*. In K. A. SMITH & C. E. MULLINS (Hg.), *Soil Analysis*, Books in soils, plants, and the environment, 399–430. M. Dekker, New York.
- CAMPBELL, G. & J. SKILLINGS (1985) *Nonparametric stepwise multiple comparison procedures*. *J. Am. Stat. Assoc.*, 80(392): 998–1003.
- CAPOWIEZ, Y., S. CADOUX, P. BOUCHAND, J. ROGER-ESTRADE, G. RICHARD & H. BOIZARD (2009) *Experimental evidence for the role of earthworms in compacted soil regeneration based on field observations and results from a semi-field experiment*. *Soil Biol. Biochem.*, 41(4): 711–717.

- CHADŒUF, J., A. KRETSCHMAR, M. GOULARD & K. SMETTEM (1994) *Description of the spatial interaction between earthworm burrows and cracks at the soil surface*. In A. RINGROSE-VOASE & G. HUMPHREYS (Hg.), *Soil micromorphology: studies in management and genesis*, 521–530. Elsevier, Amsterdam.
- CHAN, K. Y. (2001) *An overview of some tillage impacts on earthworm population abundance and diversity—implications for functioning in soils*. *Soil Till. Res.*, 57(4): 179–191.
- CHAN, K. Y. (2004) *Impact of tillage practices and burrows of a native Australian anecic earthworm on soil hydrology*. *Appl. Soil Ecol.*, 27(1): 89–96.
- CLARK, L., W. WHALLEY & P. B. BARRACLOUGH (2003) *How do roots penetrate strong soil?* *Plant and Soil*, 255(1): 93–104.
- CORDELL, D., J.-O. DRANGERT & S. WHITE (2009) *The story of phosphorus: Global food security and food for thought*. *Global Environ. Chang.*, 19(2): 292–305.
- CRESSWELL, H. P. & J. A. KIRKEGAARD (1995) *Subsoil amelioration by plant roots – the process and the evidence*. *Aust. J. Soil Res.*, 33(2): 221–239.
- CURRY, J. P. (2004) *Factors affecting the abundance of earthworms in soils*. In C. A. EDWARDS (Hg.), *Earthworm Ecology*. CRC Press, Boca Raton.
- CURRY, J. P., D. BYRNE & O. SCHMIDT (2002) *Intensive cultivation can drastically reduce earthworm populations in arable land*. *Eur. J. Soil Biol.*, 38(2): 127–130.
- DANIEL, O. (1995) *Reproduction by the earthworm Lumbricus terrestris L. (Oligochaeta, Lumbricidae)*. In J. HAIMI & V. HUHTA (Hg.), *XI International Colloquium on Soil Zoology*, Band 196 von *Acta Zoologica Fennica*, 215–218. Finnish Zoological and Botanical Pub. Board, Helsinki.
- DANIEL, O., L. KOHLI & M. BIERI (1996) *Weight gain and weight loss of the earthworm Lumbricus terrestris L. at different temperatures and body weights*. *Soil Biol. Biochem.*, 28(9): 1235–1240.
- DEXTER, A. R. (1986a) *Model experiments on the behavior of roots at the interface between a tilled seed-bed and a compacted subsoil. 1. Effects of seed-bed aggregate size and subsoil strength on wheat roots*. *Plant Soil*, 95(1): 123–133.
- DEXTER, A. R. (1986b) *Model experiments on the behaviour of roots at the interface between a tilled seed-bed and a compacted sub-soil*. *Plant Soil*, 95(1): 149–161.
- DEXTER, A. R. (1987) *Compression of soil around roots*. *Plant Soil*, 97(3): 401–406.
- DEXTER, A. R. (1991) *Amelioration of soil by natural processes*. *Soil Till. Res.*, 20(1): 87–100.

- DIEPENBROCK, W. (2006) *Raps: Biologische und Ökologische Grundlagen*. In K. U. HEYLAND (Hg.), *Handbuch des Pflanzenbaues*, Band 4, 41–63. Ulmer, Stuttgart.
- DINTER, A., C. OBERWALDER, P. KABOUW, M. COULSON, G. ERNST, T. LEICHER, M. MILES, G. WEYMAN & O. KLEIN (2013) *Occurrence and distribution of earthworms in agricultural landscapes across Europe with regard to testing for responses to plant protection products*. *J. Soils Sediments*, 13(2): 278–293.
- DON, A., B. STEINBERG, I. SCHÖNING, K. PRITSCH, M. JOSCHKO, G. GLEIXNER & E.-D. SCHULZE (2008) *Organic carbon sequestration in earthworm burrows*. *Soil Biol. Biochem.*, 40(7): 1803 – 1812.
- DREESMANN, S. (1994) *Pflanzenbauliche Untersuchungen zu Rotklee- und Luzernegras-Grünbrachen in der modifizierten Fruchtfolge Zuckerrüben - Winterweizen - Wintergerste*. Doktorarbeit, Universität Bonn.
- DREW, M. C. (1983) *Plant injury and adaptation to oxygen deficiency in the root environment: A review*. *Plant Soil*, 75(2): 179–199.
- DUNBABIN, V., A. DIGGLE & Z. RENGEL (2003) *Is there an optimal root architecture for nitrate capture in leaching environments?* *Plant Cell Environ.*, 26(6): 835–844.
- EDWARDS, C. A. (Hg.) (2004) *Earthworm Ecology*. CRC Press, Boca Raton.
- EDWARDS, C. A. & J. R. LOFTY (1980) *Effects of Earthworm Inoculation Upon the Root Growth of Direct Drilled Cereals*. *J. Appl. Ecol.*, 17(3): 533–543.
- EHLERS, W. (1975) *Observations on earthworm channels and infiltration on tilled and untilled loess soil*. *Soil Sci.*, 119(3): 242–249.
- EHLERS, W., A. P. HAMBLIN, D. TENNANT & R. R. VAN DER PLOEG (1991) *Root system parameters determining water uptake of field crops*. *Irrig. Sci.*, 12(3): 115–124.
- EHLERS, W., U. KÖPKE, F. HESSE & W. BÖHM (1983) *Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil*. *Soil Till. Res.*, 3(3): 261–275.
- ELKINS, C. (1985) *Plant roots as tillage tools*. In *Tillage machinery systems as related to cropping systems*, Band 3, 519–523. ICDS Conference, Auburn.
- FAGERIA, N. K. (2012) *The role of plant roots in crop production*. CRC Press, Boca Raton.
- FIELD, A. P. (2009) *Discovering statistics using SPSS*. Introducing Statistical Methods Series. SAGE, Los Angeles, 3 Auflage.
- FINCK, A. (1952) *Ökologische und bodenkundliche Studien über die Leistungen der Regenwürmer für die Bodenfruchtbarkeit*. *Z. Pflanzenernaehr. Dueng. Bodenk.*, 58(2): 120–145.

- FLEIGE, H., H. GRIMME, M. RENGER & O. STREBEL (1983) *Zur Erfassung der Nährstoffanlieferung durch Diffusion im effektiven Wurzelraum*. Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch., 38: 381–386.
- FOX, R. H., R. J. K. MYERS & I. VALLIS (1990) *The nitrogen mineralization rate of legume residues in soil as influenced by their polyphenol, lignin, and nitrogen contents*. Plant Soil, 129(2): 251–259.
- FOX, R. H. & W. P. PIEKIELEK (1988) *Fertilizer N Equivalence of Alfalfa, Birdsfoot Trefoil, and Red Clover for Succeeding Corn Crops*. J. Prod. Agric., 1(4): 313–317.
- GAISER, T., U. PERKONS, P. M. KÜPPER, T. KAUTZ, D. U. PUSCHMANN, F. EWERT, A. ENDERS & G. KRAUSS (2013) *Modeling biopore effects on root growth and biomass production on soils with pronounced sub-soil clay accumulation*. Ecol. Model., 256: 6–15.
- GAISER, T., U. PERKONS, P. M. KÜPPER, D. U. PUSCHMANN & S. PETH (2012) *Evidence of improved water uptake from subsoil by spring wheat following lucerne in a temperate humid climate*. Field Crops Res., 126: 56–62.
- GÄTH, S. & H. MEUSER (1989) *Vergleich von Methoden zur Bestimmung der Wurzellängendichte bei Kulturpflanzen*. J. Agron. Crop Sci., 163(2): 124–128.
- GEIER, V. M. (2011) *Wurzelentwicklung von Sommerweizen und Futtermalve nach Anbau perennierender Futterpflanzen*. Diplomarbeit, Universität Bonn.
- GEISLER, G. (1980) *Pflanzenbau: Ein Lehrbuch-Biologische Grundlagen und Technik der Pflanzenproduktion*. Parey, Berlin.
- GENC, Y., C. Y. HUANG & P. LANGRIDGE (2007) *A study of the role of root morphological traits in growth of barley in zinc-deficient soil*. J. Exp. Bot., 58(11): 2775–2784.
- GENTILE, R. M., D. L. MARTINO & M. H. ENTZ (2003) *Root characterization of three forage species grown in southwestern Uruguay*. Can. J. Plant Sci., 83(4): 785–788.
- GERHARDT, R. A. (1997) *A comparative analysis of the effects of organic and conventional farming systems on soil structure*. Biol. Agric. Hortic., 14(2): 139–157.
- GIJSMAN, A. J., H. F. ALARCÓN & R. J. THOMAS (1997) *Root decomposition in tropical grasses and legumes, as affected by soil texture and season*. Soil Biol. Biochem., 29(9-10): 1443–1450.
- GILL, R. A. & I. C. BURKE (2002) *Influence of soil depth on the decomposition of Bouteloua gracilis roots in the shortgrass steppe*. Plant Soil, 241(2): 233–242.
- GLĄB, T. (2007) *Effect of soil compaction on root system development and yields of tall fescue*. Int. Agrophysics, 21(3): 233–239.

- GODFRAY, H. C. J., J. R. BEDDINGTON, I. R. CRUTE, L. HADDAD, D. LAWRENCE, J. F. MUIR, J. PRETTY, S. ROBINSON, S. M. THOMAS & C. TOULMIN (2010) *Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People*. *Science*, 327(5967): 812–818.
- GORNALL, J., R. BETTS, E. BURKE, R. CLARK, J. CAMP, K. WILLETT & A. WILTSHIRE (2010) *Implications of climate change for agricultural productivity in the early twenty-first century*. *Phil. Trans. R. Soc. B*, 365(1554): 2973–2989.
- GOSS, M. J. (1977) *Effects of Mechanical Impedance on Root Growth in Barley (Hordeum vulgare L.): I. Effects on the elongation and branching of seminal root axes*. *J. Exp. Bot.*, 28(1): 96–111.
- GRAFF, O. (1967) *Über die Verlagerung von Nährelementen in den Unterboden durch Regenwurmtätigkeit*. *Landwirt. Forsch.*, 20: 117–127.
- GRAFF, O. (1971) *Beeinflussen Regenwurmröhren die Pflanzenernährung?* *Landbauforschung Völkenrode*, 21(2): 103–108.
- GRAFF, O. (1983) *Unsere Regenwürmer: Lexikon für Freunde der Bodenbiologie*. Schaper, Hannover.
- GREGORY, P. J. (2006) *Roots, rhizosphere and soil: the route to a better understanding of soil science?* *Eur. J. Soil Sci.*, 57(1): 2–12.
- GREGORY, P. J., M. MCGOWAN, P. V. BISCOE & B. HUNTER (1978) *Water relations of winter-wheat: 1. Growth of root-system*. *J. Agric. Sci.*, 91(1): 91–102.
- GRIGOROPOULOU, N., K. R. BUTT & C. N. LOWE (2009) *Interactions of juvenile Lumbricus terrestris with adults and their burrow systems in a two-dimensional microcosm*. *Pesqui. Agropecu. Bras.*, 44: 964–968.
- GROSSMAN, J. D. & K. J. RICE (2012) *Evolution of root plasticity responses to variation in soil nutrient distribution and concentration*. *Evol. Appl.*, 5(8): 850–857.
- GUNN, A. (1992) *The use of mustard to estimate earthworm populations*. *Pedobiologia*, 36(2): 65–67.
- HAMBLIN, A. & D. TENNANT (1987) *Root length density and water uptake in cereals and grain legumes: How well are they correlated?* *Aust. J. Agric. Res.*, 38(3): 513–527.
- HAMBLIN, A. P. (1985) *The influence of soil structure on water movement, crop root growth and water uptake*. In N. BRADY (Hg.), *Advances in Agronomy*, 95–158. Academic Press, Orlando.
- HAN, E., T. KAUTZ & U. KÖPKE (2016) *Precrop root system determines root diameter of subsequent crop*. *Biol. and Fertil. Soils.*, 52: 113–118.

- HAN, E., T. KAUTZ, U. PERKONS, M. LÜSEBRINK, R. PUDE & U. KÖPKE (2015a) *Quantification of soil biopore density after perennial fodder cropping*. *Plant Soil*, 394(1): 73–85.
- HAN, E., T. KAUTZ, U. PERKONS, D. UTEAU, S. PETH, N. HUANG, R. HORN & U. KÖPKE (2015b) *Root growth dynamics inside and outside of soil biopores as affected by crop sequence determined with the profile wall method*. *Biology and Fertility of Soils*, 51(7): 847–856.
- HEERAMAN, D. A. & N. G. JUMA (1993) *A comparison of minirhizotron, core and monolith methods for quantifying barley (*Hordeum vulgare* L) and fababean (*Vicia faba* L) root distribution*. *Plant Soil*, 148(1): 29–41.
- HENSEN, V. (1892) *Die Wurzeln in den tieferen Bodenschichten*. *Jb. Dtsch. Landw.-Ges.*, 7: 84–96.
- HERTEL, T. W. & U. L. C. BALDOS (2016) *Climate Change Impacts in Agriculture*. In T. W. HERTEL & U. L. C. BALDOS (Hg.), *Global Change and the Challenges of Sustainably Feeding a Growing Planet*, 69–84. Springer International Publishing, Cham.
- HIRTH, J. R., B. M. MCKENZIE & J. M. TISDALL (1997) *Do the roots of perennial ryegrass elongate to biopores filled with the casts of endogeic earthworms?* *Soil Biol. Biochem.*, 29(3-4): 529–531.
- HIRTH, J. R., B. M. MCKENZIE & J. M. TISDALL (2005) *Ability of seedling roots of *Lolium perenne* L. to penetrate soil from artificial biopores is modified by soil bulk density, biopore angle and biopore relief*. *Plant Soil*, 272(1-2): 327–336.
- HODGE, A. (2004) *The plastic plant: root responses to heterogeneous supplies of nutrients*. *New Phytol.*, 162(1): 9–24.
- HORN, R., J. STORK & A. R. DEXTER (1987) *Untersuchungen über den Einfluß des Bodengefüges für den Eindringwiderstand in Böden*. *Z. Pflanzenernaehr. Bodenk.*, 150(5): 342–347.
- HWANG, S. F., H. U. AHMED, B. D. GOSSEN, H. R. KUTCHER, S. A. BRANDT, S. E. STRELKOV, K. F. CHANG & G. D. TURNBULL (2009) *Effect of crop rotation on the soil pathogen population dynamics and canola seedling establishment*. *Plant Pathol. J.*, 8(3): 106–112.
- JAKOBSEN, B. F. & A. R. DEXTER (1988) *Influence of biopores on root-growth, water-uptake and grain-yield of wheat (*Triticum aestivum*) based on predictions from a computer-model*. *Biol. Fertil. Soils*, 6(4): 315–321.

- JÉGOU, D., J. BRUNOTTE, H. ROGASIK, Y. CAPOWIEZ & H. DIESTEL (2002) *Impact of soil compaction on earthworm burrow systems using X-ray computed tomography: preliminary study*. Eur. J. Soil Biol., 38(3-4): 329–336.
- JÉGOU, D., D. CLUZEAU, H. J. WOLF, Y. GANDON & P. TRÉHEN (1998) *Assessment of the burrow system of Lumbricus terrestris, Aporrectodea giardi, and Aporrectodea caliginosa using X-ray computed tomography*. Biol. Fertil. Soils, 26(2): 116–121.
- JÉGOU, D., S. SCHRADER, H. DIESTEL & D. CLUZEAU (2001) *Morphological, physical and biochemical characteristics of burrow walls formed by earthworms*. Appl. Soil Ecol., 17(2): 165–174.
- JONES, D. L., A. HODGE & Y. KUZYAKOV (2004) *Plant and mycorrhizal regulation of rhizodeposition*. New Phytol, 163(3): 459–480.
- KAHNT, G. (2008) *Leguminosen im konventionellen und ökologischen Landbau*. DLG-Verl., Frankfurt am Main.
- KAHNT, G. & U. KÖPKE (1997) *Fruchtfolge*. In E. R. KELLER (Hg.), *Handbuch des Pflanzenbaues*, Band 1 von *Handbuch des Pflanzenbaues*, 641–648. Ulmer, Stuttgart.
- KAUTZ, T., W. AMELUNG, F. EWERT, T. GAISER, R. HORN, R. JAHN, M. JAVAUX, A. KEMNA, Y. KUZYAKOV, J.-C. MUNCH, S. PÄTZOLD, S. PETH, H. W. SCHERER, M. SCHLOTTER, H. SCHNEIDER, J. VANDERBORCHT, D. VETTERLEIN, A. WALTER, G. L. B. WIESENBERG & U. KÖPKE (2013a) *Nutrient acquisition from arable subsoils in temperate climates: A review*. Soil Biol. Biochem., 57: 1003–1022.
- KAUTZ, T. & U. KÖPKE (2010) *In situ endoscopy: New insights to root growth in biopores*. Plant Biosyst., 144(2): 440–442.
- KAUTZ, T., M. LÜSEBRINK, S. PÄTZOLD, D. VETTERLEIN, R. PUDE, M. ATHMANN, P. M. KÜPPER, U. PERKONS & U. KÖPKE (2014) *Contribution of anecic earthworms to biopore formation during cultivation of perennial ley crops*. Pedobiologia, 57(1): 47–52.
- KAUTZ, T., U. PERKONS, M. ATHMANN, R. PUDE & U. KÖPKE (2013b) *Barley roots are not constrained to large-sized biopores in the subsoil of a deep Haplic Luvisol*. Biol Fertil Soils, 49(7): 959–963.
- KAUTZ, T., C. STUMM, R. KÖSTERS & U. KÖPKE (2010) *Effects of perennial fodder crops on soil structure in agricultural headlands*. J. Plant Nutr. Soil Sci., 173(4): 490–501.
- KELL, D. B. (2011) *Breeding crop plants with deep roots: their role in sustainable carbon, nutrient and water sequestration*. Ann. Bot-London, 108(3): 407–418.
- KIRBY, E. J. M. & O. RACKHAM (1971) *A note on the root growth of barley*. J. Appl. Ecol., 8(3): 919–924.

- KIRKEGAARD, J., O. CHRISTEN, J. KRUPINSKY & D. LAYZELL (2008) *Break crop benefits in temperate wheat production*. *Field Crops Res.*, 107(3): 185–195.
- KLADIVKO, E. J. (2001) *Tillage systems and soil ecology*. *Soil Till. Res.*, 61(1-2): 61–76.
- KLÄSENER, O. (1924) *Wurzelentwicklung verschiedener Kartoffelsorten nach den Verhältnissen des Göttinger Versuchsfeldes*. Doktorarbeit, Georg-August-Universität zu Göttingen.
- KÖNNECKE, G. (1967) *Fruchtfolgen*. Deutscher Landwirtschaftsverl., Berlin.
- KÖPKE, U. (1979) *Ein Vergleich von Feldmethoden zur Bestimmung des Wurzelwachstums landwirtschaftlicher Kulturpflanzen*. Doktorarbeit, Universität Göttingen.
- KÖPKE, U. (1981) *A comparison of methods for measuring root-growth of field crops*. *J. Agron. Crop Sci.*, 150(1): 39–49.
- KOTCON, J. B. (2011) *Population dynamics of earthworms in organic farming systems*. In A. KARACA (Hg.), *Biology of Earthworms*, Band 24 von *Soil Biology*, 299–310. Springer, Heidelberg.
- KREBS, M., A. KRETSCHMAR, U. BABEL, J. CHADŒUF & M. GOULARD (1994) *Investigations on distribution patterns in soil: basic and relative distributions of roots, channels and cracks*. In A. RINGROSE-VOASE & G. HUMPHREYS (Hg.), *Soil micromorphology: studies in management and genesis*, 437–449. Elsevier, Amsterdam.
- KRUPINSKY, J. M., K. L. BAILEY, M. P. MCMULLEN, B. D. GOSSEN & T. K. TURKINGTON (2002) *Managing Plant Disease Risk in Diversified Cropping Systems*. *Agron. K.*, 94(2): 198–209.
- KUHLMANN, H. & G. BAUMGÄRTEL (1991) *Potential importance of the subsoil for the P and Mg nutrition of wheat*. *Plant Soil*, 137(2): 259–266.
- KÜPPER, P. M. (2014) *mündliche Mitteilung*.
- KUTSCHERA, L., E. LICHTENEGGER & M. SOBOTIK (2009) *Wurzelatlas der Kulturpflanzen gemäßigter Gebiete mit Arten des Feldgemüsebaues*. DLG-Verl., Frankfurt am Main.
- LAL, R. (2009) *Soil degradation as a reason for inadequate human nutrition*. *Food Secur.*, 1(1): 45–57.
- LAMANDÉ, M., R. LABOURIAU, M. HOLMSTRUP, S. B. TORP, M. H. GREVE, G. HECKRATH, B. V. IVERSEN, L. W. D. JONGE, P. MOLDRUP & O. H. JACOBSEN (2011) *Density of macropores as related to soil and earthworm community parameters in cultivated grasslands*. *Geoderma*, 162(3-4): 319–326.

- LANDGRAF, D. (2010) *Wurzellängendichten und Regenwurmaktivität unter verschiedenen perennierenden Feldfutterpflanzen bei differenzierter Anbaudauer*. Diplomarbeit, Universität Bonn.
- LARREGUY, C., A. L. CARRERA & M. B. BERTILLER (2012) *Production and turnover rates of shallow fine roots in rangelands of the Patagonian Monte, Argentina*. *Ecol. Res.*, 27(1): 61–68.
- LAVELLE, P. (1988) *Earthworm activities and the soil system*. *Biol. Fertil. Soils*, 6(3): 237–251.
- LOGSDON, S. D. & D. R. LINDEN (1992) *Interactions of earthworms with soil physical conditions influencing plant growth*. *Soil Sci.*, 154(4): 330–337.
- LÜHRING, T. (2012) *Quantifizierung von Bioporengrößenklassen nach zweijähriger Brache: Einfluss der Wurzelrotte in Bioporen*. Bachelorarbeit, Universität Bonn.
- LÜSEBRINK, M. (2012) *Bioporengenesse durch Lumbricus terrestris in mehrjährig genutzten Feldfutterbeständen: Methodenentwicklung in Feld- und Mikrokosmosversuchen*. Diplomarbeit, Universität Bonn.
- LYNCH, J. M. & J. M. WHIPPS (1990) *Substrate flow in the rhizosphere*. *Plant Soil*, 129(1): 1–10.
- LYNCH, J. P. & T. WOJCIECHOWSKI (2015) *Opportunities and challenges in the subsoil: pathways to deeper rooted crops*. *J. Exp. Bot.*, 66(8): 2199–2210.
- MAAS, G. (1993) *Zum Anbau von Luzerne, Steinklee und Kulturmalve auf jungen rekultivierten Böden im Rheinischen Braunkohlerevier*. Doktorarbeit, Universität Bonn.
- MARTINO, D. L. & C. F. SHAYKEWICH (1994) *Root penetration profiles of wheat and barley as affected by soil penetration resistance in field conditions*. *Can. J. Soil Sci.*, 74(2): 193–200.
- MATERECHERA, S. A., A. M. ALSTON, J. M. KIRBY & A. R. DEXTER (1992) *Influence of root diameter on the penetration of seminal roots into a compacted subsoil*. *Plant Soil*, 144(2): 297–303.
- MCCALLUM, M. H., J. A. KIRKEGAARD, T. W. GREEN, H. P. CRESSWELL, S. L. DAVIES, J. F. ANGUS & M. B. PEOPLES (2004) *Improved subsoil macroporosity following perennial pastures*. *Aust. J. Exp. Agr.*, 44(3): 299–307.
- MCKENZIE, B. M., A. G. BENGOUGH, P. D. HALLETT, W. THOMAS, B. FORSTER & J. MCNICOL (2009) *Deep rooting and drought screening of cereal crops: A novel field-based method and its application*. *Field Crops Res.*, 112(2-3): 165–171.

- McKENZIE, B. M. & A. R. DEXTER (1988) *Radial pressures generated by the earthworm *Aporrectodea rosea**. Biol. Fertil. Soils, 5(4): 328–332.
- McMAHON, M. J. & A. D. CHRISTY (2000) *Root growth, calcite precipitation, and gas and water movement in fractures and macropores: A review with field observations*. Ohio J. Sci., 100(3-4): 88–93.
- MEEK, B. D., W. R. DETAR, E. R. ROLPH & L. M. CARTER (1990) *Infiltration-rate as affected by an alfalfa and no-till cotton cropping system*. Soil Sci. Soc. Am. J., 54(2): 505–508.
- MENG-BEN, W. & Z. QIANG (2009) *Issues in using the WinRHIZO system to determine physical characteristics of plant fine roots*. Acta Ecol. Sin., 29(2): 136–138.
- MITCHELL, A. R., T. R. ELLSWORTH & B. D. MEEK (1995) *Effect of root systems on preferential flow in swelling soil*. Commun. Soil Sci. Plan., 26(15-16): 2655–2666.
- MÜCKENHAUSEN, E. (1985) *Die Bodenkunde und ihre geologischen, geomorphologischen, mineralogischen und petrologischen Grundlagen*. DLG-Verlag, Frankfurt am Main, 3 Auflage.
- NAKAMOTO, T. (1997) *The distribution of maize roots as influenced by artificial vertical macropores*. Jpn. J. Crop Sci., 66(2): 331–332.
- NAUMANN, A., G. HEINE & R. RAUBER (2010) *Efficient discrimination of oat and pea roots by cluster analysis of Fourier transform infrared (FTIR) spectra*. Field Crops Res., 119(1): 78–84.
- NITTA, T. (1991) *Diversity of root fungal floras - its implications for soil-borne diseases and crop growth*. JARQ, 25(1): 6–11.
- NUTTALL, J. G., S. L. DAVIES, R. A. ARMSTRONG & M. B. PEOPLES (2008) *Testing the primer-plant concept: wheat yields can be increased on alkaline sodic soils when an effective primer phase is used*. Aust. J. Agric. Res., 59(4): 331.
- OLESEN, J. E., M. TRNKA, K. C. KERSEBAUM, A. O. SKJELVÅG, B. SEGUIN, P. PELTONEN-SAINIO, F. ROSSI, J. KOZYRA & F. MICALE (2011) *Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change*. Europ. J. Agronomy, 34(2): 96–112.
- PAGENKEMPER, S. K., S. PETH, D. U. PUSCHMANN & R. HORN (2013) *Effects of Root-Induced Biopores on Pore Space Architecture Investigated with Industrial X-Ray Computed Tomography*. In S. H. ANDERSON & J. W. HOPMANS (Hg.), *Soil - Water - Root Processes*, 69–96. Soil Science Society of America, Madison.

- PALTA, J. A., X. CHEN, S. P. MILROY, G. J. REBETZKE, M. F. DRECCER & M. WATT (2011) *Large root systems: are they useful in adapting wheat to dry environments?* Functional Plant Biol., 38(5): 347–354.
- PANKHURST, C., A. PIERRET, B. HAWKE & J. KIRBY (2002) *Microbiological and chemical properties of soil associated with macropores at different depths in a red-duplex soil in NSW Australia.* Plant Soil, 238(1): 11–20.
- PASSIOURA, J. B. (1991) *Soil structure and plant growth.* Aust. J. Soil Res., 29(6): 717–728.
- PASSIOURA, J. B. (2002) *'Soil conditions and plant growth'.* Plant Cell Environ., 25(2): 311–318.
- PÄTZOLD, S., D. VETTERLEIN & R. JAHN (2010) *Bestimmung der Bodenparameter anhand eines Leitprofils in Klein-Altendorf.* Unveröffentlichte Daten.
- PEIGNÉ, J., M. CANNAVACIUOLO, Y. GAUTRONNEAU, A. AVELINE, J. L. GITEAU & D. CLUZEAU (2009) *Earthworm populations under different tillage systems in organic farming.* Soil Till. Res., 104(2): 207–214.
- PELOSI, C., M. BERTRAND & J. ROGER-ESTRADE (2009) *Earthworm community in conventional, organic and direct seeding with living mulch cropping systems.* Agron. Sustain. Dev., 29(2): 287–295.
- PERKONS, U., T. KAUTZ, D. UTEAU, S. PETH, V. GEIER, K. THOMAS, K. LÜTKE HOLZ, M. ATHMANN, R. PUDE & U. KÖPKE (2014) *Root-length densities of various annual crops following crops with contrasting root systems.* Soil Till. Res., 137: 50–57.
- PIERRET, A., C. J. MORAN & C. E. PANKHURST (1999) *Differentiation of soil properties related to the spatial association of wheat roots and soil macropores.* Plant Soil, 211(1): 51–58.
- PIETOLA, L. & L. ALAKUKKU (2005) *Root growth dynamics and biomass input by Nordic annual field crops.* Agr. Ecosyst. Environ., 108(2): 135–144.
- PING, X., G. ZHOU, Q. ZHUANG, Y. WANG, W. ZUO, G. SHI & L. XIANGLEI (2010) *Effects of sample size and position from monolith and core methods on the estimation of total root biomass in a temperate grassland ecosystem in Inner Mongolia.* Geoderma, 155(3-4): 262–268.
- PITKÄNEN, J. & V. NUUTINEN (1997) *Distribution and abundance of burrows formed by Lumbricus terrestris L. and Aporrectodea caliginosa Sav. in the soil profile.* Soil Biol. Biochem., 29(3-4): 463–467.
- POLOMSKI, J. & N. KUHN (2002) *Root research methods.* In Y. WAISEL, A. ESHEL & U. KAFKAFI (Hg.), *Plant roots*, 295–321. M. Dekker, New York.

- PREISSEL, S., M. RECKLING, N. SCHLÄFKE & P. ZANDER (2015) *Magnitude and farm-economic value of grain legume pre-crop benefits in Europe: A review*. *Field Crops Res.*, 175: 64 – 79.
- QIAN, Y. L., J. D. FRY & W. S. UPHAM (1997) *Rooting and drought avoidance of warm-season turfgrasses and tall fescue in Kansas*. *Crop Sci.*, 37(3): 905–910.
- RASSE, D. P. & A. J. SMUCKER (1998) *Root recolonization of previous root channels in corn and alfalfa rotations*. *Plant Soil*, 204(2): 203–212.
- REWALD, B., C. MEINEN, M. TROCKENBRODT, J. E. EPHRATH & S. RACHMILEVITCH (2012) *Root taxa identification in plant mixtures – current techniques and future challenges*. *Plant Soil*, 359(1-2): 165–182.
- RINGROSE-VOASE, A. J. (1996) *Measurement of soil macropore geometry by image analysis of sections through impregnated soil*. *Plant Soil*, 183(1): 27–47.
- ROGER-ESTRADE, J., C. ANGER, M. BERTRAND & G. RICHARD (2010) *Tillage and soil ecology: Partners for sustainable agriculture*. *Soil Till. Res.*, 111(1): 33–40.
- ROSE, T. J., Z. RENGEL, Q. MA & J. W. BOWDEN (2009) *Crop species differ in root plasticity response to localised P supply*. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 172(3): 360–368.
- SAWILOWSKY, S. S. (1990) *Nonparametric Tests of Interaction in Experimental Design*. *Rev. Educ. Res.*, 60(1): 91–126.
- VAN SCHAIK, L., J. PALM, J. KLAUS, E. ZEHE & B. SCHRÖDER (2013) *Linking spatial earthworm distribution to macropore numbers and hydrological effectiveness*. *Ecohydrol.*, n/a.
- SCHEFFER, F. & P. SCHACHTSCHABEL (1984) *Lehrbuch der Bodenkunde*. Enke, Stuttgart, 11 Auflage.
- SESSOUS, G. & H. SCHELL (1938) *Was ist beim Anbau der Futtermalve zu beachten?* *Mittl. f. d. Landwirtschaft*, 53(27): 613–614.
- SHIPITALO, M. J. (1988) *Effect of diet on the feeding and casting activity of Lumbricus terrestris and L. rubellus in laboratory culture*. *Soil Biol. Biochem.*, 20(2): 233.
- SHIPITALO, M. J., W. A. DICK & C. A. EDWARDS (2000) *Conservation tillage and macropore factors that affect water movement and the fate of chemicals*. *Soil Till. Res.*, 53(3): 167–183.
- SHIPITALO, M. J. & R.-C. LE BAYON (2004) *Quantifying the effects of earthworms on soil aggregation and porosity*. In C. A. EDWARDS (Hg.), *Earthworm Ecology*, 183–200. CRC Press, Boca Raton.

- SILVER, W. L., R. RYALS & V. EVINER (2010) *Soil Carbon Pools in California's Annual Grassland Ecosystems*. *Rangeland Ecol. Manag.*, 63(1): 128–136.
- SKINNER, R. H., D. L. GUSTINE & M. A. SANDERSON (2004) *Growth, water relations, and nutritive value of pasture species mixtures under moisture stress*. *Crop Sci.*, 44(4): 1361–1369.
- SMIT, A. L., A. G. BENGOUGH, C. ENGELS, M. VAN NOORDWIJK, S. PELLERIN & S. C. VAN DE GEIJN (Hg.) (2000a) *Root Methods: A Handbook*. Springer, Berlin.
- SMIT, A. L., E. GEORGE & J. GROENWOLD (2000b) *Root observations and measurements at (transparent) interfaces with soil*. In A. L. SMIT, A. G. BENGOUGH, C. ENGELS, M. VAN NOORDWIJK, S. PELLERIN & S. C. VAN DE GEIJN (Hg.), *Root Methods*, 235–271. Springer, Berlin.
- SPONAGEL, H. (2005) *Bodenkundliche Kartieranleitung: Mit 41 Abbildungen, 103 Tabellen und 31 Listen*. Schweizerbart, Stuttgart, 5 Auflage.
- SPRINGETT, J. & R. GRAY (1997) *The interaction between plant roots and earthworm burrows in pasture*. *Soil Biol. Biochem.*, 29(3-4): 621–625.
- STEINGROBE, B., H. SCHMID & N. CLAASSEN (2000) *The use of the ingrowth core method for measuring root production of arable crops - influence of soil conditions inside the ingrowth core on root growth*. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 163(6): 617–622.
- STEWART, J. B., C. J. MORAN & J. T. WOOD (1999) *Macropore sheath: quantification of plant root and soil macropore association*. *Plant Soil*, 211(1): 59–67.
- STIRZAKER, R. J., J. B. PASSIOURA & Y. WILMS (1996) *Soil structure and plant growth: impact of bulk density and biopores*. *Plant Soil*, 185(1): 151–162.
- STROMBERGER, M. E., A. M. KEITH & O. SCHMIDT (2012) *Distinct microbial and faunal communities and translocated carbon in Lumbricus terrestris drilospheres*. *Soil Biol. Biochem.*, 46: 155–162.
- STUMM, C. & U. KÖPKE (2015) *Optimierung des Futterleguminosenanbaus im viehlosen Acker- und Gemüsebau*. In A. M. HÄRING, B. HÖRNING & R. HOFFMANN-BAHNSEN (Hg.), *Beiträge zur 13. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau*, 311–314. Köster, Berlin.
- STÜRĪTE, I., T. M. HENRIKSEN & T. A. BRELAND (2005) *Distinguishing between metabolically active and inactive roots by combined staining with 2, 3, 5-triphenyltetrazolium chloride and image colour analysis*. *Plant and Soil*, 271(1-2): 75–82.

- SUN, T., Z. MAO, L. DONG, L. HOU, Y. SONG & X. WANG (2013) *Further evidence for slow decomposition of very fine roots using two methods: litterbags and intact cores*. Plant Soil, 366(1-2): 633–646.
- TEBRÜGGE, F. & R.-A. DÜRING (1999) *Reducing tillage intensity - a review of results from a long-term study in Germany*. Soil Till. Res., 53(1): 15–28.
- THOMAS, E. (2006) *Feldversuchswesen*. Ulmer, Stuttgart.
- THOMAS, K. (2012) *Wurzelentwicklung von Wintergerste (*Hordeum vulgare* L.) und Winter-raps (*Brassica napus* L.) in Fruchtfolgen mit perennierenden Futterpflanzen*. Diplomarbeit, Universität Bonn.
- THORUP-KRISTENSEN, K. (2006) *Effect of deep and shallow root systems on the dynamics of soil inorganic N during 3-year crop rotations*. Plant Soil, 288(1-2): 233–248.
- THORUP-KRISTENSEN, K., M. S. CORTASA & R. LOGES (2009) *Winter wheat roots grow twice as deep as spring wheat roots, is this important for N uptake and N leaching losses?* Plant Soil, 322(1-2): 101–114.
- TIUNOV, A. V. & S. SCHEU (1999) *Microbial respiration, biomass, biovolume and nutrient status in burrow walls of *Lumbricus terrestris* L. (Lumbricidae)*. Soil Biol. Biochem., 31(14): 2039–2048.
- UNGER, P. W. & O. R. JONES (1998) *Long-term tillage and cropping systems affect bulk density and penetration resistance of soil cropped to dryland wheat and grain sorghum*. Soil Till. Res., 45(1–2): 39–57.
- UTEAU, D., S. K. PAGENKEMPER, S. PETH & R. HORN (2013) *Root and time dependent soil structure formation and its influence on gas transport in the subsoil*. Soil Till. Res., 132: 69–76.
- VALCKX, J., A. C. PINA, G. GOVERS, M. HERMY & B. MUYS (2011) *Food and habitat preferences of the earthworm *Lumbricus terrestris* L. for cover crops*. Pedobiologia, 54(Supplement, 9th International Symposium on Earthworm Ecology, Xalapa, Veracruz, Mexico, 5th – 10th September 2010): 139–144.
- VEIHMEYER, F. J. & A. H. HENDRICKSON (1948) *Soil Density and Root Penetration*. Soil Sci., 65(6): 487–493.
- VOESENEK, L. A. C. J., T. D. COLMER, R. PIERIK, F. F. MILLENAAR & A. J. M. PEETERS (2006) *How plants cope with complete submergence*. New Phytol., 170(2): 213–226.
- VOLKMAR, K. M. & T. ENTZ (1995) *A method for characterizing the effect of root-formed pores on growth of roots in a Chernozemic clay loam*. Can. J. Soil Sci., 75(3): 293–298.

- WASEL, Y. & A. ESHEL (2002) *Functional diversity of various constituents of a single root system*. In Y. WASEL, A. ESHEL & U. KAFKAFI (Hg.), *Plant roots*. M. Dekker, New York.
- WANG, J., J. D. HESKETH & J. T. WOOLLEY (1986) *Preexisting channels and soybean rooting patterns*. *Soil Sci.*, 141(6): 432–437.
- WATT, M., J. A. KIRKEGAARD & G. J. REBETZKE (2005) *A wheat genotype developed for rapid leaf growth copes well with the physical and biological constraints of unploughed soil*. *Functional Plant Biol.*, 32(8): 695–706.
- WATT, M., L. J. MAGEE & M. E. MCCULLY (2008) *Types, structure and potential for axial water flow in the deepest roots of field-grown cereals*. *New Phytol.*, 178(1): 135–146.
- WATT, M., W. K. SILK & J. B. PASSIOURA (2006) *Rates of root and organism growth, soil conditions, and temporal and spatial development of the rhizosphere*. *Ann. Bot-London*, 97(5): 839–855.
- WEAVER, J. E. (1926) *Root development of field crops*. McGraw-Hill Book Co, New York.
- WEST, J. B., J. F. ESPELETA & L. A. DONOVAN (2004) *Fine root production and turnover across a complex edaphic gradient of a Pinus palustris-Aristida stricta savanna ecosystem*. *Forest Ecol. Manag.*, 189(1-3): 397–406.
- WHITE, P. J., T. S. GEORGE, P. J. GREGORY, A. G. BENGOUGH, P. D. HALLETT & B. M. MCKENZIE (2013) *Matching roots to their environment*. *Ann. Bot-London*, 112(2): 207–222.
- WHITE, R. G. & J. A. KIRKEGAARD (2010) *The distribution and abundance of wheat roots in a dense, structured subsoil - implications for water uptake*. *Plant Cell Environ.*, 33(2): 133–148.
- WILDUNG, R. E., T. R. GARLAND & R. L. BUSCHBOM (1975) *Interdependent effects of soil temperature and water-content on soil respiration rate and plant root decomposition in arid grassland soils*. *Soil Biol. Biochem.*, 7(6): 373–378.
- WUEST, S. B. (2001) *Soil biopore estimation: effects of tillage, nitrogen, and photographic resolution*. *Soil Till. Res.*, 62(3-4): 111–116.
- YUNUSA, I. A., P. M. MELE, M. A. RAB, C. R. SCHEFE & C. R. BEVERLY (2002) *Priming of soil structural and hydrological properties by native woody species, annual crops, and a permanent pasture*. *Aust. J. Soil Res.*, 40(2): 207–219.
- ZALLER, J. G. & U. KÖPKE (2004) *Effects of traditional and biodynamic farmyard manure amendment on yields, soil chemical, biochemical and biological properties in a long-term field experiment*. *Biol. Fertil. Soils*, 40(4): 222–229.

ZIMMERMAN, R. P. (1961) *Effect of bulk density on root growth*. Soil Sci., 91(4): 280–288.



## 6.2. Abbildungsverzeichnis

1.	<b>Mittlerer Niederschlag</b> im Vergleich zum langjährigen Mittel ( $\varnothing$ 1956-2010).	14
2.	<b>Mittlere Temperatur</b> im Vergleich zum langjährigen Mittel ( $\varnothing$ 1956-2010).	15
3.	<b>Versuchsplan</b> zum Ende der Vorfruchtphase von Versuch A im Versuchsjahr 2009. . . . .	17
4.	<b>Zählrahmen</b> mit 5 × 5 cm-Gitter an einer fertig vorbereiteten Profilwand in Futtermalve. Versuch A, 06.07.2010. . . . .	20
5.	Einfaches <b>Stahlblech mit Schlagverstärkung</b> und <b>Entnahmeggerät</b> aus geschärften Stahlblechen mit der Abmessung 25 × 10 (× 10 cm). . . . .	21
6.	<b>Wurzellängendichte</b> der Vorfrüchte <b>Luzerne, Wegwarte</b> und <b>Rohrschwengel</b> in Abhängigkeit von der Anbaudauer und der Bodentiefenklasse. Versuch B, 19.09.2011–29.09.2011, Profilwandmethode. . . . .	29
7.	<b>Bioporendichte</b> [offene Poren·m <sup>-2</sup> ] in Abhängigkeit von der Porendurchmesserklasse (2–5 mm und > 5 mm) und der Vorfrucht-Variante in 45 cm Bodentiefe. Versuch A, Frühjahr 2012. . . . .	30
8.	<b>Differenz-Bioporendichte</b> [Poren·m <sup>-2</sup> ] der Bioporen mit Durchmesser 2–5 mm und Bioporen > 5 mm in Abhängigkeit von der Vorfrucht-Variante in 45 cm Bodentiefe. Die Bioporendichte wurde jeweils auf die Bioporendichte der Variante Rs1 bezogen. Versuch A, Frühjahr 2010 und 2012. . . . .	32
9.	<b>Bioporendichte</b> [offene Poren·m <sup>-2</sup> ] in den Porendurchmesserklassen 2–5 mm und > 5 mm in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der Vorfrucht-Variante. Versuch A, 27.06.–19.07.2011. . . . .	34
10.	<b>Bioporendichte</b> [kontinuierliche Poren·m <sup>-2</sup> ] in den Porendurchmesserklassen 2–5 mm und > 5 mm in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der Vorfrucht-Variante. Versuch A, 27.06.–19.07.2011. . . . .	37
11.	<b>Abundanz und Biomasse von <i>Lumbricus terrestris</i></b> in Abhängigkeit von der Kulturart und der Anbaudauer. Versuch A, 06.10.2009 und 18.11.2009. .	38
12.	<b>Abundanz und Biomasse von <i>Lumbricus terrestris</i></b> in Abhängigkeit von der Kulturart und der Anbaudauer. Versuch B, 29.09.2010 und 21.10.2010. .	39
13.	<b>Abundanz und Biomasse von <i>Lumbricus terrestris</i></b> in Abhängigkeit von der Kulturart und der Anbaudauer. Versuch B, 22.09.2011. . . . .	40
14.	<b>Abundanz und Biomasse von <i>Lumbricus terrestris</i></b> in Abhängigkeit von der Kulturart und der Anbaudauer. Aufgeschlüsselt nach großen (> 2 g) und kleinen Individuen (< 2 g). Versuch B, 21.10.2010. . . . .	41
15.	<b>Wurzellänge von Sommerweizen</b> in Abhängigkeit von BBCH-Stadium, Bodentiefenklasse und Vorfrucht-Variante. Versuch A, 31.05.–30.07.2010, Profilwandmethode. . . . .	44

16.	<b>Wurzellängendichte von Sommerweizen</b> in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der Vorfrucht-Variante. Versuch A, 13.07.–16.07.2010 und 27.07.–30.07.2010, Profilwandmethode. . . . .	47
17.	<b>Wurzellängendichte von Sommerweizen</b> in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der Vorfrucht-Variante. Versuch A, 03.08.–05.08.2010, Monolithmethode. . . . .	48
18.	<b>Wurzellänge von Futtermalve</b> in Abhängigkeit von Untersuchungstermin, Bodentiefenklasse und Vorfrucht-Variante. Versuch A, 05.07.–20.08.2010, Profilwandmethode. . . . .	49
19.	<b>Wurzellängendichte von Futtermalve</b> in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der Vorfrucht-Variante. Versuch A, 03.08.–05.08.2010 und 18.08.–20.08.2010, Profilwandmethode. . . . .	51
20.	<b>Wurzellänge von Wintergerste</b> in Abhängigkeit von BBCH-Stadium, Bodentiefenklasse und Vorfrucht-Variante. Versuch A, 04.04.–08.07.2011, Profilwandmethode. . . . .	52
21.	<b>Wurzellängendichte von Wintergerste</b> in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der Vorfrucht-Variante. Versuch A, 10.06.–16.06.2011 und 01.07.–08.07.2011, Profilwandmethode. . . . .	54
22.	<b>Wurzellängendichte von Wintergerste und Winterraps</b> 2011 in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der Vorfrucht-Variante. Versuch A, 14.06.–21.06.2011 und 28.06.–01.07.2011, Monolithmethode. . . . .	55
23.	<b>Wurzellänge von Winterraps</b> in Abhängigkeit von BBCH-Stadium, Bodentiefenklasse und Vorfrucht-Variante. Versuch A, 26.03.–19.06.2012, Profilwandmethode. . . . .	56
24.	<b>Wurzellängendichte von Winterraps</b> in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der Vorfrucht-Variante. Versuch A, 29.05.–01.06.2012 und 11.06.–19.06.2012, Profilwandmethode. . . . .	57
25.	<b>Wurzellängendichte in Bioporen von Sommerweizen</b> in Abhängigkeit von der Bodentiefe und dem Entwicklungsstadium. Wurzellängendichte in Bioporen und prozentualer Anteil von Wurzeln in Bioporen an der Gesamt-Wurzellängendichte. Versuch A, 31.05.–30.07.2010, Profilwandmethode. . . . .	59
26.	<b>Wurzellängendichte in Bioporen von Futtermalve</b> in Abhängigkeit von der Bodentiefe und dem Untersuchungstermin. Wurzellängendichte in Bioporen und prozentualer Anteil von Wurzeln in Bioporen an der Gesamt-Wurzellängendichte. Versuch A, 05.07.–20.08.2010, Profilwandmethode. . . . .	60
27.	<b>Wurzellängendichte in Bioporen von Wintergerste</b> in Abhängigkeit von der Bodentiefe und dem Entwicklungsstadium. Wurzellängendichte in Bioporen und prozentualer Anteil von Wurzeln in Bioporen an der Gesamt-Wurzellängendichte. Versuch A, 04.04.–08.07.2011, Profilwandmethode. . . . .	61

28.	<b>Wurzellängendichte in Bioporen von Winterraps</b> in Abhängigkeit von der Bodentiefe und dem Entwicklungsstadium. Wurzellängendichte in Bioporen und prozentualer Anteil von Wurzeln in Bioporen an der Gesamt-Wurzellängendichte. Versuch A, 26.03.–19.06.2012, Profilwandmethode. . . . .	62
29.	<b>Gesamt-Wurzellängendichte und Wurzellängendichte in Bioporen und <i>bulk</i>-Boden von Wintergerste</b> in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der Vorfrucht-Variante. Versuch A, 27.06.–19.07.2011, Färbemonolithmethode. .	65
30.	<b>Wurzellänge je Biopore von Wintergerste</b> in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der Vorfrucht-Variante. Versuch A, 27.06.–19.07.2011, Färbemonolithmethode. . . . .	73
31.	<b>Beziehung zwischen der Wurzellängendichte und der Wurzelmasse von Wintergerste</b> (BBCH 89–92: 08.07.2011) und <b>Winterraps</b> (BBCH 51–52: 28.03.2012, BBCH 68: 09.05.2012, BBCH 76: 23.05.2012 und BBCH 78: 01.06.2012). Monolithmethode. . . . .	77
32.	<b>Abundanz und Biomasse von <i>Lumbricus terrestris</i></b> in Abhängigkeit von der Kulturart und der Anbaudauer. Versuch A, 19.10.2010 und 03.11.2010. .	78
33.	<b>Abundanz und Biomasse von <i>Lumbricus terrestris</i></b> in Abhängigkeit von der Kulturart und der Anbaudauer. Aufgeschlüsselt nach großen (> 2 g) und kleinen Individuen (< 2 g). Versuch A, 03.11.2010. . . . .	79
34.	<b>Faktor zur Umrechnung der Wurzellängendichte der Vorfrüchte von der Profilwandmethode in die Monolithmethode</b> in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der Vorfrucht-Variante. Versuch B, 19.–29.09.2011. . . .	80
35.	<b>Faktor zur Umrechnung der Wurzellängendichte von Sommerweizen von der Profilwandmethode in die Monolithmethode</b> in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der Vorfrucht-Variante. Versuch A. Profilwandmethode: 27.–30.07.2010. Monolithmethode: 03.–05.08.2010. . . . .	82
36.	<b>Faktor zur Umrechnung der Wurzellängendichte von Wintergerste 2011 und Winterraps 2012 von der Profilwandmethode in die Monolithmethode</b> in Abhängigkeit von der Bodentiefe und dem Untersuchungstermin. Versuch A. . . . .	83
37.	<b>Aufsicht auf eine für die Erfassung der Bioporendichte vorbereitete Fläche in 105 cm Bodentiefe.</b> Die Bioporen wurden durch die Anwendung der Färbemonolithmethode mit Methylenblau und Neutralrot angefärbt. 12.07.2011, Färbemonolithmethode. Parzelle 76, Vorfrucht-Variante Ww2. .	84
1.	<b>Wurzellängendichte von Sommerweizen und Futtermalve</b> in Abhängigkeit von der Bodentiefe und dem Untersuchungstermin. WLD gemittelt über Vorfrucht-Varianten. Versuch A, Profilwandmethode. . . . .	129
2.	<b>Wurzellängendichte von Wintergerste und Winterraps</b> in Abhängigkeit von der Bodentiefe und dem Entwicklungsstadium. WLD gemittelt über Vorfrucht-Varianten. Versuch A, Profilwandmethode. . . . .	130

3.	<b>Wurzellängendichte</b> von <b>Sommerweizen</b> in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der Vorfrucht-Variante. Versuch A, 13.07.–16.07.2010 und 27.07.–30.07.2010, Profilwandmethode. . . . .	131
4.	<b>Wurzellängendichte</b> von <b>Futtermalve</b> in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der Vorfrucht-Variante. Versuch A, 03.08.–05.08. und 18.08–20.08.2010, Profilwandmethode. . . . .	132
5.	<b>Wurzellängendichte in Bioporen von Sommerweizen</b> in Abhängigkeit von der Bodentiefe und dem Entwicklungsstadium. WLD über Vorfrucht-Varianten gemittelt. Versuch A, 31.05.–30.07.2010, Profilwandmethode. . . . .	135
6.	<b>Wurzellängendichte in Bioporen von Futtermalve</b> in Abhängigkeit von der Bodentiefe und dem Untersuchungstermin. WLD über Vorfrucht-Varianten gemittelt. Versuch A, 05.07.–20.08.2010, Profilwandmethode. . . . .	136
7.	<b>Wurzellängendichte in Bioporen von Wintergerste</b> in Abhängigkeit von der Bodentiefe und dem Entwicklungsstadium. WLD über Vorfrucht-Varianten gemittelt. Versuch A, 04.04.–08.07.2011, Profilwandmethode. . . . .	137
8.	<b>Wurzellängendichte in Bioporen von Winterraps</b> in Abhängigkeit von der Bodentiefe und dem Entwicklungsstadium (BBCH-Stadium). WLD über Vorfrucht-Varianten gemittelt. Versuch A, 26.03.–19.06.2012, Profilwandmethode. . . . .	138
9.	<b>Prozentualer Anteil der Wurzellängendichte in Bioporen bezogen auf die Gesamt-WLD von Luzerne, Wegwarte und Rohrschwengel</b> in Abhängigkeit von der Bodentiefe. Versuch B, 19.09.2011–29.09.2011. Profilwandmethode. . . . .	139

## 6.3. Tabellenverzeichnis

1.	<b>Lagerungsdichte, organischer Kohlenstoffgehalt und Textur als Funktion der Bodentiefe.</b> . . . . .	13
2.	<b>Variantenübersicht.</b> . . . . .	16
3.	<b>Anteil der Gesamt-Wurzellänge im Ap-Horizont, Gesamt-Wurzellänge und Durchwurzelungstiefe der Vorfrucht-Varianten.</b> Versuch B, 19.09.–29.09.2011, Profilwandmethode. . . . .	28
4.	<b>Bioporendichte</b> [ $\text{Poren}\cdot\text{m}^{-2}$ ] in Abhängigkeit von der Kulturart und der Anbaudauer in 45 cm Bodentiefe. Die Bioporendichte wird in offene Poren, mit Bodenmaterial oder Regenwurmkot verfüllte Poren und gesamte Poren unterteilt dargestellt. Versuch A, Frühjahr 2012. . . . .	31
5.	<b>Anteil der Wurzellänge in sechs Durchmesserklassen und der durchschnittliche Durchmesser der Vorfrucht-Varianten.</b> Versuch B, 27.09.2011–04.10.2011. Monolithmethode in den Bodentiefen von 45–105 cm. . . . .	33
6.	<b>Wurzellänge</b> [ $\text{km}\cdot\text{m}^{-2}$ ] und <b>Anzahl Wurzelstücke von je 10 cm Länge</b> mit einem Wurzeldurchmesser $> 2$ mm von <b>Luzerne, Wegwarte</b> und <b>Rohrschwengel</b> in Abhängigkeit von der Bodentiefe. Versuch B, 27.09.2011–04.10.2011. Monolithmethode in den Bodentiefen von 45–105 cm. . . . .	36
7.	<b>Anteil verfüllter Poren an der Gesamtporenabundanz</b> in Abhängigkeit vom Porendurchmesser und der Vorfrucht-Variante in 45 cm Bodentiefe. Versuch A, Frühjahr 2012. . . . .	43
8.	<b>Gesamt-Wurzellänge</b> [ $\text{km}\cdot\text{m}^{-2}$ ], <b>Anteil der Wurzellänge im Ap-Horizont</b> und <b>Durchwurzelungstiefe von Sommerweizen</b> in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium und der Vorfrucht-Variante. Versuch A, 31.05.–30.07.2010, Profilwandmethode. . . . .	45
9.	<b>Gesamt-Wurzellänge</b> [ $\text{km}\cdot\text{m}^{-2}$ ], <b>Anteil der Wurzellänge im Ap-Horizont</b> und <b>Durchwurzelungstiefe von Futtermalve</b> in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium und der Vorfrucht-Variante. Versuch A, 06.07.–20.08.2010, Profilwandmethode. . . . .	50
10.	<b>Gesamt-Wurzellänge</b> [ $\text{km}\cdot\text{m}^{-2}$ ], <b>Anteil der Wurzellänge im Ap-Horizont</b> und <b>Durchwurzelungstiefe von Wintergerste</b> in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium und der Vorfrucht-Variante. Versuch A, 04.04.–08.07.2011, Profilwandmethode. . . . .	53
11.	<b>Gesamt-Wurzellänge</b> [ $\text{km}\cdot\text{m}^{-2}$ ], <b>Anteil der Wurzellänge im Ap-Horizont</b> und <b>Durchwurzelungstiefe von Winterraps</b> in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium und der Vorfrucht-Variante. Versuch A, 26.03.–19.06.2012, Profilwandmethode. . . . .	56

12.	<b>Anteil der Oberfläche von Bioporen an der untersuchten horizontalen Bodenfläche</b> sowie <b>absolute und relative WLD in Bioporen von Wintergerste</b> in Abhängigkeit von der Vorfrucht-Variante und der Bodentiefe. Versuch A, 27.06.–19.07.2011, Färbemonolithmethode. . . . .	66
13.	<b>Absolute und relative Wurzellängendichte in Bioporen.</b> Vergleich der Sommerungen <b>Sommerweizen 2010</b> und <b>Futtermalve 2010</b> sowie der Winterungen <b>Wintergerste 2011</b> und <b>Winterraps 2012</b> zu zwei Untersuchungs-terminen. Profilwandmethode. . . . .	68
14.	<b>Absolute Wurzellängendichte in Bioporen und prozentualer Anteil von Wurzeln in Bioporen an der Gesamt-WLD von Sommerweizen</b> in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium, der Bodentiefe und der Vorfrucht-Variante. Versuch A, 31.05.–30.07.2010, Profilwandmethode. . . . .	69
15.	<b>Absolute Wurzellängendichte in Bioporen und prozentualer Anteil von Wurzeln in Bioporen an der Gesamt-WLD von Futtermalve</b> in Abhän-gigkeit vom Entwicklungsstadium, der Bodentiefe und der Vorfrucht-Variante. Versuch A, 05.07.–20.08.2010, Profilwandmethode. . . . .	70
16.	<b>Absolute Wurzellängendichte in Bioporen und prozentualer Anteil von Wurzeln in Bioporen an der Gesamt-WLD von Wintergerste</b> in Abhän-gigkeit vom Entwicklungsstadium, der Bodentiefe und der Vorfrucht-Variante. Versuch A, 04.04.–08.07.2011, Profilwandmethode. . . . .	71
17.	<b>Absolute Wurzellängendichte in Bioporen und prozentualer Anteil von Wurzeln in Bioporen an der Gesamt-WLD von Winterraps</b> in Abhän-gigkeit vom Entwicklungsstadium, der Bodentiefe und der Vorfrucht-Variante. Versuch A, 26.03.–19.06.2012, Profilwandmethode. . . . .	72
18.	<b>Prozentuale Verteilung der Wurzellänge auf sechs Durchmesserklas-sen und mittlerer Durchmesser von Wintergerste (14.06.–21.06.2011) und Winterraps (28.06.–01.07.2011)</b> in Abhängigkeit der Bodentiefe und von der Vorfrucht-Variante. Versuch A, Monolithmethode. . . . .	75
1.	<b>Mittlerer Niederschlag und mittlere Temperatur</b> im Vergleich zum lang-jährigen Mittel ( $\varnothing$ 1956-2010). . . . .	122
2.	<b>Ackerbauliche Maßnahmen in Versuch A.</b> . . . . .	123
3.	<b>BBCH-Stadien</b> der Nachfrüchte Sommerweizen, Futtermalve, Wintergerste, Winterraps und Winterroggen. Versuch A. . . . .	124
4.	<b>Übersicht der Wurzeluntersuchungen</b> nach Untersuchungszeitraum. . . .	125
5.	<b>Angaben zur Monolithentnahme:</b> Versuchsjahr, beprobte Varianten, Ent-nahmetechnik, Volumen des entnommenen Monoliths, Wiederholungen je Tiefenstufe, beprobte Bodentiefe, Beprobungstermine und die daraus resultie-rende Anzahl Monolithe. . . . .	126
6.	<b>Arbeitseinstellungen des Scanners Epson Expression V700.</b> . . . . .	126

---

7.	<b>Arbeitseinstellungen bei der Analyse</b> mit dem Computerprogramm WinRHIZO Pro Version 2009c. . . . .	127
8.	<b>Übersicht der Regenwurm-Untersuchungen.</b> . . . . .	127
9.	<b>Übersicht der Bioporen-Untersuchungen.</b> . . . . .	128
10.	<b>Anteil der Wurzellänge von Luzerne, Wegwarte und Rohrschwengel in den verschiedenen Durchmesserklassen und der mittlere Durchmesser</b> in Abhängigkeit von der Bodentiefe. Versuch B, 27.09.2011–04.10.2011. Monolithmethode in den Bodentiefen von 45–105 cm. . . . .	128
11.	<b>Prozentuale Verteilung der Wurzellänge auf sechs Durchmesserklassen und mittlerer Durchmesser</b> von <b>Wintergerste</b> mit der Vorfrucht Ww2 in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium und der Bodentiefe. Versuch A, 05.05–08.07.2011, Monolithmethode. . . . .	133
12.	<b>Prozentuale Verteilung der Wurzellänge auf sechs Durchmesserklassen und mittlerer Durchmesser</b> von <b>Winterraps</b> mit der Vorfrucht Ww2 in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium und der Bodentiefe. Versuch A, 28.03.–19.06.2012, Monolithmethode. . . . .	134

# Anhang

**Anhang-Tab. 1: Mittlerer Niederschlag und mittlere Temperatur** im Vergleich zum langjährigen Mittel ( $\emptyset$  1956-2010). Gemessen an der Wetterstation Campus Klein-Altendorf (in direkter Nähe zum Versuch in Obstanlagen).

Monat	mittlerer Niederschlag [mm]				mittlere Temperatur [°C]				
	2010	2011	2012	$\emptyset$	2010	2011	2012	$\emptyset$	
Jan	22,8	35,9	86,0	34,4	Jan	-1,6	2,7	4,0	1,8
Feb	20,6	18,4	19,2	34,7	Feb	1,4	3,8	-0,6	2,3
Mrz	40,5	7,9	10,5	42,6	Mrz	5,6	6,5	8,1	5,4
Apr	7,9	22,0	33,9	44,4	Apr	9,4	12,6	8,7	8,5
Mai	55,6	30,1	49,2	58,4	Mai	10,7	14,5	14,5	12,8
Jun	37,4	123,3	58,5	65,7	Jun	16,7	16,5	15,3	15,7
Jul	65,1	31,5	89,3	65,8	Jul	20,3	16,0	17,2	17,4
Aug	157,9	89,6	46,8	67,2	Aug	17,0	17,8	19,0	17,0
Sep	53,7	25,8	18,0	53,6	Sep	13,0	16,2	13,6	13,8
Okt	35,6	41,8	99,9	45,5	Okt	9,2	10,7	9,9	10,0
Nov	59,3	1,5	22,1	48,7	Nov	6,0	6,7	6,3	5,5
Dez	51,1	116,8	68,7	42,4	Dez	-1,9	5,5	3,8	2,4
$\Sigma$	607,5	544,6	602,1	603,4	$\emptyset$	8,8	10,8	10,0	9,4

## Anhang-Tab. 2: Ackerbauliche Maßnahmen in Versuch A.

Datum	ackerbauliche Maßnahme
10.04.2007	Saatbettbereitung
12.04.2007	Aussaat 3-jährige Futterpflanzen, Sommerroggen
26.02.2008	Grundbodenbearbeitung
06./07.05.2008	Saatbettbereitung, Aussaat 2-jährige Futterpflanzen, Hafer
17.03.2009	Grundbodenbearbeitung
15./16.04.2009	Saatbettbereitung, Aussaat 1-jährige Futterpflanzen, Sommerroggen
20.04.2009	Düngung Ww1 und Rs1 (50 kg N·ha <sup>-1</sup> , KAS)
10.03.2010	Umbruch der Futterpflanzen
08.04.2010	Aussaat Sommerweizen, 400 Körner·m <sup>-2</sup>
14.04.2010	Düngung Lu1 68 kg N·ha <sup>-1</sup> , Lu2 15 kg N·ha <sup>-1</sup> , übrige 77 kg N·ha <sup>-1</sup> (KAS)
21.05.2010	Aussaat Futtermalve, 12 kg·ha <sup>-1</sup>
30.07.2010	Schnitt Futtermalve
13.08.2010	Ernte Sommerweizen
20.08.2010	Grubbern
25.08.2010	Grubbern, Grundbodenbearbeitung, Saatbettbereitung, Aussaat Winterraps
17.09.2010	Saatbettbereitung, erneute Aussaat Winterraps, 80 Körner·m <sup>-2</sup>
07.10.2010	Aussaat Wintergerste, 310 Körner·m <sup>-2</sup>
11.03.2011	Düngung Winterraps, nach Lu 58 kg N·ha <sup>-1</sup> , übrige 83 kg N·ha <sup>-1</sup> (KAS)
11.03.2011	Düngung Wintergerste, nach Lu 19–38 kg N·ha <sup>-1</sup> , übrige 63 kg N·ha <sup>-1</sup> (KAS)
11.07.2011	Ernte Wintergerste
12.07.2011	Ernte Winterraps
28.07.2011	Stoppelbearbeitung, Grubbern
05.08.2011	restliche Gruben verfüllt, Grubbern
18.08.2011	Kreiselegge
22.08.2011	Grundbodenbearbeitung
24.08.2011	Saatbettbereitung, Aussaat Winterraps
31.08.2011	Walzen Rapsparzellen
05.09.2011	Saatbettbereitung, erneute Aussaat Winterraps, 60 Körner·m <sup>-2</sup>
30.09.2011	Eggen Winterroggenparzellen
05.10.2011	Aussaat Winterroggen, 230 Körner·m <sup>-2</sup>
07.03.2012	Düngung Winterraps 75 kg N·ha <sup>-1</sup> (ASS)
15.03.2012	Düngung Winterroggen 50 kg N·ha <sup>-1</sup> (ASS)
10.07.2012	Ernte Winterraps
26.07.2012	Ernte Winterroggen

**Anhang-Tab. 3: BBCH-Stadien** der Nachfrüchte Sommerweizen (W), Futtermalve (M), Wintergerste (G), Winterraps (Ra) und Winterroggen (Ro). Versuch A.

Datum	W	M	Datum	G	Ra	Datum	Ro	Ra
08.04.2010	0		17.09.2010		0	05.09.2011		0
11.05.2010	21		29.09.2010		10	13.09.2011		10
21.05.2010		0	07.10.2010	0	11/12	19.09.2011		11
26.05.2010	25		14.10.2010		12/13	05.10.2011	0	
31.05.2010	33		03.11.2010	12	14	12.10.2011		15
09.06.2010		11/12	17.11.2010	14	15	17.10.2011	10	
14.06.2010	55		18.01.2010	21		07.03.2012		14
17.06.2010	58		17.02.2011	22	15	15.03.2012	25	
21.06.2010	59		22.03.2011	25		27.03.2012		51/52
23.06.2010	65		24.03.2011		30	28.03.2012		53
28.06.2010	68		29.03.2011	27	32	05.04.2012		59/61
06.07.2010		60	29.03.2011	29/30		13.04.2012		60/61
13.07.2010	83		05.04.2011	29/30	50	18.04.2012	31/32	
14.07.2010		65	06.04.2011		51	27.04.2012	34/37	65
27.07.2010	89		14.04.2011		57/59	11.05.2012	59	68
30.07.2010		09	18.04.2011	31/32		29.05.2012	69	76/78
02.08.2010		11/12	19.04.2011	32		22.06.2012	77/80	80
13.08.2010	99		21.04.2011		65	10.07.2012		99
			04.05.2011		66	26.07.2012	99	
			05.05.2011	47/49				
			19.05.2011	59/62				
			01.06.2011	84/85	79			
			11.07.2011	99				
			12.07.2011		99			

**Anhang-Tab. 4: Übersicht der Wurzeluntersuchungen** nach Untersuchungszeitraum: Untersuchungstermin der Profilwandmethode (T), BBCH-Stadium (BBCH) und maximale Untersuchungstiefe [cm] (BT). Methoden (MT): P=Profilwandmethode, M=Monolithmethode, FM=Färbemonolithe. Kulturarten (Art): W=Sommerweizen, M=Futtermalve, G=Wintergerste, Ra=Winterraps, VF=Vorfrüchte. Bearbeiter ☆=Vanessa Geier und △=Katharina Thomas. Alle Untersuchungen erfolgten in Versuch A, Block I und II, sofern nicht gesondert angegeben.

	Zeitraum	T	BBCH	BT	MT	Art	Varianten
2010	31.05. – 02.06	1	33	50	P	W	3, 6, 9, 12, 15, 18, 21
	14.06. – 17.06	2	55-58	80	P	W	3, 6, 9, 12, 15, 18, 21
	28.06. – 30.06	3	68	80	P	W	3, 6, 9, 12, 15, 18, 21
	13.07. – 16.07	4	83	80	P	W	3, 6, 9, 12, 15, 18, 21
	27.07. – 30.07	5	89	160	P	W	3, 6, 9, 12, 15, 18, 21
	03.08. – 05.08 ☆			105	M	W	6, 15, 21
	05.07. – 06.07	1	12	80	P	M	1, 4, 10, 13, 19
	20.07. – 22.07	2	65	80	P	M	1, 4, 10, 13, 19
	03.08. – 05.08	3	12	160	P	M	1, 4, 10, 13, 19
	18.08. – 20.08	4	21-22	160	P	M	1, 4, 10, 13, 19
2011	04.04. – 13.04	1	31-32	50	P	G	3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 1, 4, 10, 13, 19
	26.04. – 04.05	2	47-48	110	P	G	3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 1, 4, 10, 13, 19
	05.05			105	M	G	15
	16.05. – 26.05	3	59-61	200	P	G	3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 1, 4, 10, 13, 19
	18.05			105	M	G	15
	10.06. – 16.06	4	84-85	200	P	G	15, 21
	14.06. – 21.06 △			155	M	G	15, 21
	28.06. – 01.07 △			155	M	Ra	14, 20
	27.06. – 19.07			155	FM	G	13, 19
	01.07. – 08.07	5	89-92	200	P	G	15, 21
	08.07			105	M	G	15
	19.09. – 30.09 <sup>1</sup>			200	P	VF	3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27
19.09. – 30.09 <sup>2</sup>			105	M	VF	3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27	
2012	26.03. – 27.03	1	51–52	170	P	Ra	15, 21
	28.03			105	M	Ra	15
	08.05. – 14.05	2	68	200	P	Ra	15, 21
	09.05			105	M	Ra	15
	21.05. – 23.05	3	76	200	P	Ra	15, 21
	23.05			105	M	Ra	15
	29.05. – 01.06	4	78	200	P	Ra	15, 21
	01.06			105	M	Ra	15
	11.06. – 19.06	5	80	200	P	Ra	15, 21
	19.06			105	M	Ra	15

<sup>1</sup> in Versuch B, Block III und IV, <sup>2</sup> in Versuch B, Block IV

**Anhang-Tab. 5: Angaben zur Monolithentnahme:** Versuchsjahr, beprobte Varianten, Entnahmetechnik, Volumen des entnommenen Monoliths in  $\text{cm}^{-3}$ , Wiederholungen je Tiefenstufe, beprobte Bodentiefe in cm, Beprobungstermine und die daraus resultierende Anzahl Monolithe.

Jahr	Variante	Technik	Vol.	Wdh	Tiefe	Termine	Anzahl
2010 <sup>a</sup>	6, 15, 21	Box	2500	4	45–105	1	144
2011 <sup>a</sup>	15	Box+	2500	2	45–105	3	72
2011 <sup>a</sup>	14, 15, 20, 21	Box+	2500	3	45–155	1	264
2011 <sup>a*</sup>	13, 19	Box	2500	3	45–155	1	132
2011 <sup>b</sup>	3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27	Bohrer	1250	4	45–105	1	216
2012 <sup>a</sup>	15	Spachtel	1250	3	45–105	5	180

<sup>a</sup> in Versuch A, Block I und II

<sup>b</sup> in Versuch B, Block III und IV

\* differenziert nach Wurzeln im *bulk*-Boden und in Bioporen

**Anhang-Tab. 6: Arbeitseinstellungen des Scanners *Epson Expression V700*.**

Pfad	Einstellungen
Vorlagenart	Film (mit Bereichsführung)
Filmtyp	Positivfilm
Bildtyp	8-Bit-Graustufen
Auflösung	400 dpi
Vorlagengröße	W: 203,2; H:254,0
Zielgröße	Original
Korrekturen	keine

**Anhang-Tab. 7: Arbeitseinstellungen bei der Analyse** mit dem Computerprogramm WinRHIZO Pro Version 2009c.

Pfad		Einstellungen
Data	Data save options	root color analysis data
Image	Origin	disk
Regions	Vertical slice parameters	cm, fixed size
Analysis	Measurements	Root morphology, Diameter Interpolation, Precision: maximum (slowest), Tennant method, Crossing detection: none
Analysis	Filters	Image smoothing: low, Debris removal with Area smaller than 2.0000 cm <sup>2</sup> , with length/width ratio smaller than 4.00
Analysis	Pixel classification method	Based on grey levels, Automatic, Dark root on white background, Channel: grey, log
Calibration	Method	Intrinsic
	Equal width classes	Number of classes: 50, Interval width: 0.1 mm

**Anhang-Tab. 8: Übersicht der Regenwurm-Untersuchungen:** Untersuchungstermine (Datum), Bearbeiter (Bearb.): DL=Dirk Landgraf, UP=Ute Perkons, ML=Marcel Lüsebrink, Versuch, Varianten und Zeitpunkt der Regenwurmaustreibung. Es wurden jeweils alle vier Feldwiederholungen untersucht.

Datum	Bearb.	Versuch	Varianten	Zeitpunkt
06.10.2009	DL	A	3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27	Ende Vorfruchtphase
18.11.2009	DL	A	3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27	Ende Vorfruchtphase
29.09.2010	UP	B	Lu1-2, Ww1-2, Rs1-2, Hafer	2. Jahr Vorfruchtphase
21.10.2010 *	UP	B	Lu1-2, Ww1-2, Rs1-2, Hafer	2. Jahr Vorfruchtphase
19.10.2010	UP	A	1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22, 25	nach Aussaat Gerste
03.11.2010 *	UP	A	1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22, 25	nach Aussaat Gerste
22.09.2011	ML	B	3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27	Ende Vorfruchtphase

\* Unterscheidung zwischen großen und kleinen Individuen

**Anhang-Tab. 9: Übersicht der Bioporen-Untersuchungen** in Versuch A: Zeitraum der Erhebung, Bearbeiter (Bearb.): UP=Ute Perkons, KLH=Katharina Lütke Holz, TL=Tobias Lühring, Varianten, Fläche in der Parzelle und Zeitpunkt der Erhebung. Mit Ausnahme der mit \* gekennzeichneten Erhebung wurden alle vier Feldwiederholungen beprobt.

Zeitraum	Bearb.	Varianten	Fläche	Zeitpunkt
21.04. – 28.04.2010 <sup>a</sup>	UP	1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22, 25	1, 2	vor Saat Malve
04.05. – 11.05.2010 <sup>b</sup>	UP	1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22, 25	3	vor Saat Malve
30.05. – 28.06.2011 <sup>c</sup>	KLH	1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22, 25	3	Malve
27.06. – 19.07.2011 <sup>c *</sup>	UP/KLH	13, 19	3	Malve
12.03. – 24.04.2012 <sup>c</sup>	TL	1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22, 25	1, 2	nach Brache

<sup>a</sup> offene Bioporen mit und ohne Wurzeln zusammen erfasst

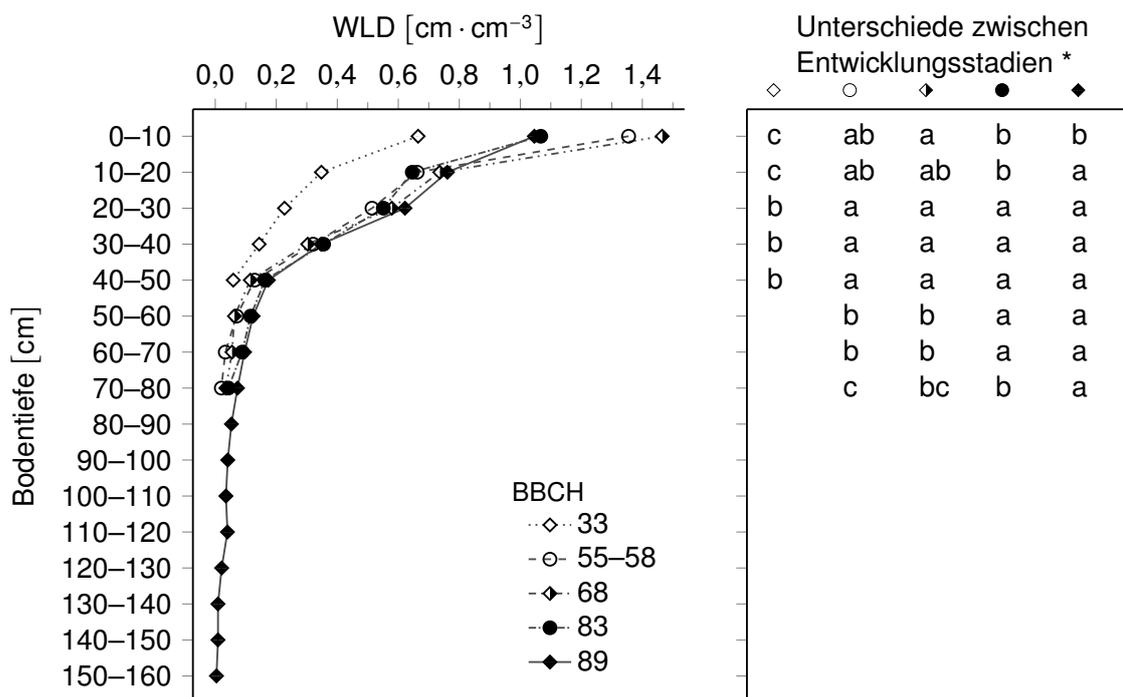
<sup>b</sup> offene Bioporen mit und ohne Wurzeln unterschieden

<sup>c</sup> offene Bioporen mit und ohne Wurzeln sowie verfüllte Bioporen unterschieden

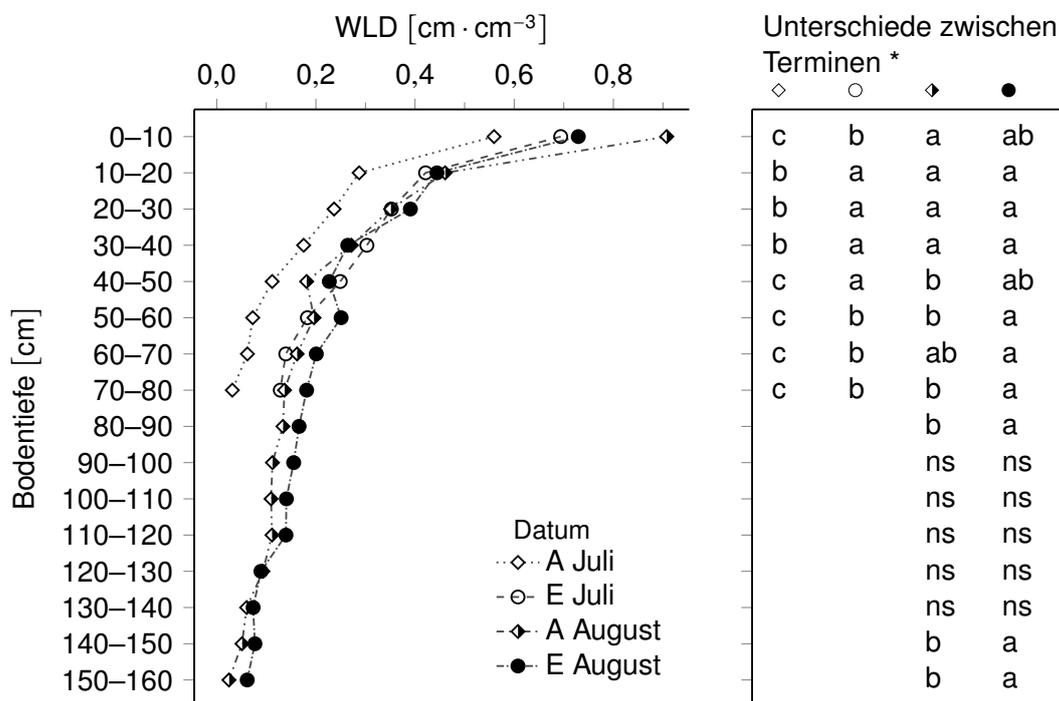
\* zusätzlich Kontinuität bis 155 cm Bodentiefe erfasst (Feldwiederholungen I und II)

**Anhang-Tab. 10: Anteil der Wurzellänge [%] von Luzerne, Wegwarte und Rohrschwengel in den verschiedenen Durchmesserklassen [mm] und der mittlere Durchmesser [mm] in Abhängigkeit von der Bodentiefe [cm].** Versuch B, 27.09.2011–04.10.2011. Monolithmethode in den Bodentiefen von 45–105 cm. Werte mit verschiedenen Buchstaben in einer Durchmesserklasse unterscheiden sich signifikant. Kruskal-Wallis-Test ( $\alpha=0,05$ ) mit Anschlussstest nach CAMPBELL & SKILLINGS (1985).

	Tiefe	0–0,2	0,2–0,4	0,4–0,6	0,6–0,8	0,8–1	>1	$\Sigma$	$\emptyset$					
Luzerne	45–55	36,1	49,8	b	8,7	2,6	1,0	2,0	100	0,37				
	55–65	34,6	51,7	b	8,9	2,3	0,9	1,7	100	0,37				
	65–75	34,0	52,9	ab	8,5	2,3	0,8	1,5	100	0,36				
	75–85	30,4	55,9	a	9,0	2,5	0,8	1,4	100	0,37				
	85–95	32,7	53,8	ab	8,8	2,5	0,8	1,4	100	0,38				
	95–105	29,3	54,7	ab	10,9	3,0	1,0	1,2	100	0,38				
Wegwarte	45–55	14,2	a	52,5	19,1	7,5	2,9	3,7	100	0,47				
	55–65	14,1	ab	55,4	18,1	6,9	2,5	3,0	100	0,46				
	65–75	12,9	bc	56,8	17,9	7,2	2,6	2,6	100	0,45				
	75–85	12,5	c	58,4	18,5	6,3	2,2	2,2	100	0,44				
	85–95	11,5	cd	58,7	18,6	6,5	2,2	2,4	100	0,44				
	95–105	9,4	d	59,4	20,0	7,0	2,2	2,0	100	0,45				
Rohrschwengel	45–55	51,7	b	35,8	a	7,9	a	2,7	1,0	0,9	a	100	0,32	a
	55–65	54,6	ab	34,6	ab	7,1	ab	2,3	0,8	0,6	ab	100	0,31	ab
	65–75	55,7	ab	33,9	ab	7,2	ab	2,1	0,7	0,4	ab	100	0,30	ab
	75–85	57,4	a	33,2	b	6,6	ab	1,8	0,6	0,4	b	100	0,29	ab
	85–95	58,2	a	32,8	ab	6,2	b	1,8	0,6	0,3	b	100	0,29	b
	95–105	56,7	a	33,9	ab	6,4	ab	2,0	0,7	0,4	ab	100	0,29	ab

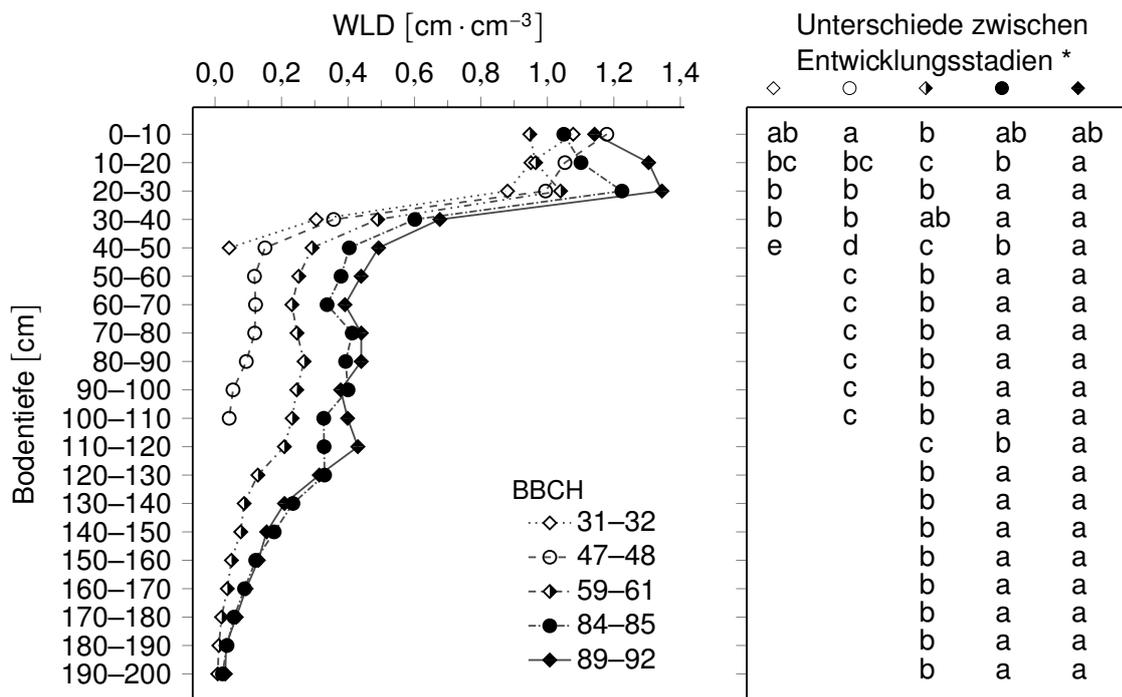


1.1: Wurzellängendichte von Sommerweizen, Entwicklungsstadium (BBCH), 31.05.–30.07.2010

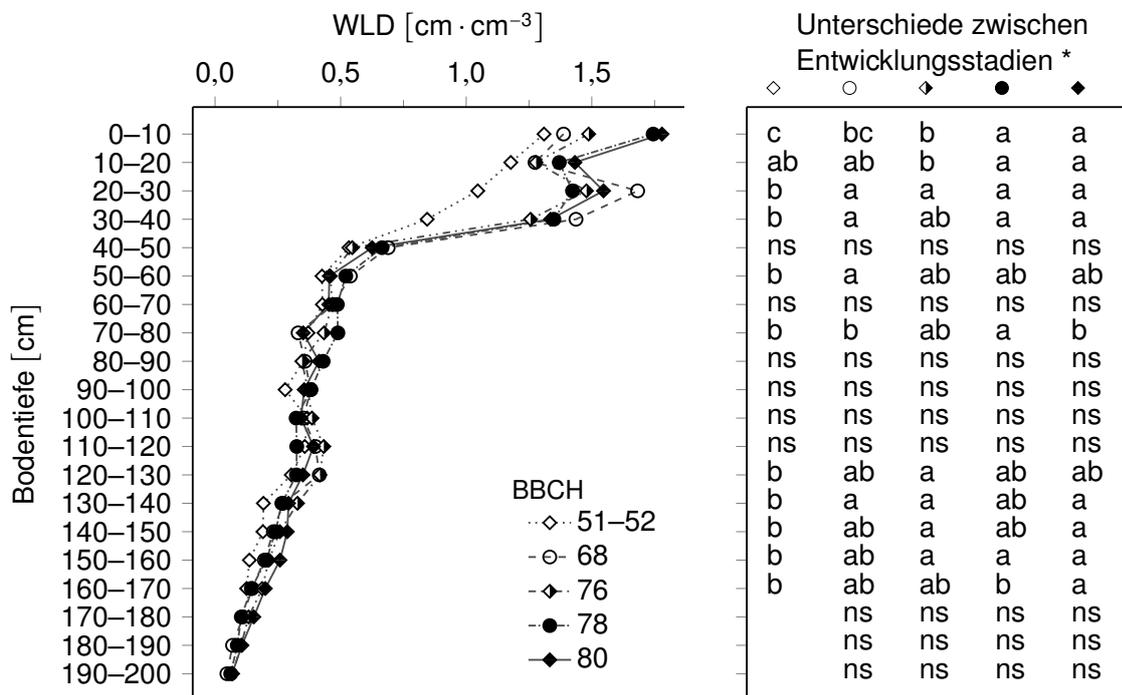


1.2: Wurzellängendichte von Futtermalve, 05.07.–20.08.2010, A=Monatsanfang, E=Monatsende

**Anhang-Abb. 1: Wurzellängendichte (WLD) von Sommerweizen und Futtermalve** in Abhängigkeit von der Bodentiefe und dem Untersuchungstermin. WLD gemittelt über Vorfrucht-Varianten (ein- und zweijähriger Anbau von Luzerne und Wegwarte sowie einjähriger Rohrschwingelanbau). Versuch A, Profilwandmethode. Verschiedene Buchstaben (\*) zeigen signifikante Unterschiede innerhalb einer Bodentiefenklasse (ns=nicht signifikant). Kruskal-Wallis-Test ( $\alpha=0,05$ ) mit Anschlussstest nach CAMPBELL & SKILLINGS (1985).

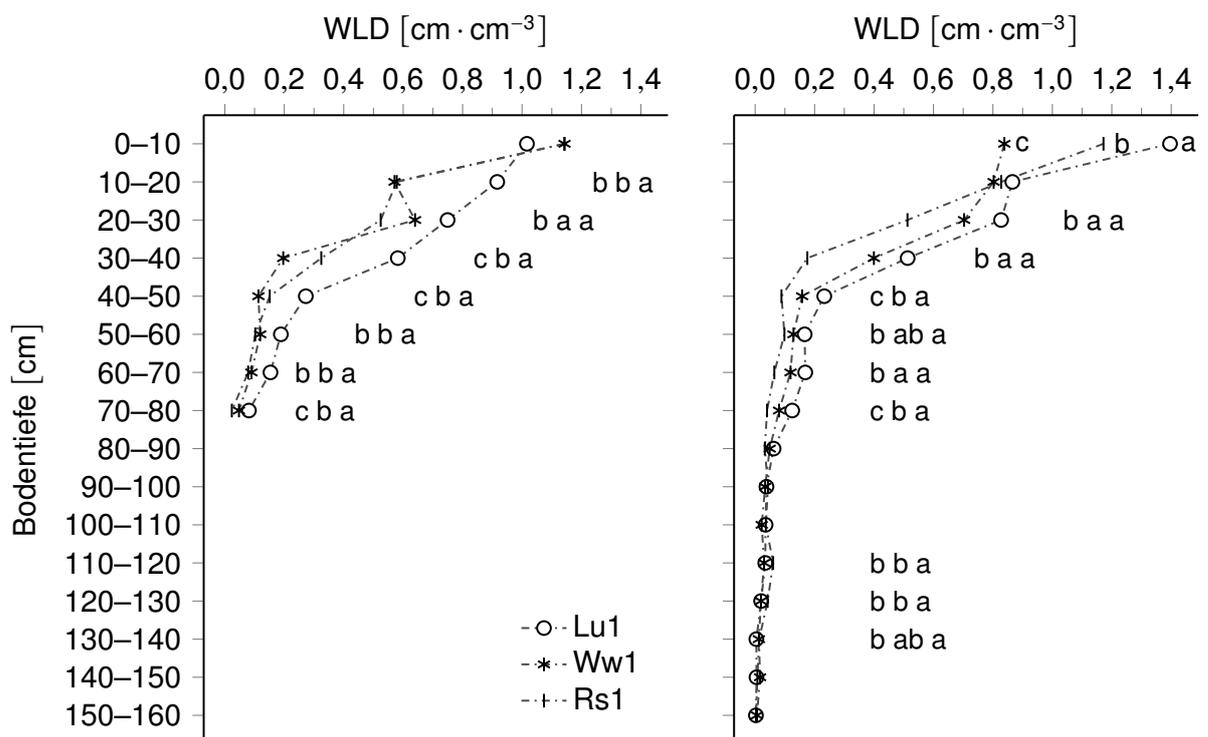


2.1: Wurzellängendichte von Wintergerste, 04.04.–08.07.2011

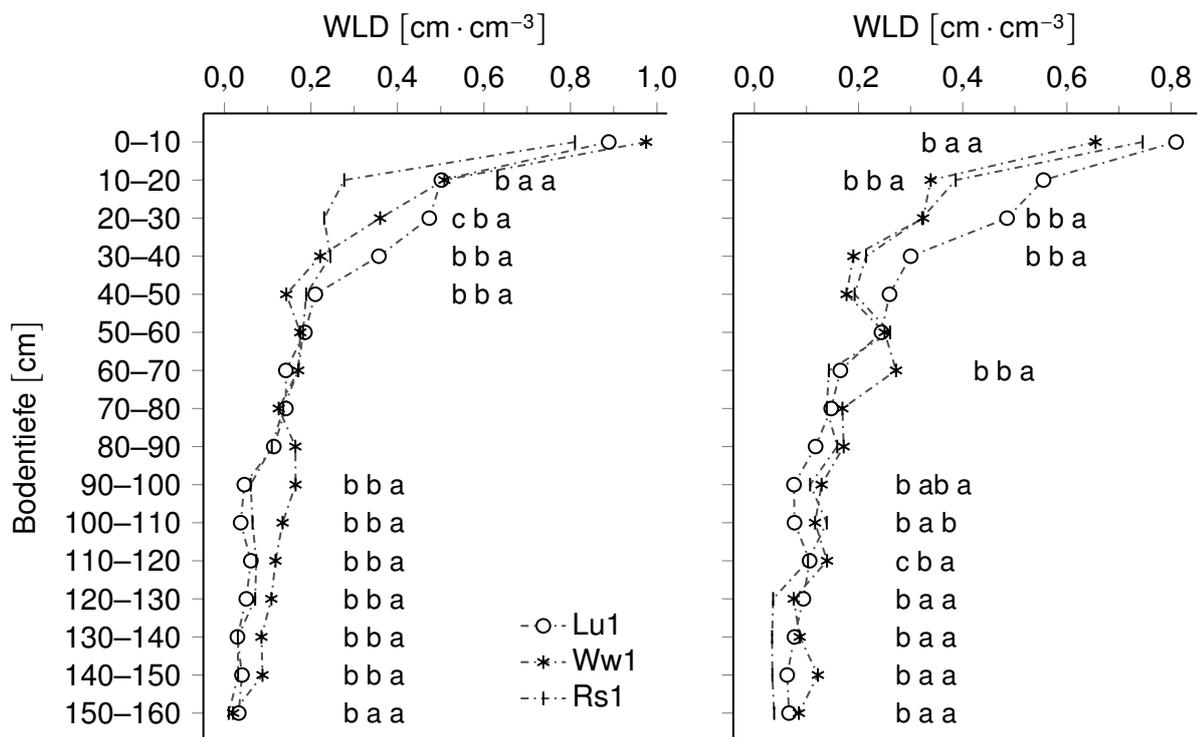


2.2: Wurzellängendichte von Winterrapss, 26.03.–19.06.2012

**Anhang-Abb. 2: Wurzellängendichte (WLD) von Wintergerste und Winterrapss** in Abhängigkeit von der Bodentiefe und dem Entwicklungsstadium (BBCH). WLD gemittelt über Vorfrucht-Varianten (Ww2: zweijähriger Wegwarteanaubau, Rs1: einjähriger Rohrschwingelanbau). Versuch A, Profilwandmethode. Verschiedene Buchstaben (\*) zeigen signifikante Unterschiede innerhalb einer Bodentiefenklasse (ns=nicht signifikant). Kruskal-Wallis-Test ( $\alpha=0,05$ ) mit Anschlussstest nach CAMPBELL & SKILLINGS (1985).



**Anhang-Abb. 3: Wurzellängendichte (WLD) von Sommerweizen** (links: BBCH 83, rechts: BBCH 89) in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der Vorfrucht-Variante (Lu1: einjähriger Luzerneanbau, Ww1: einjähriger Wegwarte anbau, Rs1: einjähriger Rohrschwingelanbau). Versuch A, 13.07.–16.07.2010 und 27.07.–30.07.2010, Profilwandmethode. Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede innerhalb einer Bodentiefenklasse. Kruskal-Wallis-Test ( $\alpha=0,05$ ) mit Anschlussstest nach CAMPBELL & SKILLINGS (1985).



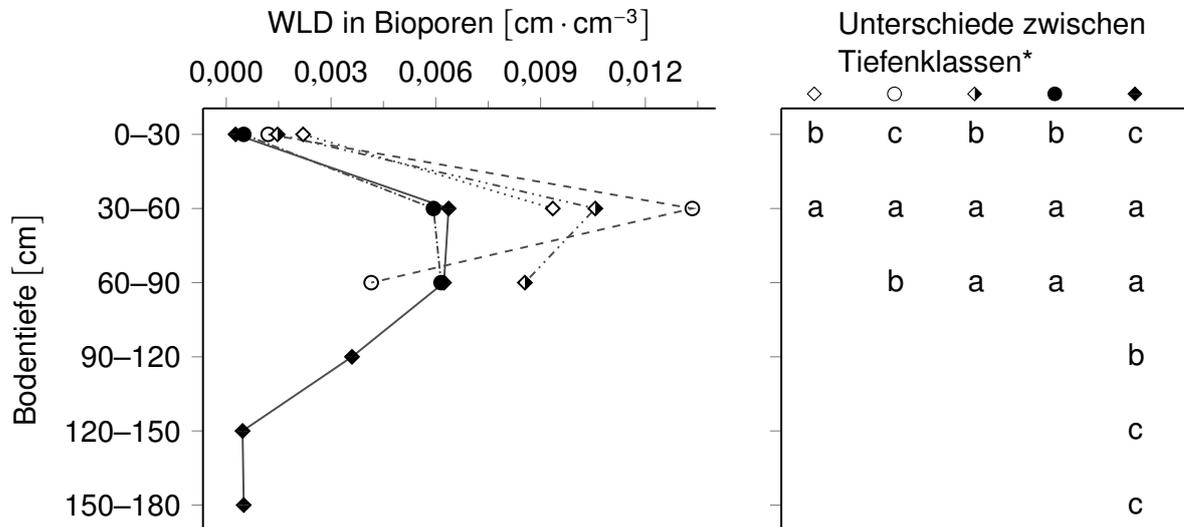
**Anhang-Abb. 4: Wurzellängendichte (WLD) von Futtermalve (links: Anfang August, rechts: Ende August) in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der Vorfrucht-Variante (Lu1: einjähriger Luzerneanbau, Ww1: einjähriger Wegwarte anbau, Rs1: einjähriger Rohrschwingelanbau). Versuch A, 03.08.–05.08. und 18.08.–20.08.2010, Profilwandmethode. Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede innerhalb einer Bodentiefenklasse. Kruskal-Wallis-Test ( $\alpha=0,05$ ) mit Anschlussstest nach CAMPBELL & SKILLINGS (1985).**

**Anhang-Tab. 11: Prozentuale Verteilung der Wurzellänge [%] auf sechs Durchmesserklassen [mm] und mittlerer Durchmesser [mm] von Wintergerste mit der Vorfrucht Ww2 (zweijähriger Wegwarteanaubau) in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium (BBCH) und der Bodentiefe. Versuch A, 05.05–08.07.2011, Monolithmethode.**

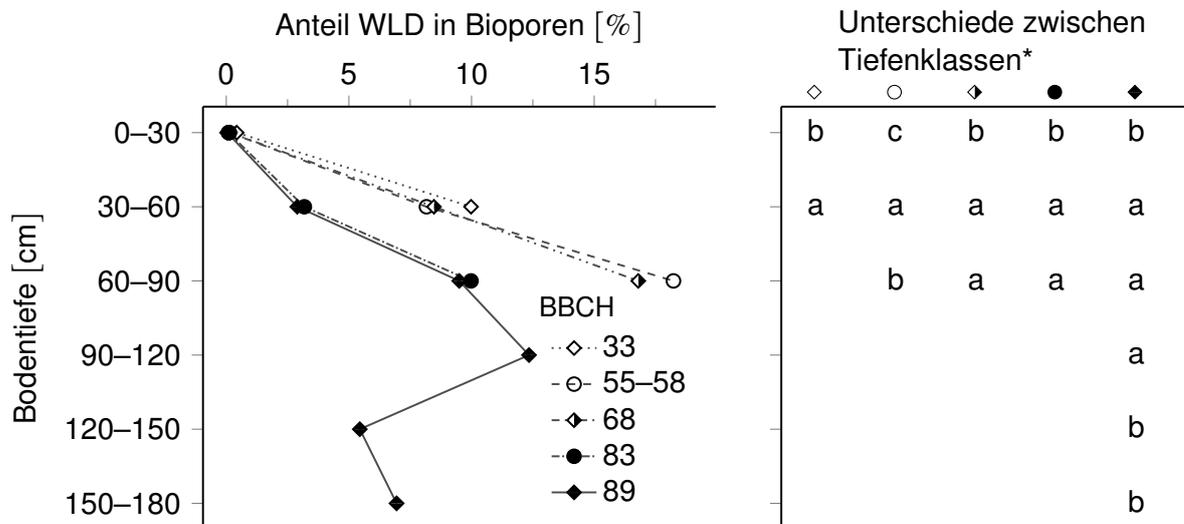
Bodentiefe [cm]		0–0,2	0,2–0,4	0,4–0,6	0,6–0,8	0,8–1	> 1	Σ	∅ [mm]
BBCH 47–48	45–55	22,3	50,5	17,2	5,7	2,2	2,1	100	0,43
	55–65	21,5	46,2	18,1	7,5	3,1	3,5	100	0,48
	65–75	19,9	44,6	18,5	8,4	3,9	4,8	100	0,49
	75–85	19,1	42,5	18,8	9,2	4,4	6,0	100	0,52
	85–95	15,7	44,2	19,7	10,1	4,6	5,8	100	0,52
	95–105	16,0	44,5	20,1	9,5	4,4	5,4	100	0,52
	∅	19,1	45,4	18,7	8,4	3,8	4,6	100	0,49
BBCH 59–61	45–55	25,5	51,2	13,9	4,9	2,1	2,3	100	0,41
	55–65	24,7	52,0	14,5	5,0	1,9	1,8	100	0,40
	65–75	24,7	45,9	15,4	7,0	3,1	3,9	100	0,45
	75–85	23,3	46,0	16,0	7,3	3,2	4,1	100	0,47
	85–95	21,1	45,9	17,0	7,7	3,6	4,7	100	0,48
	95–105	21,8	45,5	16,7	7,7	3,7	4,5	100	0,48
	∅	23,5	47,8	15,6	6,6	2,9	3,6	100	0,45
BBCH 84–85	45–55	16,6	58,7	14,3	5,4	2,3	2,8	100	0,43
	55–65	15,6	56,6	15,3	6,2	2,7	3,6	100	0,46
	65–75	16,5	55,1	15,6	6,3	2,8	3,6	100	0,45
	75–85	15,0	52,9	16,5	7,2	3,5	4,8	100	0,49
	85–95	14,7	55,5	16,4	6,8	2,9	3,8	100	0,47
	95–105	12,6	55,7	17,7	7,2	3,1	3,6	100	0,47
	105–115	12,3	55,6	17,6	7,6	3,2	3,7	100	0,48
	115–125	12,5	55,8	17,8	7,4	2,9	3,6	100	0,47
	125–135	11,9	54,3	19,3	7,9	3,1	3,6	100	0,48
	135–145	10,2	52,6	21,9	8,5	3,3	3,4	100	0,49
	145–155	8,7	49,2	24,3	10,4	3,8	3,6	100	0,51
∅	13,3	54,7	17,9	7,4	3,0	3,6	100	0,47	
BBCH 89–92	45–55	30,1	53,0	11,1	3,7	1,2	0,9	100	0,37
	55–65	29,8	52,0	11,5	4,0	1,4	1,3	100	0,37
	65–75	28,3	51,1	12,3	4,5	1,8	2,0	100	0,39
	75–85	29,3	51,3	11,6	4,3	1,8	1,8	100	0,38
	85–95	28,1	50,4	12,7	4,9	2,0	2,0	100	0,40
	95–105	28,2	48,9	12,8	5,1	2,3	2,8	100	0,41
	∅	28,9	51,1	12,0	4,4	1,8	1,8	100	0,39

**Anhang-Tab. 12: Prozentuale Verteilung der Wurzellänge [%] auf sechs Durchmesserklassen [mm] und mittlerer Durchmesser [mm] von Winterraps mit der Vorfrucht Ww2 (zweijähriger Wegwarteanaubau) in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium (BBCH) und der Bodentiefe. Versuch A, 28.03.–19.06.2012, Monolithmethode.**

Bodentiefe [cm]		0–0,2	0,2–0,4	0,4–0,6	0,6–0,8	0,8–1	> 1	∑	∅ [mm]
BBCH 51–52	45–55	44,3	46,6	6,7	1,6	0,5	0,3	100	0,30
	55–65	42,4	48,4	7,0	1,5	0,5	0,3	100	0,31
	65–75	42,4	48,1	7,0	1,7	0,5	0,3	100	0,31
	75–85	44,3	46,0	7,1	1,8	0,5	0,3	100	0,31
	85–95	45,0	45,3	7,0	1,8	0,6	0,3	100	0,31
	95–105	47,7	42,6	7,0	1,8	0,6	0,3	100	0,30
	∅	44,3	46,1	7,0	1,7	0,5	0,3	100	0,31
BBCH 68	45–55	52,3	39,4	5,8	1,6	0,5	0,3	100	0,29
	55–65	46,2	43,1	7,3	2,2	0,7	0,5	100	0,31
	65–75	49,2	40,8	6,8	2,1	0,6	0,4	100	0,30
	75–85	50,1	40,4	6,5	1,9	0,7	0,4	100	0,30
	85–95	50,5	40,1	6,6	1,8	0,6	0,4	100	0,30
	95–105	51,7	37,8	6,7	2,4	0,9	0,6	100	0,30
	∅	50,0	40,3	6,6	2,0	0,7	0,4	100	0,30
BBCH 76	45–55	58,4	34,8	4,9	1,2	0,4	0,2	100	0,27
	55–65	54,6	37,7	5,3	1,6	0,5	0,3	100	0,28
	65–75	60,5	33,6	4,6	1,0	0,2	0,1	100	0,26
	75–85	57,9	35,4	4,8	1,4	0,4	0,2	100	0,27
	85–95	59,5	33,6	4,9	1,4	0,4	0,2	100	0,27
	95–105	61,7	31,4	5,2	1,2	0,3	0,2	100	0,27
	∅	58,8	34,4	4,9	1,3	0,4	0,2	100	0,27
BBCH 78	45–55	84,2	14,7	1,0	0,1	0,0	0,0	100	0,18
	55–65	82,4	16,1	1,3	0,1	0,0	0,0	100	0,18
	65–75	84,4	14,3	1,2	0,1	0,0	0,0	100	0,18
	75–85	85,0	13,7	1,1	0,2	0,0	0,0	100	0,17
	85–95	85,4	13,1	1,1	0,2	0,0	0,0	100	0,17
	95–105	84,6	13,5	1,5	0,3	0,0	0,0	100	0,17
	∅	84,3	14,2	1,2	0,2	0,0	0,0	100	0,17
BBCH 80	45–55	75,9	21,7	2,0	0,3	0,1	0,0	100	0,20
	55–65	73,2	23,9	2,4	0,4	0,1	0,0	100	0,21
	65–75	74,3	22,3	2,7	0,5	0,1	0,0	100	0,21
	75–85	78,1	18,9	2,5	0,4	0,1	0,0	100	0,20
	85–95	79,1	18,6	1,9	0,3	0,1	0,0	100	0,20
	95–105	78,7	18,7	2,1	0,5	0,1	0,0	100	0,20
	∅	76,6	20,7	2,2	0,4	0,1	0,0	100	0,20

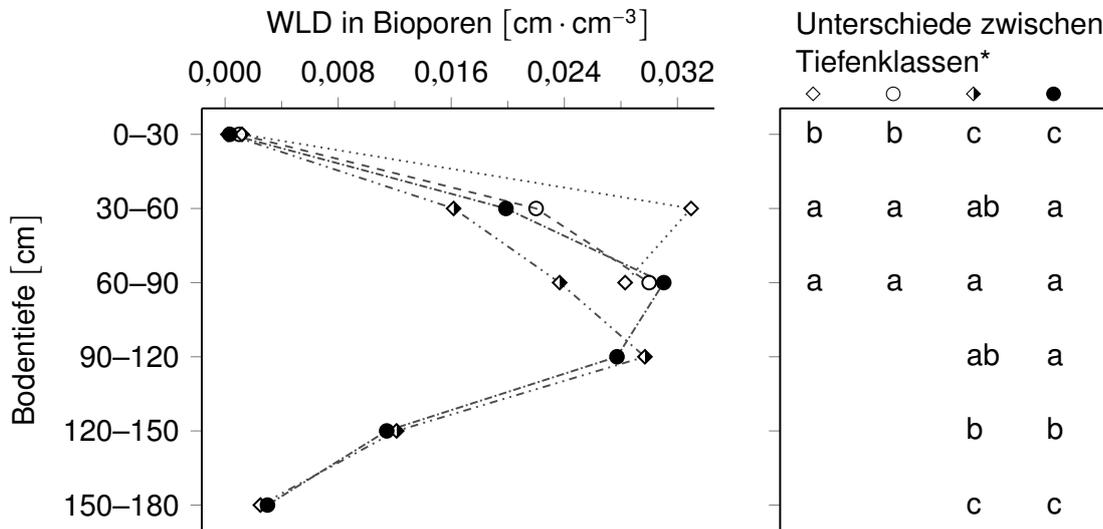


5.1: Wurzellängendichte in Bioporen

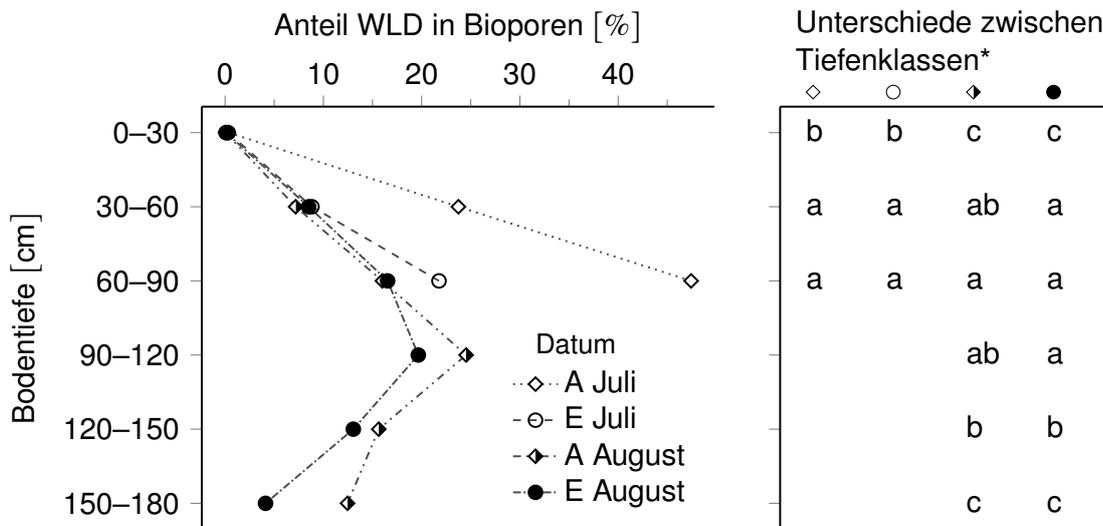


5.2: Prozentualer Anteil von Wurzeln in Bioporen an der Gesamt-Wurzellängendichte

**Anhang-Abb. 5: Wurzellängendichte (WLD) in Bioporen von Sommerweizen** in Abhängigkeit von der Bodentiefe und dem Entwicklungsstadium (BBCH). WLD über Vorfrucht-Varianten (ein- und zweijähriger Anbau von Luzerne und Wegwarte sowie einjähriger Rohrschwingelanbau) gemittelt. Versuch A, 31.05.–30.07.2010, Profilwandmethode. Verschiedene Buchstaben (\*) zeigen signifikante Unterschiede zwischen Bodentiefenklassen zu einem Entwicklungsstadium. Kruskal-Wallis-Test ( $\alpha=0,05$ ) mit Anschlussstest nach CAMPBELL & SKILLINGS (1985).

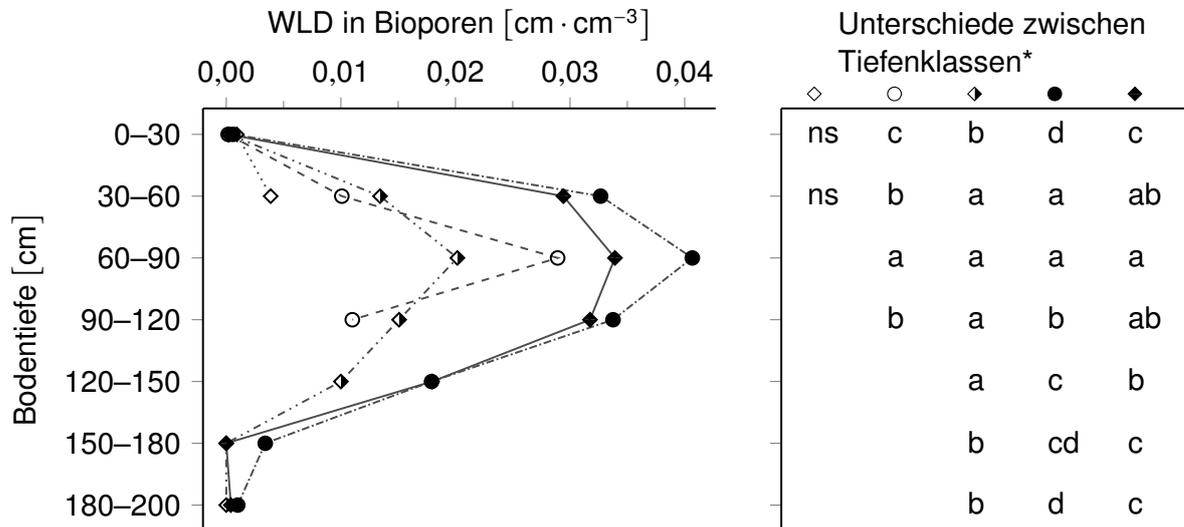


6.1: Wurzellängendichte in Bioporen

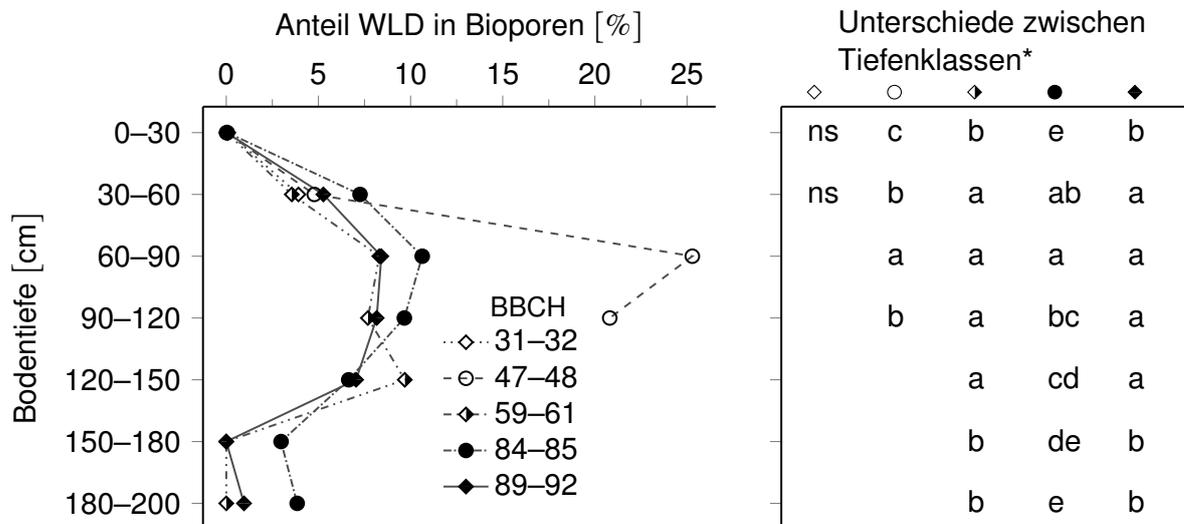


6.2: Prozentualer Anteil von Wurzeln in Bioporen an der Gesamt-Wurzellängendichte

**Anhang-Abb. 6: Wurzellängendichte (WLD) in Bioporen von Futtermalve** in Abhängigkeit von der Bodentiefe und dem Untersuchungstermin. WLD über Vorfrucht-Varianten (ein- und zweijähriger Anbau von Luzerne und Wegwarte sowie einjähriger Rohrschwingelanbau) gemittelt. Versuch A, 05.07.–20.08.2010, Profilwandmethode. A=Monatsanfang, E=Monatsende. Verschiedene Buchstaben (\*) zeigen signifikante Unterschiede zwischen Bodentiefenklassen zu einem Untersuchungstermin. Kruskal-Wallis-Test ( $\alpha=0,05$ ) mit Anschlussstest nach CAMPBELL & SKILLINGS (1985).

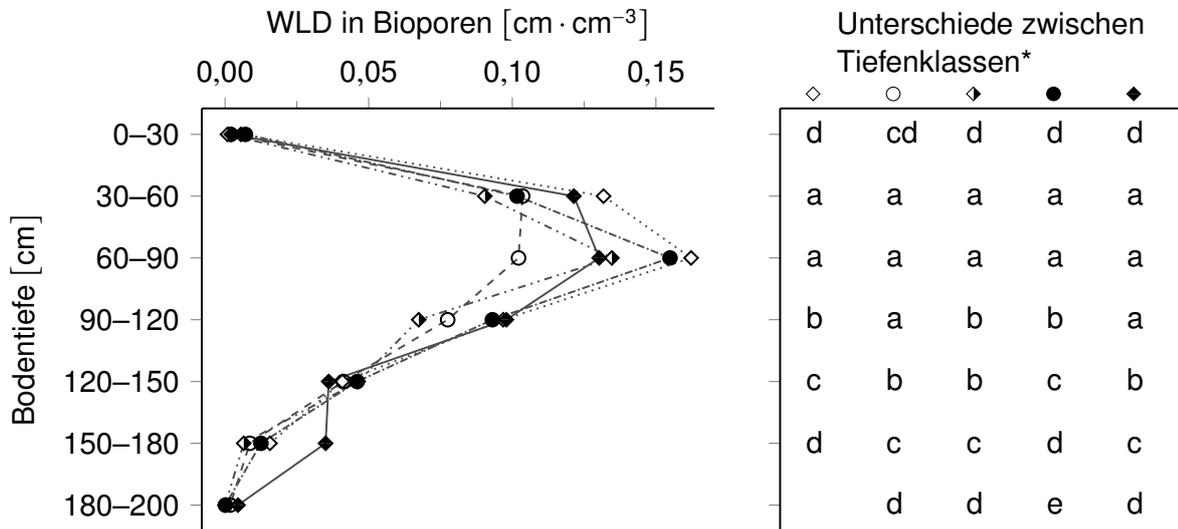


7.1: Wurzellängendichte in Bioporen

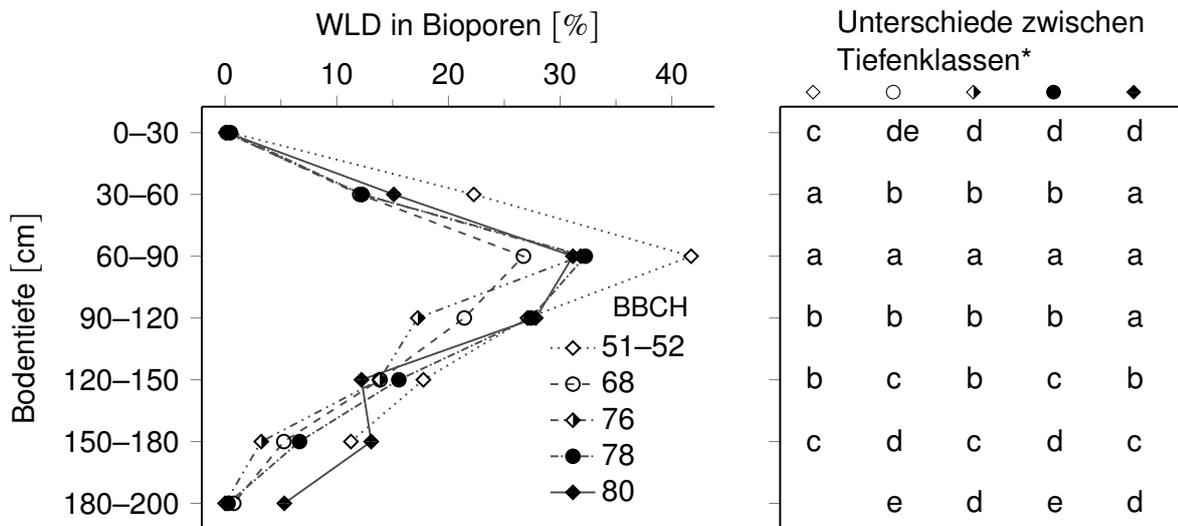


7.2: Prozentualer Anteil von Wurzeln in Bioporen an der Gesamt-Wurzellängendichte

**Anhang-Abb. 7: Wurzellängendichte (WLD) in Bioporen von Wintergerste** in Abhängigkeit von der Bodentiefe und dem Entwicklungsstadium (BBCH). WLD über Vorfrucht-Varianten (Ww2: zweijähriger Wegwarte-anbau, Rs1: einjähriger Rohrschwingelanbau) gemittelt. Versuch A, 04.04.–08.07.2011, Profilwandmethode. Verschiedene Buchstaben (\*) zeigen signifikante Unterschiede zwischen Bodentiefenklassen zu einem Entwicklungsstadium (ns=nicht signifikant). Kruskal-Wallis-Test ( $\alpha=0,05$ ) mit Anschlussstest nach CAMPBELL & SKILLINGS (1985).

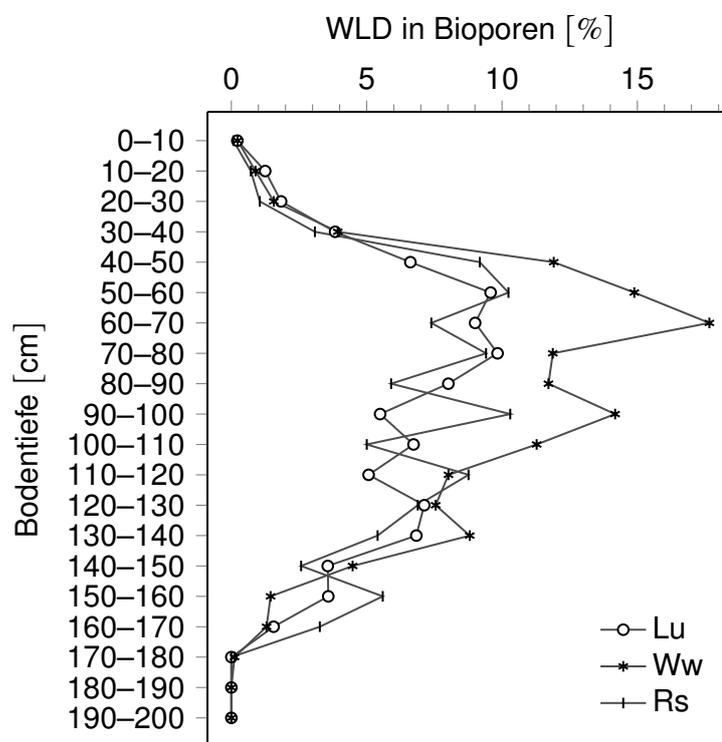


8.1: Wurzellängendichte in Bioporen



8.2: Prozentualer Anteil von Wurzeln in Bioporen an der Gesamt-Wurzellängendichte

**Anhang-Abb. 8: Wurzellängendichte (WLD) in Bioporen von Winterraps** in Abhängigkeit von der Bodentiefe und dem Entwicklungsstadium (BBCH-Stadium). WLD über Vorfrucht-Varianten (Ww2: zweijähriger Wegwarte-anbau, Rs1: einjähriger Rohrschwingelanbau) gemittelt. Versuch A, 26.03.–19.06.2012, Profilwandmethode. Verschiedene Buchstaben (\*) zeigen signifikante Unterschiede zwischen Bodentieftiefenklassen zu einem Entwicklungsstadium. Kruskal-Wallis-Test ( $\alpha=0,05$ ) mit Anschlussstest nach CAMPBELL & SKILLINGS (1985).



**Anhang-Abb. 9: Prozentualer Anteil der Wurzellängendichte (WLD) in Bioporen bezogen auf die Gesamt-WLD von Luzerne (Lu), Wegwarte (Ww) und Rohrschwingel (Rs) in Abhängigkeit von der Bodentiefe. Versuch B, 19.09.2011–29.09.2011. Profilwandmethode.**

# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei den vielen Menschen bedanken, die in den vergangenen Jahren mit mir zusammengearbeitet und mich unterstützt haben.

Mein größter Dank gilt Herrn Professor Dr. Ulrich Köpke dafür, dass ich diese Arbeit am Institut für Organischen Landbau anfertigen konnte. Auf hilfreiche Kommentare und unerschöpfliche Geduld konnte ich mich stets verlassen. Weiterhin danke ich Herrn Professor Dr. Frank Ewert für die Bereitschaft, das Amt des Korreferenten zu übernehmen.

Dem gesamten Institut für Organischen Landbau möchte ich für die schöne Zeit danken. Ich habe mich hier sehr wohl gefühlt, viel gelernt und bei der Arbeit viel Spaß gehabt. Daniel Neuhoff danke ich für kritische Hinweise sowie für seinen unvergleichlichen Humor. Den Mitgliedern des Institutsvorstands danke ich für interessante und konstruktive Sitzungen. Besonders danken möchte ich Johannes Siebigteroth für seinen Erfindergeist und den unermüdlichen Einsatz insbesondere zum Thema Arbeitssicherheit. Ebenso großer Dank gebührt Stefan Türk, Christian Dahn, Henning Riebeling und Frank Täufer für die große Einsatzbereitschaft und Unterstützung bei der Feldarbeit. Timo Kautz und Miriam Athmann möchte ich herzlich für die intensive Betreuung und Koordination des Forschungsprojekts danken. Danke, dass ihr euch immer Zeit genommen habt, um Ideen und Probleme zu besprechen und mich ermutigt habt, wenn nicht alles nach Plan verlief. Herzlich danken möchte ich Vanessa Geier, Lai Thi Thu Hang, Katharina Lütke-Holz, Katharina Thomas und Tobias Lühring die ich bei ihrer Abschlussarbeit begleiten durfte und deren Daten zum Teil in meine Arbeit eingeflossen sind. Ein großes Dankeschön geht auch an die „Wurzelspezialisten“ Nadine Severin, Johannes Juszczak und Daniel Boguschewski sowie an alle Praktikanten und Studentischen Hilfskräfte am Wiesengut, die manche Stunde mit meinen Wurzelproben zugebracht haben. Aber auch auf dem Feld hatte ich großartige Helfer, die erwähnt werden müssen: Kai Prakosay, Barnet Linhart, Benjamin Westermann und Christian Petersheim, ohne sie wäre ich nicht fertig geworden.

Besonders dankbar bin ich Noel Ferro, der sich die Zeit genommen hat, mir und der Statistik in einer schwierigen Phase der Arbeit wieder auf die Beine zu helfen. Paul Martin Küpper danke ich von Herzen für die gemeinsame Zeit am Institut. Danke für Deine Freundschaft und Deine Unterstützung, ohne Dich hätte ich es nicht durchgestanden. Auch Toni, Nepomuk und Niko gebührt großer Dank für die moralische Unterstützung und die offenen Ohren.

Ganz besonders danke ich Christoph Reimann für seine unendliche Geduld und Unterstützung in allen Lebenslagen. Schließlich richtet sich mein Dank an meine Familie und meine Freunde. Danke für euer Verständnis, euer Vertrauen in mich und eure steten Ermutigungen. Über Jahre habt ihr mir den Rücken gestärkt und mir die Kraft gegeben, diese Arbeit zu vollenden.