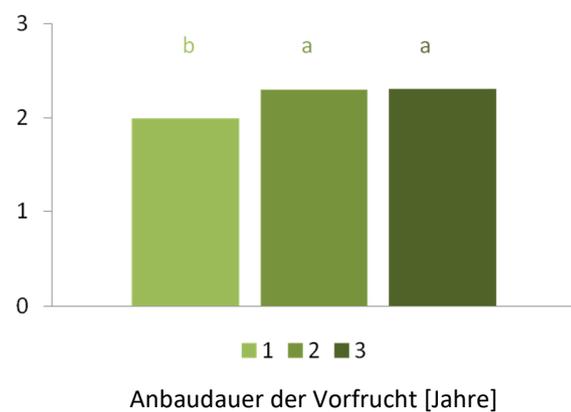
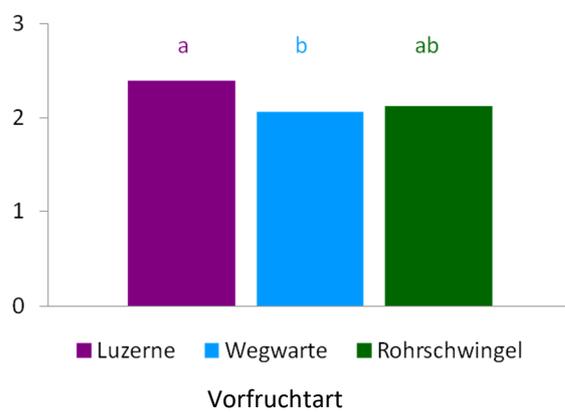


Homorhize und allorhize Wurzelsysteme: Vorfruchtwirkungen mehrjähriger Futterpflanzen auf die Ertragsbildung von Kulturpflanzen

Paul Martin Küpper

Kornertrag Wintertraps [t TM ha⁻¹]



Institut für Organischen Landbau

**Homorhize und allorhize Wurzelsysteme:
Vorfruchtwirkungen mehrjähriger Futterpflanzen auf
die Ertragsbildung von Kulturpflanzen**

Dissertation

zur Erlangung des Grades

Doktor der Agrarwissenschaften (Dr. agr.)

der Landwirtschaftlichen Fakultät

der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

von

Paul Martin Küpper

aus

Aachen

Bonn 2019

Referent: Prof. Dr. Ulrich Köpke

Korreferent: Prof. Dr. Wulf Amelung

Tag der mündlichen Prüfung: 19.08.2019

Angefertigt mit Genehmigung der Landwirtschaftlichen Fakultät der Universität Bonn

Nihil melius
nihil homine libero dignius
agricultura

Inscript des Niedersächsischen Bauernhauses auf der Prinzeninsel

- Nach Cicero -

In Dankbarkeit meinen Eltern gewidmet.

Vollendet in Erinnerung an meine Kommilitonen

Steffi († 2005)

Sebastian und Anna († 2009)

Kurzfassung

Seit dem Jahr 2007 wird ein mehrfaktorieller Feldversuch zu Fruchtfolgen mit Feldfutterpflanzen auf dem Campus Klein-Altendorf nahe Bonn durchgeführt. Das Futter wird nicht geworben, sondern verbleibt nach Mulchschnitten zur Nutzungsreife auf dem Feld. In diesem Versuch (*CeFiT*) wurden Untersuchungen an Futterpflanzen und darauf folgenden Nachfrüchten vorgenommen. Die vorliegende Arbeit hat das Ziel, Vorruchtwirkungen von Futterpflanzen in verschiedenen Fruchtfolgen vorzustellen.

Der Versuchsfaktor Vorruchtart umfasste die Futterpflanzen Luzerne (*Medicago sativa* L.), Wegwarte (*Cychorium intybus* L.) und Rohrschwingel (*Festuca arundinacea* SCHREB.). Die Arten unterscheiden sich u. a. bezüglich der Wurzelmorphologie (Luzerne und Wegwarte: allorhiz; Rohrschwingel: homorhiz). Es wurde vermutet, dass die allorhizen Vorrüchte mehr großlumige Bioporen schaffen als Rohrschwingel. Zudem wurde nach Luzerne eine höhere residuale Stickstoffmenge erwartet. Weiterhin wurde angenommen, dass sowohl eine höhere Bioporendichte als auch eine höhere Residualstickstoffmenge günstige Vorruchteffekte sind. Der Versuchsfaktor Anbaudauer der Vorrucht umfasste eine Kulturdauer von einem, zwei und drei Jahren. Erwartet wurde, dass mehrjähriger Anbau zu intensiverer Bioporung sowie bei Luzerne zu höherer Residualstickstoffmenge führt als einjähriger Anbau, so dass eine Verstärkung der Vorruchteffekte eintritt. Die Annahmen wurden vornehmlich durch Sprossuntersuchungen an den Nachfrüchten Sommerweizen und Futtermalve (2010), Wintergerste und Winterraps (2011) sowie Winterroggen und Winterraps (2012) überprüft. Zudem wurden Infiltrationsmessungen und Untersuchungen zur Stickstoffdynamik der Bioporenwandung (Drilosphäre) durchgeführt.

Die Vorruchtart hatte einen größeren Einfluss auf die Nachfrüchte als die Anbaudauer der Vorrucht. Zumeist war Luzerne eine günstigere Vorrucht als Wegwarte und/oder Rohrschwingel. Da sich Luzerne und Wegwarte wurzelmorphologisch ähneln, wurde die günstigere Vorruchtwirkung der Luzerne der Stickstoffwirkung der Leguminose zugeschrieben. Diese Schlussfolgerung wird durch Ergebnisse eines Düngungssteigerungsversuchs mit Stickstoff und Messungen des mineralischen Bodenstickstoffs unterstützt, die auf eine dreijährig andauernde höhere Stickstoffnachlieferung nach Luzerne hinweisen.

Der Einsatz des *Hood*-Infiltrometers auf dem Unterboden ermöglichte keine Rückschlüsse auf Gefügeänderungen. Im Unterschied dazu war ein neuer *tracer*-gestützter Ansatz zur Untersuchung der Stickstoffdynamik in der Drilosphäre zielführend. Die Ergebnisse deuten auf einen regenwurminduzierten Stickstoffeintrag in die Drilosphäre mindestens bis in 75 - 105 cm Bodentiefe hin. Es wurde eine Stickstoffaufnahme der Nachfrüchte Sommerweizen und Futtermalve unterhalb von 45 cm Bodentiefe nachgewiesen.

Gaswechselformen am Pflanzenspross sowie Nährstoffuntersuchungen von Boden und Sprossbiomasse weisen darauf hin, dass im *CeFiT* die potentiell hohe Relevanz von Bioporen für die Wasser- und Nährstoffaufnahme von Pflanzen durch günstige Bodenhydrologie am Standort bzw. hohe Nährstoffgehalte im Oberboden zumeist überdeckt wurde.

Abstract

Since 2007 a factorial field trial concerning crop sequences containing perennial fodder cropping is carried out at the experimental farm Campus Klein-Altendorf near Bonn/Germany. The fodder is not harvested but mulched when flowering started each time. In the Central Field Trial (CeFiT) investigations were conducted on fodder crops as well as on following crops. The objective of this thesis is to evaluate precrop effects of distinct fodder cropping schemes on different subsequent crops.

The factor precrop species included lucerne (*Medicago sativa* L.), chicory (*Cychorium intybus* L.), and tall fescue (*Festuca arundinacea* SCHREB.). The species chosen differ in root architecture. Lucerne and chicory develop an allorhizal root system, and fescue forms a homorhizal one. It was expected that allorhizal precrops create more bigger sized biopores than fescue. Besides, a higher amount of residual nitrogen was predicted after lucerne. The expectation was that both higher biopore density and greater amount of residual nitrogen were favourable precrop effects. The factor duration of precrop cultivation included one, two, and three years. Perennial cropping was expected to exhibit more intensive forming of biopores and, in case of lucerne, to result in a higher amount of residual nitrogen than annual cropping. Thus, intensified precrop effects were predicted. The expectations were tested primarily by investigating shoot parameters of spring wheat and mallow (2010), winter barley and winter rapeseed (2011), and winter rye and winter rapeseed (2012). Additionally, measuring of infiltration rates as well as investigations of nitrogen dynamics of biopore walls (drilosphere) were carried out.

The factor precrop species had a stronger influence on following crops than the factor duration of precrop cultivation. Frequently, lucerne caused more favourable precrop effects than chicory and fescue. Given the fact that allorhizal root architecture of lucerne and chicory were similar to each other, the more favourable precrop effect of lucerne was presumably being caused by higher amounts of residual nitrogen. This assumption was indorsed by results of a fertiliser trial including staggered nitrogen application to spring wheat as well as by results of measurements of mineral soil nitrogen. Both investigations hinted at a higher nitrogen level in soil for three years due to lucerne precrop compared to chicory and fescue.

Hood-Infiltrometer measurements could not reveal the subsoil structure changes which were detected by biopore counting. In contrast to that, a new tracer-based approach to investigate nitrogen dynamics of the drilosphere was promising. Results of this approach proposed nitrogen input caused by earthworms into drilosphere at least up to 75 - 105 cm soil depth. Nitrogen uptake of following spring wheat and mallow from subsoil deeper than 45 cm soil depth was shown.

Measurements of shoot gas exchange as well as nutrient analysis of soil and shoot biomass proposed that potentially high relevance of biopores for water and nutrient uptake by plants was masked by favourable soil hydrology and high nutrient content of the CeFiTs top soil.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	v
Abstract	vi
Abkürzungsverzeichnis	x
Abbildungsverzeichnis.....	xi
Tabellenverzeichnis	xiii
1 Einleitung und Literaturübersicht	1
2 Forschungsbedarf, Feldversuch und Hypothesen	7
3 Material und Methoden.....	11
3.1 Standort und Witterung.....	11
3.2 Versuchsdesign	13
3.3 Versuchsdurchführung.....	14
3.4 Probenahme und Messungen.....	15
3.4.1 Zeiternten	15
3.4.2 Ertragsstruktur	16
3.4.3 Gaswechsel	16
3.4.4 Hood-Infiltrometrie.....	18
3.4.5 Nährstoffgehalte von Pflanzenspross und Boden	20
3.5 Düngungssteigerungsversuch	20
3.6 ¹⁵ N-tracer-Versuch: Stickstoff-Deposition und -Wiederaufnahme	21
3.7 Statistische Auswertung	26
4 Ergebnisse	28
4.1 Vorfruchtphase	28
4.2 Nachfruchtphase.....	32
4.2.1 Erste Nachfrucht: Sommerweizen (2010).....	32
4.2.1.1 Sprossentwicklung und Gaswechsel.....	32
4.2.1.2 Ertragsstruktur.....	38
4.2.1.3 Nährstoffaufnahme in den Spross.....	40
4.2.1.4 Mineralischer Bodenstickstoff.....	43
4.2.2 Erste Nachfrucht: Futtermalve (2010).....	43
4.2.2.1 Sprossentwicklung und Gaswechsel.....	43

4.2.2.2	Nährstoffaufnahme in den Spross.....	49
4.2.3	Zweite Nachfrucht: Wintergerste (2011).....	50
4.2.3.1	Sprossentwicklung und Gaswechsel.....	50
4.2.3.2	Ertragsstruktur.....	54
4.2.3.3	Nährstoffaufnahme in den Spross.....	54
4.2.3.4	Mineralischer Bodenstickstoff.....	56
4.2.4	Zweite Nachfrucht: Winterraps (2011).....	57
4.2.4.1	Gaswechsel.....	57
4.2.4.2	Ertragsstruktur.....	58
4.2.4.3	Nährstoffaufnahme in das Korn.....	58
4.2.5	Relativ-Erträge der zweiten Nachfrüchte Wintergerste und Winterraps.....	59
4.2.6	Dritte Nachfrucht: Winterroggen (2012).....	59
4.2.6.1	Ertragsstruktur.....	59
4.2.6.2	Nährstoffaufnahme in den Spross.....	60
4.2.7	Dritte Nachfrucht: Winterraps (2012).....	61
4.2.7.1	Sprossentwicklung und Gaswechsel.....	61
4.2.7.2	Ertragsstruktur.....	68
4.2.7.3	Nährstoffaufnahme in den Spross.....	69
4.2.7.4	Mineralischer Bodenstickstoff.....	71
4.2.8	Relativ-Erträge der dritten Nachfrüchte Winterroggen und Winterraps.....	71
4.2.9	Übersicht der Sprossentwicklung, des Gaswechsels und der Ertragsbildung der Nachfrüchte.....	72
4.3	Düngungssteigerungsversuch.....	76
4.4	¹⁵ N-tracer-Versuch: Stickstoff-Deposition und -Wiederaufnahme.....	83
4.4.1	¹⁵ N-Eintrag aus Luzernemulch in verschiedene Bodenkompimente.....	83
4.4.2	¹⁵ N-Aufnahme aus dem Unterboden.....	84
4.5	Infiltrationsraten des Unterbodens.....	88
5	Diskussion.....	92
5.1	Nährstoffvermittelte Vorfruchteffekte aufgrund von biologischer Stickstofffixierung und infolge von Mulchschnitten.....	92

5.1.1	Stickstoff	92
5.1.2	Phosphor und Kalium.....	97
5.2	Bioporenassoziierte Vorfruchteffekte und Relevanz des Unterbodens für das Pflanzenwachstum.....	99
5.2.1	Nährstoffe: Bildung und Nutzung von <i>hot spots</i> in der Drilosphäre	99
5.2.2	Wasser und Nährstoffe: Bioporen als Ausbreitungswege für Wurzeln zur Erschließung des Unterbodens.....	107
5.2.3	Bodenhydrologie.....	111
5.2.4	Bedeutung von Bioporen für die Versorgung von Pflanzenbeständen...	113
5.3	Methodenevaluierung	115
5.4	Schlussfolgerungen	124
6	Zusammenfassung	128
7	Literaturverzeichnis	131
	Anhang.....	141
	Danksagung	175

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
ANOVA	Varianzanalyse (<i>Analysis of variance</i>)
BBCH	Entwicklungsstadien von Pflanzen entsprechend der Definition von Biologischer Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemischer Industrie
BFI	Blattflächenindex
<i>CeFiT</i>	Feldversuch, in dem die in der vorliegenden Arbeit dargestellten Untersuchungen vorgenommen wurden (<i>Central Field Trial</i>)
Kap.	Kapitel
KAS	Kalkammonsalpeter
Lu 1	einjährig kultivierte Luzerne
Lu 2	zweijährig kultivierte Luzerne
Lu 3	dreijährig kultivierte Luzerne
Lu 1 – 2	einjährig und zweijährig kultivierte Luzerne
Lu 1 – 3	einjährig, zweijährig und dreijährig kultivierte Luzerne
n. s.	nicht signifikant
<i>Ndfa</i>	Anteil des symbiotisch fixierten Stickstoffs (<i>Nitrogen derived from atmosphere</i>)
N_{\min}	Mineralischer Stickstoff im Boden (Nitrat und Ammonium)
PAR	Photosynthetisch nutzbare Strahlung (<i>photosynthetically active radiation</i>)
Rs 1	einjährig kultivierter Rohrschwengel
Rs 2	zweijährig kultivierter Rohrschwengel
Rs 3	dreijährig kultivierter Rohrschwengel
Rs 1 – 2	einjährig und zweijährig kultivierter Rohrschwengel
Rs 1 – 3	einjährig, zweijährig und dreijährig kultivierter Rohrschwengel
Tab.	Tabelle
TM	Trockenmasse
Ww 1	einjährig kultivierte Wegwarte
Ww 2	zweijährig kultivierte Wegwarte
Ww 3	dreijährig kultivierte Wegwarte
Ww 1 – 2	einjährig und zweijährig kultivierte Wegwarte
Ww 1 – 3	einjährig, zweijährig und dreijährig kultivierte Wegwarte

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Sprosstrockenmasse von Sommerweizen in Abhängigkeit von der Vorfruchtart.	32
Abb. 2: Blattflächenindex von Sommerweizen nach einjährig kultivierter Vorfrucht in Abhängigkeit von der Vorfruchtart.	33
Abb. 3: Blattphotosyntheserate von Sommerweizen bezogen auf 1 m ² Blattfläche nach Luzerne und Wegwarte in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht.	35
Abb. 4: Bestandes-Blattphotosyntheserate von Sommerweizen bezogen auf 1 m ² Bodenfläche nach Luzerne und Wegwarte in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht.	36
Abb. 5: Blatttranspirationsrate von Sommerweizen bezogen auf 1 m ² Blattfläche nach Luzerne und Wegwarte in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht.	37
Abb. 6: Bestandes-Blatttranspirationsrate von Sommerweizen bezogen auf 1 m ² Bodenfläche nach Luzerne und Wegwarte in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht.	38
Abb. 7: Sprosstrockenmasse von Futtermalve in Abhängigkeit von der Vorfruchtart.	44
Abb. 8: Blattflächenindex von Futtermalve nach einjährig kultivierter Vorfrucht in Abhängigkeit von der Vorfruchtart.	45
Abb. 9: Blattphotosyntheserate von Futtermalve bezogen auf 1 m ² Blattfläche nach einjährig kultivierter Vorfrucht in Abhängigkeit von der Vorfruchtart.	46
Abb. 10: Blattphotosyntheserate von Futtermalve bezogen auf 1 m ² Blattfläche nach Luzerne und Wegwarte in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht.	47
Abb. 11: Bestandes-Blattphotosyntheserate von Futtermalve bezogen auf 1 m ² Bodenfläche nach einjährig kultivierter Vorfrucht in Abhängigkeit von der Vorfruchtart.	47
Abb. 12: Blatttranspirationsrate von Futtermalve bezogen auf 1 m ² Blattfläche nach einjährig kultivierter Vorfrucht in Abhängigkeit von der Vorfruchtart.	48
Abb. 13: Bestandes-Blatttranspirationsrate von Futtermalve bezogen auf 1 m ² Bodenfläche nach einjährig kultivierter Vorfrucht in Abhängigkeit von der Vorfruchtart.	49
Abb. 14: Sprosstrockenmasse von Wintergerste in Abhängigkeit von der Vorfruchtart.	51
Abb. 15: Blattphotosyntheserate von Wintergerste bezogen auf 1 m ² Blattfläche in Abhängigkeit von der Vorfruchtart.	52
Abb. 16: Bestandes-Blattphotosyntheserate von Wintergerste bezogen auf 1 m ² Bodenfläche in Abhängigkeit von der Vorfruchtart.	53
Abb. 17: Blattphotosyntheserate von Winterraps bezogen auf 1 m ² Blattfläche in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht.	57
Abb. 18: Sprosstrockenmasse von Winterraps in Abhängigkeit von der Vorfruchtart.	61
Abb. 19: Blattflächenindex von Winterraps in Abhängigkeit von der Vorfruchtart.	62

Abb. 20: Sprosslänge von Winterraps in Abhängigkeit von der Vorfruchtart.	63
Abb. 21: <i>SPAD-Value</i> von Winterraps in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrüchte.	64
Abb. 22: Bestandes-Blattphotosyntheserate von Winterraps bezogen auf 1 m ² Bodenfläche in Abhängigkeit von der Vorfruchtart.	65
Abb. 23: Bestandes-Blattphotosyntheserate von Winterraps bezogen auf 1 m ² Bodenfläche nach optimierter Schätzung in Abhängigkeit von der Vorfruchtart.	66
Abb. 24: Bestandes-Blatttranspirationsrate von Winterraps bezogen auf 1 m ² Bodenfläche in Abhängigkeit von der Vorfruchtart.	67
Abb. 25: Bestandes-Blatttranspirationsrate von Winterraps bezogen auf 1 m ² Bodenfläche nach optimierter Schätzung in Abhängigkeit von der Vorfruchtart.	68
Abb. 26: ¹⁵ N-Anteil des Gesamt-Stickstoffs im <i>bulk</i> -Boden und der Drilosphäre aus markierten Unterteilstücken in Abhängigkeit von der Bodentiefe sowie aus nicht-markierten Kontrollflächen nach Ende der Depositionsphase im Herbst 2011.	84
Abb. 27: ¹⁵ N-Anteil des Gesamt-Stickstoffs im Malvenspross sowie in Korn und Stroh von Sommerweizen aus markierten Unterteilstücken im Vergleich zu entsprechenden Proben aus nicht-markierten Kontrollflächen.	85
Abb. 28: Verminderung des ¹⁵ N-Anteils des Gesamt-Stickstoffs von <i>bulk</i> -Boden und Drilosphäre aus markierten Unterteilstücken vor gegenüber nach der Nachfrucht in der Tiefenstufe 45 cm - 75 cm in Abhängigkeit von der Nachfruchtart.	86
Abb. 29: ¹⁵ N-Anteil des Gesamt-Stickstoffs von <i>bulk</i> -Boden und Drilosphäre aus markierten Unterteilstücken in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der Nachfrucht sowie aus nicht-markierten Kontrollflächen nach Ende der Wiederaufnahmephase im Herbst 2012.	87
Abb. 30: Feldgesättigte Wasserleitfähigkeit des Bodens im Jahr 2011 in 45 cm Tiefe in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante.	88
Abb. 31: Feldgesättigte Wasserleitfähigkeit des Bodens im Jahr 2012 in 45 cm Tiefe in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante.	89
Abb. 32: Infiltration in Poren mit einem Äquivalenzdurchmesser von > 5 mm im Jahr 2011 in 45 cm Tiefe in Abhängigkeit von der Anzahl der Poren > 5 mm.	89
Abb. 33: Infiltration in Poren mit einem Äquivalenzdurchmesser von > 5 mm im Jahr 2012 in 45 cm Tiefe in Abhängigkeit von der Anzahl der Poren > 5 mm.	90
Abb. 34: Infiltration in Poren mit einem Äquivalenzdurchmesser von 2 – 5 mm im Jahr 2011 in 45 cm Tiefe in Abhängigkeit von der Anzahl der Poren 2 – 5 mm.	90
Abb. 35: Infiltration in Poren mit einem Äquivalenzdurchmesser von 2 – 5 mm im Jahr 2012 in 45 cm Tiefe in Abhängigkeit von der Anzahl der Poren 2 – 5 mm.	91

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Mengen von organisch gebundenem Kohlenstoff, Gesamt-Stickstoff, Gesamt-Phosphor, pflanzenverfügbarem, mit Calcium-Acetat-Laktat extrahierbarem Phosphor, Gesamt-Kalium, pflanzenverfügbarem, mit Ammonium-Acetat extrahierbarem und „nicht-austauschbarem“ Kalium in Illit-Zwischenschichten im <i>CeFIT</i> in Abhängigkeit von der Bodentiefe.	11
Tab. 2:	Witterung in den Versuchsjahren 2010 bis 2012 und im langjährigen Mittel 1956 bis 2010.	12
Tab. 3:	Sprosstrockenmasse der Vorfruchtbestände als Summe der Aufwüchse eines Jahres bzw. aller Jahre (2007 - 2009) in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante.	28
Tab. 4:	Stickstoffaufnahme der Vorfruchtbestände in Summe der Aufwüchse eines Jahres bzw. aller Jahre (2007 - 2009) in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante.	29
Tab. 5:	Phosphoraufnahme der Vorfruchtbestände in Summe der Aufwüchse eines Jahres bzw. aller Jahre (2007 - 2009) in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante.	30
Tab. 6:	Kaliumaufnahme der Vorfruchtbestände in Summe der Aufwüchse eines Jahres bzw. aller Jahre (2007 - 2009) in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante.	30
Tab. 7:	Phosphorgehalt des Bodens im Frühjahr 2010 in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der Vorfruchtvariante.	31
Tab. 8:	Kaliumgehalt des Bodens im Frühjahr 2010 in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der Vorfruchtvariante.	31
Tab. 9:	Wechselwirkung der Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht beim Parameter Sprosstrockenmasse von Sommerweizen zur ersten Zeiternte.	33
Tab. 10:	Wechselwirkung der Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht beim Parameter Blattflächenindex von Sommerweizen zur zweiten Zeiternte.....	34
Tab. 11:	Wechselwirkung der Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht beim Parameter Bestandes-Blattphotosyntheserate von Sommerweizen bezogen auf 1 m ² Bodenfläche zur ersten Messung.	36
Tab. 12:	Wechselwirkung der Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht beim Parameter Bestandes-Blatttranspirationsrate von Sommerweizen bezogen auf 1 m ² Bodenfläche zur dritten Messung.	38
Tab. 13:	Ertragsstruktur von Sommerweizen in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht.	39
Tab. 14:	Wechselwirkung der Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht beim Parameter Korntrockenmasse von Sommerweizen.	39

Tab. 15: Nährstoffaufnahme in den Spross von Sommerweizen zu den fünf Zeiternteterminen und im Erntegut in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht.	41
Tab. 16: Wechselwirkung der Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht bei Untersuchungen zur Nährstoffaufnahme in den Spross von Sommerweizen.	42
Tab. 17: Sprosstrockenmasse von Futtermalve in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht.	45
Tab. 18: Nährstoffaufnahme in den Spross von Futtermalve zu den drei Zeiternteterminen in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht.	50
Tab. 19: Ertragsstruktur von Wintergerste in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht.	54
Tab. 20: Nährstoffaufnahme in den Spross von Wintergerste zu den fünf Zeiternteterminen und im Erntegut in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht.	56
Tab. 21: Ertragsstruktur von Winterraps in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht.	58
Tab. 22: Nährstoffaufnahme von Winterraps ins Korn in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht.	59
Tab. 23: Relativ-Ertrag im Jahr 2011 (gemittelt über die Kulturen Wintergerste und Winterraps) in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht.	59
Tab. 24: Ertragsstruktur von Winterroggen in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht.	60
Tab. 25: Nährstoffaufnahme von Winterroggen in Korn und Stroh in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht.	61
Tab. 26: Wechselwirkung der Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht beim Parameter Sprosstrockenmasse von Winterraps zur vierten Zeiternte.	62
Tab. 27: Wechselwirkung der Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht beim Parameter <i>SPAD-Value</i> von Winterraps zur vierten Zeiternte.	64
Tab. 28: Ertragsstruktur von Winterraps in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht.	69
Tab. 29: Nährstoffaufnahme in den Spross von Winterraps zu den fünf Zeiternteterminen und im Erntegut in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht.	70
Tab. 30: Relativ-Ertrag im Jahr 2012 (gemittelt über die Kulturen Winterroggen und Winterraps).	71
Tab. 31: Wechselwirkung der Faktoren Nachfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht beim Parameter relativer Kornertrag im Jahr 2012 (gemittelt über die Kulturen Winterroggen und Winterraps).	72

Tab. 32: Anzahl bzw. Anteil von Ergebnissen, die von den Versuchsfaktoren in Haupt- bzw. Wechselwirkung beeinflusst wurden.	72
Tab. 33: Signifikanzabstufungen der Ergebnisse von Untersuchungen zur Sprossentwicklung, zum Gaswechsels und zur Ertragsbildung der Nachfrüchte.	75
Tab. 34: Sprosstrockenmasse, Blattflächenindex, Sprosslänge und <i>SPAD-Value</i> von Sommerweizen zur ersten Zeiternte in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante und der Düngungsstufe.	77
Tab. 35: Nährstoffaufnahme in den Spross von Sommerweizen zur ersten Zeiternte in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante und der Düngungsstufe.	78
Tab. 36: Sprosstrockenmasse, Blattflächenindex, Sprosslänge und <i>SPAD-Value</i> von Sommerweizen zur zweiten Zeiternte in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante und der Düngungsstufe.	79
Tab. 37: Nährstoffaufnahme in den Spross von Sommerweizen zur zweiten Zeiternte in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante und der Düngungsstufe.	80
Tab. 38: Ertragsstruktur von Sommerweizen in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante und der Düngungsstufe.	81
Tab. 39: Nährstoffaufnahme in das Korn von Sommerweizen in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante und der Düngungsstufe.	82
Tab. 40: Nährstoffaufnahme in das Stroh von Sommerweizen in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante und der Düngungsstufe.	83
Tab. 41: Anteilige Stickstoffaufnahme aus dem Unterboden in Korn und Stroh von Sommerweizen bzw. in den Spross von Malve in Abhängigkeit vom angenommenen mittleren ¹⁵ N-Anteil des aus dem Unterboden aufgenommenen Stickstoffs.	87

1 Einleitung und Literaturübersicht

Nährstoffmanagement und Fruchtfolgegestaltung im Ökologischen Landbau

Ein zentrales Ziel des Nährstoffmanagements im Ökologischen Landbau ist es, die organische Bodensubstanz zu erhalten und zu mehren und dadurch bodenbiologische Aktivität und Nährstoffverfügbarkeit zu fördern. Der Boden wird als Organismus angesehen und versorgt. Darauf ausgerichtete Maßnahmen gewährleisten indirekt die Ernährung der Pflanze (RUSCH 1968; LØES & ØGAARD 1997). Weitgehend wird auf den Einsatz von leichtlöslichen Düngern mit großenteils unmittelbar pflanzenverfügbaren Nährstoffen verzichtet. Infolge dessen ist die direkte Beeinflussung des Nährstoffgehalts der Bodenlösung im Ökologischen Landbau nur sehr eingeschränkt möglich. Dieser Sachverhalt bedingt, dass die Sicherstellung einer ausreichenden Nährstoffaufnahme von ökologisch geführten Pflanzenbestände besonderer Beachtung im pflanzenbaulichen Management bedarf. Die Nährstoffversorgung wird vor allem durch mittel- und langfristige Strategien optimiert, die kontinuierlich umgesetzt werden müssen. Die Fruchtfolgegestaltung ist das zentrale Element der innerbetrieblichen Bereitstellung von Pflanzennährstoffen und der zielgerichteten Organisation der Nährstoffflüsse (KÖPKE 1993). Die Integration von Körner- und Futterleguminosen in die Fruchtfolge ermöglicht durch symbiotische Stickstofffixierung einen Nährstoffinput in den landwirtschaftlichen Betrieb (KAHNT & KÖPKE 1997). Der fixierte Stickstoff kann entweder in Form von auf dem Feld verbleibender Biomasse oder nach deren Einsatz als Futter für Nutztiere in Form von Dung von nachfolgenden Kulturen genutzt werden, sobald Destruenten die Nährstoffe pflanzenverfügbar gemacht haben. Insbesondere mehrjähriger Feldfutterbau stellt eine wichtige Quelle von organischer Substanz für Humusaufbau und -erhalt dar und unterstützt die damit einhergehenden förderlichen Wirkungen auf Bodenleben, Nährstoffverfügbarkeit, Gefügestabilität etc. (FULLEN 1998; BROWN et al. 2000; RILEY et al. 2008).

In der Fruchtfolgeplanung müssen die besonderen Eigenschaften der Nährstoffe berücksichtigt werden, da sie Auswirkungen auf deren Aufnahme haben. So wird eine optimale Nutzung von Residualstickstoff beispielsweise durch eine tiefgründige Durchwurzelung selbst bei geringer Wurzellängendichte erreicht, da Nitrat vor allem mittels Massenfluss an die Wurzeloberfläche transportiert wird, wobei vergleichsweise große Distanzen überwunden werden (CLASSEN 1993). Im Unterschied dazu gelangen die weniger mobilen Nährstoffe Phosphor und Kalium vornehmlich durch Diffusion über kurze Distanzen zur Wurzel (CLASSEN 1993), weshalb die chemische Verfügbarkeit von der räumlichen Zugänglichkeit zu unterscheiden ist (JUNGK 1993). Insbesondere unter der Bedingung einer limitierten Nährstoffzufuhr ist daher die optimierte Nutzung der Vorräte in der Festphase von hoher Bedeutung (KÖPKE 1994; HANEKLAUS et al. 2002), die wiederum die intensive Durchwurzelung eines möglichst großen Bodenvolumens voraussetzt.

Im Gegensatz dazu werden in Forschung und Praxis vornehmlich oder ausschließlich die Nährstoffressourcen des Oberbodens berücksichtigt. Bodenuntersuchungen erfassen Nährstoffe oft nur bis in eine Tiefe von 90 cm (N_{\min} -Beprobung) oder (im Falle von Phosphor

und Kalium) sogar ausschließlich im zumeist gepflügten Oberboden (VDLUFA 1991). Eine Literaturschau von Versuchen in unterschiedlichen Agrarökosystemen belegt jedoch, dass in Abhängigkeit vom Standort über zwei Drittel der im Bodenprofil enthaltenen Pflanzennährstoffe in Unterböden lokalisiert sein können (KAUTZ et al. 2013b). Dieser Umstand verdeutlicht, dass das Ziel der umfangreichen Nutzung von Nährstoffen aus der Festphase des Bodens nur bei weitestmöglicher Erschließung des Unterbodens erreicht werden kann. Hierbei ist zu beachten, dass der Begriff des Unterbodens nicht einheitlich verwendet wird, sondern dass abhängig vom fachlichen Hintergrund unterschiedliche pflanzenbauliche oder bodenkundliche Abgrenzungen vorgenommen werden. In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff Unterboden pflanzenbaulich definiert als der Boden unterhalb von 45 cm Tiefe, der keine Beeinflussung durch wendende Bodenbearbeitung und die damit oftmals einhergehende Krümmenbasisverdichtung erfährt.

Bisherige Untersuchungen zur anteiligen Nährstoffaufnahme aus dem Unterboden belegen, dass die Nutzung der dortigen Ressourcen stark variiert. In Untersuchungen auf tiefgründigen Löss-Parabraunerden stammten 9–75 % der Stickstoffaufnahme von Winterweizen aus dem Unterboden (KUHLMANN et al. 1989). Hohe Beiträge des Unterbodens wurden insbesondere dann festgestellt, wenn aufgrund von Trockenheit im Oberboden dort lokalisierte Ressourcen nicht umfangreich genutzt werden konnten. Ein ebenfalls hoher Anteil unterbodenbürtiger Stickstoffaufnahme wurde erreicht, wenn durch geringe Düngung die Stickstoffgehalte des Oberbodens vergleichsweise niedrig waren (HABERLE et al. 2006).

Die Beiträge des Unterbodens zur Phosphorversorgung landwirtschaftlicher Nutzpflanzen werden in großer Spannweite angegeben. Während für einige Standorte Anteile von 20–33 % berechnet wurden (HAAK 1981), ergaben andernorts vorgenommene Untersuchungen in Abhängigkeit von den Phosphorgehalten des Oberbodens einen Beitrag des Unterbodens zur Phosphoraufnahme von Sommerweizen zwischen 37 und 85 % (KUHLMANN & BAUMGÄRTEL 1991). Die Ergebnisse anderer Untersuchungen deuten analog zu den erwähnten Stickstoff-Untersuchungen darauf hin, dass geringe Phosphor-Oberbodengehalte, z. B. infolge von geringer oder ausbleibender Düngung, durch erhöhte Aufnahme des Nährstoffs aus dem Unterboden zumindest teilweise kompensiert werden konnten (RICHTER et al. 1977; GARZ et al. 2000).

Auch hinsichtlich des Unterboden-Beitrags zur Kaliumversorgung von Sommergetreide wurden große Unterschiede festgestellt. In Abhängigkeit von den Kaliumgehalten des Ober- und des Unterbodens wurden etwa 9–70 % des Kaliums aus dem Unterboden aufgenommen (HAAK 1981; KUHLMANN 1990). Geringere Kaliumgehalten im Oberboden führten zu höheren Kaliumaufnahmen aus dem Unterboden; den gleichen Effekt hatten höhere Kaliumgehalten im Unterboden (RICHTER et al. 1977; KUHLMANN 1990).

Auch für Magnesium (KUHLMANN & BAUMGÄRTEL 1991) und Kalzium (HAAK 1981) wurden substantielle Beiträge des Unterbodens zur Versorgung der Pflanzenbestände nachgewiesen.

Der Unterboden kann zusätzlich zu seiner Bedeutung für die Nährstoffakquise einen wesentlichen Beitrag zur Wasserversorgung von Pflanzenbeständen leisten. Die im Unterboden vorhandenen Wasservorräte sind jedoch nur nutzbar, wenn eine ausreichende Durchwurzelungstiefe erreicht wird. Falls diese jedoch z. B. aufgrund von Dichtlagerung des Bodens limitiert ist, können beachtliche Anteile der (theoretisch) nutzbaren Feldkapazität ungenutzt im Unterboden verbleiben, obwohl die darauf wachsenden Pflanzenbestände Symptome von starkem Trockenstress aufweisen (PASSIOURA 1983; KIRKEGAARD et al. 2007). Ähnlich wie bei Nährstoffen muss daher auch hinsichtlich des Bodenwassers zwischen physikalisch verfügbaren und räumlich zugänglichen Ressourcen unterschieden werden (BOUMA 1990), wobei sich der Unterschied aus der Durchwurzelbarkeit der Böden ergibt (DROOGERS et al. 1997). Die verstärkte Durchwurzelung eines größeren Volumens des Unterbodens hätte somit zur Folge, dass Pflanzenbeständen zusätzliche Wasserreserven zur Verfügung stehen würden. Dieser Sachverhalt kann unter den sich ändernden klimatischen Verhältnissen mit voraussichtlich häufiger auftretender Frühsommertrockenheit zukünftig von hoher Bedeutung sein (KAUTZ et al. 2013b).

Zur Nutzung der Ressourcen des Unterbodens ist im Falle von Stickstoff und Wasser eine große Durchwurzelungstiefe, im Falle von Phosphor und Kalium eine hohe Wurzellängendichte notwendig, da diese proportional zum ausgeschöpften Bodenvolumen ist (CLASSEN 1993). Oftmals kann die erwünschte Durchwurzelungstiefe und -intensität bis in den Unterboden jedoch aufgrund der dort höheren Lagerungsdichte und des geringeren Sauerstoffgehaltes nicht realisiert werden (KAUTZ et al. 2013b). Dieser Sachverhalt ist – neben dem erwähnten Einfluss der Nährstoffgehalte im Ober- und Unterboden – eine Hauptursache für die erhebliche Spannbreite der festgestellten Anteile unterbodenbürtiger Nährstoffaufnahme. Pflanzenbauliche Maßnahmen, die zu einer verbesserten räumlichen Zugänglichkeit von Nährstoffen in der Festphase führen, können daher zu einer ausreichend hohen Aufnahme von Phosphor und Kalium trotz geringer Nährstoffkonzentrationen beitragen (KÖPKE & WERNER 1993).

In diesem Zusammenhang sind zusätzlich zu den genannten noch weitere Vorfruchteffekte von Bedeutung. Wurzeln von Pflanzen wirken physikalisch auf den Bodenverband und verändern das Bodengefüge bis in den Unterboden (McCALLUM et al. 2004), indem Wurzelröhren geschaffen werden. Die Röhren werden nach Absterben und Abbau der Wurzeln frei und bilden Hohlräume (YUNUSA et al. 2002; JONES et al. 2004). Tiefgrabende Regenwürmer können den gleichen Effekt durch die Anlage ihrer Wohnröhren verursachen (BEVEN & GERMANN 1982; PASSIOURA 1991). Wurzel- und Regenwurmröhren werden zusammenfassend als Bioporen angesprochen. Größere Bioporen sind der Gruppe der Makroporen zuzurechnen, die neben biogenen auch abiotisch entstandene Poren umfasst. Eine allgemeingültige Definition für den Äquivalenzdurchmesser von Makroporen existiert nicht (BEVEN & GERMANN 1982). In dieser Arbeit wird einer in der Literatur gebräuchlichen Definition gefolgt, nach der der Begriff Makroporen für Poren mit einem Durchmesser ≥ 1 mm verwendet wird (LUXMOORE 1981). Im Fokus der vorliegenden Arbeit

stehen mittel- und großlumige Makroporen, die durch einen Äquivalenzdurchmesser von 2 – 5 mm bzw. > 5 mm klassiert werden. Diese Definition erfolgt in Anlehnung an aktuelle Veröffentlichungen aus der Arbeitsgruppe, in deren Rahmen diese Arbeit entstand (KAUTZ et al. 2014a; PERKONS et al. 2014b; HAN et al. 2017).

Zahlreiche Versuche in unterschiedlichen Agrarökosystemen belegten einen erheblichen Einfluss von Makroporen auf das Pflanzenwachstum insbesondere unter mindergünstigen Bedingungen und weisen darauf hin, dass dieser Effekt durch Erschließung des Unterbodens verursacht wurde. So wurde auf einem Standort in Alabama, USA, nach dem Anbau von Bahiagrass eine deutliche Zunahme von Makroporen im Verdichtungshorizont festgestellt (ELKINS et al. 1977; ELKINS 1985). Die Nachfrucht Baumwolle erreichte ein Mehrfaches der sonst realisierten Durchwurzelungstiefe und Ertragshöhe. Analog dazu ergaben Modellrechnungen, dass Bioporen den Ertrag von Weizen erhöhen können, indem sie den Zugang zu Wasser im Unterboden erleichtern (JAKOBSEN & DEXTER 1988). Dieser Effekt kann bereits für sehr junge Pflanzen von entscheidender Bedeutung sein (CORNISH 1993). Auf einem kompaktierten Sandboden in Westaustralien wurde nach Lupine eine Ertragssteigerung von Weizen festgestellt, die nicht nur auf dem Stickstoffeffekt der Leguminose beruhte, sondern auch auf Gefügeänderungen zurückzuführen war (HENDERSON 1989). In andernorts vorgenommenen Untersuchungen glichen Bioporen und natürliche Risse die Nachteile eines verdichteten Substrates gegenüber einem lockeren Substrat ohne Bioporen aus (STYPA et al. 1987). Untersuchungen zu Sojabohnen ergaben, dass deren Wurzeln in Bioporen, die von Rettich gebildet worden waren, einwuchsen und infolge dessen Wasser aus dem Unterboden nutzen konnten (WILLIAMS & WEIL 2004). Auf einem trockenen Standort hatte dieser Sachverhalt eine Erhöhung des Kornertrags zur Folge, während auf einem feuchteren Standort kein Einfluss auf den Ertrag festgestellt wurde. Diese Befunde stimmen mit Ergebnissen weiterer Untersuchungen überein, in denen ein positiver Effekt von Bioporen auf das Pflanzenwachstum nur unter trockenen Bedingungen nachgewiesen wurde (VOLKMAR 1996; STIRZAKER et al. 1996). In einem Modellversuch wurde gezeigt, dass eine zunehmende Dichte von Bioporen geeignet ist, den Zugang durch einen Verdichtungshorizont hindurch zu Nährstoffen und Wasser des Unterbodens zu verbessern und damit das Pflanzenwachstum zu fördern (MCKENZIE et al. 2009).

Darüber hinaus haben speziell Regenwurmrohren Eigenschaften, die das Pflanzenwachstum in besonderer Weise beeinflussen. Bereits in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts wurde vermutet, dass Regenwurmgänge Pflanzenwurzeln nicht nur in die Lage versetzen, große Bodentiefen zu erreichen, sondern dass die Auskleidung der Gänge mit Wurm Kot auch zur Nährstoffversorgung der Pflanzen beitragen kann (HENSEN 1892). Im Zuge weiterer Arbeiten wurde die Auskleidung von Bioporen, die Drilosphäre (BOUCHÉ 1975), hinsichtlich ihrer Nährstoffgehalte untersucht und mit anderen Bodenkompartmenten verglichen. Dabei wurde mehrfach gezeigt, dass die Auskleidung von Wohnröhren des Tauwurms (*Lumbricus terrestris* L.), einer tiefgrabenden Regenwurmart, im Unterboden dreifach höhere Stickstoffgehalte aufweisen kann als der umgebende Boden, und dass damit sogar der

mittlere Stickstoffgehalt des Oberbodens überschritten wird. Für Phosphor wurden ebenfalls stets höhere Gehalte in der Röhrenauskleidung als im umliegenden Boden ermittelt; die Doppellactat-Löslichkeit war darüber hinaus zusätzlich erhöht. Die Kaliumgehalte sind zumeist niedriger als in der Bodenmatrix, doch ist der Doppellactat-lösliche Anteil wie bei Phosphor erhöht (GRAFF 1970; TIUNOV & SCHEU 1999).

Makroporen können somit für Wurzeln nachfolgender Pflanzen als Ausbreitungspfad und/oder als Ort der Wasser- und Nährstoffaufnahme dienen (MCMAHON & CHRISTY 2000), und sonst nicht erreichbare Ressourcen des Unterbodens zugänglich machen (EHLERS et al. 1983; VOLKMAR 1996; PASSIOURA 1991; LESTURGEZ et al. 2004; WILLIAMS & WEIL 2004).

Außerdem haben insbesondere vertikal orientierte Makroporen mit einem Durchmesser > 5 mm bedeutenden Einfluss auf die Bodenphysik (EHLERS 1975a; JOSCHKO et al. 1989; SHIPITALO & EDWARDS 1996), da sie zumeist luftführend sind (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1984). Falls jedoch z. B. aufgrund von Starkniederschlägen (annähernd) spannungsfreies Wasser vorhanden ist, tritt in großlumigen Poren präferenzialer Fluss auf (BEVEN & GERMANN 1982; LEE & FOSTER 1991). Die schnelle Drainierung mittels präferenzialen Flusses bedingt, dass anaerobe Bedingungen, die durch Wasserstau verursacht werden und Wurzeln schädigen können, vermieden werden (SHIPITALO et al. 1990; SHIPITALO & EDWARDS 1996). Zudem kann präferenzialer Fluss durch die Ableitung von Wasser die Gefahr von Erosion und Oberflächenabfluss erheblich vermindern (ROTH & JOSCHKO 1991).

Die Bedeutung von Bioporen hinsichtlich Wasser- und Nährstoffaufnahme sowie Erosionsvermeidung ist insbesondere für landwirtschaftliche Systeme mit begrenzter Nährstoffzufuhr hoch, da diese auf umfängliche Nutzung des am Standort verfügbaren Wassers und der vorhandenen Nährstoffvorräte angewiesen sind. Zusätzlich ist die Zyklierung der Nährstoffe von großer Wichtigkeit, wozu Bioporen ebenfalls einen Beitrag leisten können. Diese Strategie ist potentiell aber nicht nur für landwirtschaftliche *low input*-Systeme bedeutsam. Eine verbesserte Nutzbarkeit des Unterbodens und seiner Ressourcen könnte den landwirtschaftlichen Pflanzenbau insgesamt unabhängiger von stark nährstoffangereicherten Oberböden machen (JUNGK 1993), die intensiv-konventionelle Systeme prägen. Diese sind häufig durch umfängliche Nährstoffzufuhren durch Dünger oder Futtermittel in das landwirtschaftliche System gekennzeichnet. Die Ertragssteigerungen der vergangenen Jahrzehnte wurden u. a. durch die Einführung entsprechender Dünger in die landwirtschaftliche Praxis ermöglicht. Zukünftig wird aufgrund der wachsenden Weltbevölkerung und weiterer Verbreitung ressourcenintensiver Ernährungsstile ein weiter ansteigender Einsatz prognostiziert (DAWSON & HILTON 2011).

Insbesondere die Bereitstellung von Stickstoff- und Phosphor-Düngern ist aber Limitationen unterworfen, die mittel- bis langfristig deren Einsatz einschränken werden. Elementarer Stickstoff ist Hauptbestandteil der Erdatmosphäre und steht somit auch langfristig in ausreichenden Mengen zur Verfügung, doch ist seine Reduktion im Haber-Bosch-Verfahren sehr energieaufwändig. Daher wird der Einfluss steigender Energiekosten auf Stickstoffdüngerpreise bereits seit den Ölkrisen in den 1970er Jahren diskutiert (MUDAHAR &

HIGNETT 1985). Der Einsatz von technisch erzeugtem Stickstoffdünger ist jedoch nicht nur ökonomisch begrenzt, sondern wird auch aus ökologischer Sicht hinterfragt. Ein Grund dafür ist, dass je nach angebaute Kultur der größte Teil des insgesamt für den Anbau benötigten Energieinputs für die Erzeugung von Stickstoffdünger aufgewendet wird (PELLETIER et al. 2008). Außerdem hat mineralischer Stickstoffdünger im Unterschied zu organischen Düngern weder einen direkten humusmehrenden Effekt noch fördert er das Edaphon durch Nahrungszufuhr. Zudem ist vor allem mineralischer Stickstoffdünger in Form von Nitrat potentiell auswaschungsgefährdet und kann somit zur Eutrophierung von Gewässern führen (KHAN et al. 2018). Diese Gründe führen dazu, dass mineralische Stickstoffdünger im Ökologischen Landbau nicht eingesetzt werden dürfen.

Im Unterschied zur Erzeugung von mineralischen Stickstoffdüngern ist der Energieaufwand für die Herstellung von Phosphordünger geringer, jedoch sind die global abbaubaren Vorräte endlich und könnten innerhalb der nächsten 50 bis 100 Jahre erschöpft sein (CORDELL et al. 2009). Zudem enthalten Rohphosphate und daraus hergestellte Düngemittel zumeist Schwermetalle und/oder Uran, die durch wiederholte Düngung auf landwirtschaftlichen Nutzflächen akkumulieren und somit potentiell in Nahrungsmittel aufgenommen werden können (HAMAMO et al. 1995; GIUFFRÉDE LÓPEZ CARNELO et al. 1997; ATAFAR et al. 2008). In diesem Zusammenhang werden der verantwortungsvolle, sparsame Einsatz der Dünger und die möglichst umfängliche Rezyklierung der Nährstoffe Düngestrategien zunehmend prägen.

2 Forschungsbedarf, Feldversuch und Hypothesen

Die potentiell stark förderlichen Einflüsse von Bioporen auf verschiedene Pflanzenbestände sind durch zahlreiche Untersuchungen belegt (Kap. 1). Im Unterschied dazu ist eine Reihe von Fragen zur zielgerichteten Förderung der Bioporengnese durch Fruchtfolgegestaltung ungeklärt. Darüber hinaus besteht Forschungsbedarf zur Bedeutung der Bioporengnese für Wachstum und Ertragsbildung nachfolgender Kulturen in Abhängigkeit von der Nachfruchtart.

Das Ziel der dieser Arbeit zugrunde liegenden Versuche war es daher, in einem ersten Schritt systematisch abgestuft günstige Bedingungen für die Bioporengnese zu schaffen. Dazu wurden verschiedene Futterpflanzen mit kontrastierenden Wurzelsystemen für unterschiedliche Zeitspannen angebaut. Im Feldversuch wurden Luzerne (*Medicago sativa* L.), Wegwarte (*Cychorium intybus* L.) und Rohrschwingel (*Festuca arundinacea* SCHREB.) für jeweils ein, zwei und drei Jahre kultiviert. Die Futterpflanzenbestände wurden jeweils bei Nutzungsreife gemulcht, die zerkleinerte Sprossmasse verblieb auf dem Feld.

Es wurde angenommen, dass die Varianten unterschiedlich starken Einfluss auf das Bodengefüge haben. Die Fähigkeit von Pflanzen, in dichtgelagerten Boden einzuwachsen und somit die Makroporosität zu erhöhen, hängt unter anderem vom Pflanzentyp (CRESSWELL & KIRKEGAARD 1995), von der Kulturdauer (einjährig verglichen mit mehrjährig) (BENJAMIN et al. 2007) und von der Wurzelsystem-Morphologie (homorhiz verglichen mit allorhiz) ab. Zudem wurden Unterschiede zwischen Ein- und Zweikeimblättrigen festgestellt; oftmals konnten Zweikeimblättrige besser in dichtgelagerten Boden einwachsen als Einkeimblättrige (MATERECHERA et al. 1992). Einen entscheidenden Einfluss hat auch der Wurzeldurchmesser, da mit steigender Wurzelstärke das Eindringvermögen zunimmt (ELKINS 1985; MISRA et al. 1986; STIRZAKER et al. 1996).

Alle drei im Versuch genutzten Futterpflanzen können nach Ergebnissen andernorts durchgeführter Untersuchungen etwa 2 m tief in den Boden einwachsen, doch bilden Luzerne und Wegwarte als allorhize Pflanzen dickere Wurzeln aus als der homorhize Rohrschwingel (KUTSCHERA & LICHTENEGGER 1982; KUTSCHERA et al. 2009). Dementsprechend wurde erwartet, dass die allorhizen Futterbestände eine intensivere Bioporengnese aufweisen würden als Rohrschwingel.

Darüber hinaus wurde angenommen, dass die Vorfrüchte unterschiedliche Effekte auf den am Versuchsstandort vorkommenden anözischen Tauwurm (*Lumbricus terrestris* L.) haben. Andernorts wurden bei Populationserhebungen unter Wegwarte mehr Regenwurmgänge gefunden als unter Luzerne, am wenigsten unter Weidelgras (SPRINGETT & GRAY 1997). Da die Pflanzenbestände im *CeFit* bei Nutzungsreife gemulcht wurden, stand über einen Zeitraum von ein bis drei Jahren eine reiche Nahrungsgrundlage für Regenwürmer zur Verfügung, die nach Ergebnissen mehrerer Autoren deren Abundanz fördern konnte (GRAFF 1970; SHIPITALO et al. 1988). Die teils mehrjährige Bodenruhe war ebenfalls geeignet, Regenwürmer zu schonen und damit den Populationsaufbau zu fördern (EHLERS 1975b; ERNST & EMMERLING

2009; KUNTZ et al. 2013). Untersuchungen anderer Autoren belegten den Eintrag von organischem Material durch Regenwürmer in den Boden (CORTEZ et al. 1989; BINET & CURMI 1992). In der Wandung von Regenwurmröhren wurden verglichen mit dem *bulk*-Boden erhöhte Nährstoffgehalte und zudem eine verbesserte Verfügbarkeit der Nährstoffe festgestellt (GRAFF 1970). Die Wiederaufnahme von Nährstoffen aus der Drilosphäre des Unterbodens durch Pflanzen wurde bislang jedoch nicht untersucht. Vorliegende Ergebnisse deuten zwar darauf hin, dass Nutzpflanzen situationsabhängig beträchtliche Mengen Stickstoff aus dem Unterboden aufnehmen können (KUHLMANN et al. 1989; HABERLE et al. 2006; THORUP-KRISTENSEN 2006), doch fußen diese auf N_{\min} -Bilanzen des Unterbodens ohne Differenzierung zwischen Kompartimenten. Mit einem neuen *tracer*-gestützten Ansatz sollten Einblicke in nährstoffbezogene Prozesse der Drilosphäre gewonnen werden. Dazu wurde ^{15}N -markierter Luzerne-Mulch auf den Boden ausgebracht und der resultierende Nährstoffeintrag in unterschiedliche Bodenkompimente erfasst. Zudem wurde die mögliche Wiederaufnahme von Nährstoffen durch Sommerweizen und Malve untersucht. Ziel war, den Beitrag des Unterbodens und der Drilosphäre an der Stickstoffaufnahme von Nachfrüchten mit unterschiedlichen Wurzelsystemen exemplarisch abzuschätzen.

Die Bedingungen für die Bioporenengese sowohl durch Pflanzenwurzeln als auch durch Regenwürmer erschienen demnach in den Varianten mit allorhizen Vorfrüchten am günstigsten. Daher wurde in diesen Varianten eine insgesamt stärkere Beeinflussung des Bodengefüges erwartet als in Varianten mit dem homorhizen Rohrschwengel. In ähnlicher Weise wurde angenommen, dass die Vorfruchteffekte nach mehrjährig angebaute Vorfrucht stärker waren als nach einjähriger. Im Rahmen der für die vorliegende Arbeit durchgeführten Versuche wurde überprüft, welchen unterschiedlichen Einfluss die Vorfruchteffekte auf verschiedene Nachfrüchte hatten. Zudem wurde untersucht, ob bodenhydrologisch wirksame Vorfruchteffekte vorlagen. Der Einfluss von Makroporen auf die Wasserführung von Böden wurde mehrfach belegt (Kap. 1). Auf Grundlage der bisherigen Erkenntnisse wurde vermutet, dass für die Bioporenengese potentiell förderliche Vorfruchtvarianten zu einer Steigerung der Infiltration in den Unterboden führen würden.

Die Vorfruchtvarianten unterschieden sich zudem hinsichtlich mehrerer nährstoffbezogener Effekte. Der markanteste nährstoffbezogene Unterschied zwischen den Vorfrüchten wurde aufgrund der biologischen Stickstofffixierung der Luzerne erwartet. Luzerne kann durch symbiotische Stickstofffixierung folgenden Kulturen Stickstoff bereitstellen (DEAR et al. 1999). Dieser Vorfruchteffekt sollte im Rahmen eines separaten Stickstoffsteigerungsversuchs pflanzenbaulich quantifiziert werden. Der Einfluss des Stickstoffeffekts der Luzerne sollte im Hauptversuch durch Ausgleichsdüngungen zu den ersten und zweiten Nachfrüchten vermindert werden. Unter Berücksichtigung der vorhandenen N_{\min} -Menge in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Vorfruchtvarianten wurde auf einen einheitlichen Zielwert aufgedüngt. Weitere nährstoffbezogene Unterschiede zwischen den Effekten der drei Vorfrüchte waren aufgrund der kontrastierenden Wurzelphysiologie und -morphologie zu erwarten. Luzerne und Wegwarte weisen ein hohes Aneignungsvermögen für Nährstoffe aus

dem Unterboden auf, das dem vieler Grasarten überlegen ist (BLUMENTHAL & RUSSELLE 1996; WITTER & JOHANSSON 2001). Es wurde daher vermutet, dass durch die Mulchapplikation bei Luzerne und Wegwarte höhere Mengen von unterbodenbürtigen Nährstoffen im Oberboden angereichert wurden als bei Rohrschwengel. Analog zur Bioporengese wurde eine Verstärkung der nährstoffbezogenen Vorfruchteffekte mit zunehmender Anbaudauer der Vorfrucht erwartet.

Die Wirkung der Gesamtheit der Vorfruchteffekte auf Wachstum und Ertragsbildung wurde in einer dreijährigen Nachfruchtphase untersucht. Dazu wurde in jedem Jahr je ein Getreide mit homorhizem Wurzelsystem und eine Kulturpflanzenart mit allorhizem Wurzelsystem angebaut, um die Reaktionen auf Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht in Abhängigkeit von der Wurzelmorphologie der Nachfrüchte zu vergleichen. Grundsätzlich ist bekannt, dass Bioporen als Ausbreitungsweg für Wurzeln und als Ort der Nährstoffaufnahme dienen können (McMAHON & CHRISTY 2000). Für homorhize Pflanzen wie Getreide wurde jedoch festgestellt, dass unter nicht-wasserlimitierten Bedingungen ein Bodengefüge mit zahlreichen klein- und mittellumigen Poren hinsichtlich Sprossentwicklung bzw. Ertrag günstiger war als ein Bodengefüge mit wenigen, großlumigen Bioporen (STIRZAKER et al. 1996; NUTTALL et al. 2008). Aus diesem Grund wurde angenommen, dass für Getreide großlumige Bioporen hauptsächlich als Ausbreitungsweg dienen, mit deren Hilfe zusätzliche Wasserreserven erschlossen werden können (JAKOBSEN & DEXTER 1988), während allorhize Pflanzen evtl. auch nährstoffbezogen günstige Eigenschaften von Bioporen nutzen können. Übereinstimmend damit wurde in einem Versuch mit homorhizen und allorhizen Kulturen festgestellt, dass bei ausreichender Wasserverfügbarkeit Raps stärker auf eine höhere Bioporendichte reagierte als Getreide (McCALLUM et al. 2004). Daher wurde erwartet, dass die allorhizen Nachfrüchte auch im *CeFIT* deutlicher durch nährstoff- und bioporenassoziierte Vorfruchteffekte beeinflusst würden als die homorhizen Nachfrüchte.

Ziel der dieser Arbeit zugrunde liegenden Untersuchungen war es, folgende Hypothesen zu überprüfen:

Hypothese 1: Hinsichtlich Nährstoffakkumulation im Oberboden und Bioporengese sind Luzerne und Wegwarte (allorhiz) günstigere Vorfrüchte als Rohrschwengel (homorhiz), so dass die Nachfrüchte eine höhere Sprossmasse, einen intensiveren Gaswechsel und einen höheren Ertrag bilden bzw. aufweisen.

Hypothese 2: Nach der legumen Luzerne verbleibt im Boden eine höhere Menge an Residualstickstoff als nach Wegwarte und Rohrschwengel, so dass die Nachfrüchte eine höhere Sprossmasse, einen intensiveren Gaswechsel und einen höheren Ertrag bilden bzw. aufweisen.

Hypothese 3: Mit zunehmender Anbaudauer der Vorfrucht (ein-, zwei- und dreijährig) verstärken sich deren Effekte auf die Nachfrüchte.

- Hypothese 4:** Allorhize Nachfrüchte (Malve und Raps) werden stärker von nährstoff- und gefügevermittelten Vorfruchteffekten beeinflusst als homorhize Nachfrüchte (Getreide).
- Hypothese 5:** Gestaffelte Stickstoffdüngung zur Nachfrucht Sommerweizen gibt Hinweise auf eine höhere Residualstickstoffmenge im Boden nach Luzerne verglichen mit Wegwarte sowie nach dreijährigem verglichen mit einjährigem Anbau der Vorfrüchte.
- Hypothese 6:** Auf die Bodenoberfläche aufgebracht ^{15}N -markierter Luzerne-Mulch wird von Destruenten in den Boden eingezogen und/oder gefressen. Direkt oder indirekt nach Verstoffwechslung wird so ein Teil der im Mulch enthaltenen Nährstoffe in die Drilosphäre des Unterbodens eingetragen.
- Hypothese 7:** Der ^{15}N -*tracer*-Eintrag in die Drilosphäre kann tiefenstufendifferenziert nachgewiesen werden.
- Hypothese 8:** Der in die Drilosphäre eingetragene *tracer* ^{15}N ermöglicht es, den Beitrag der Drilosphäre des Unterbodens sowie des gesamten Unterbodens an der Stickstoffaufnahme der Nachfrüchte Sommerweizen und Futtermalve abzuschätzen.
- Hypothese 9:** Analog zur Bioporendichte ist die Infiltrationsrate des Unterbodens nach den allorhizen Vorfrüchten Luzerne und Wegwarte höher als nach dem homorhizen Rohrschwengel, ebenso nach mehrjährigem verglichen mit einjährigem Vorfruchtanbau.

3 Material und Methoden

3.1 Standort und Witterung

Die Überprüfung der Hypothesen wurde in einem mehrfaktoriellen Feldversuch auf dem Campus Klein-Altendorf vorgenommen. Dieser befindet sich zwischen den Städten Meckenheim und Rheinbach in der Niederrheinischen Bucht auf der Hauptterrasse des Rheins. Der für den Versuch genutzte Schlag *Niederhoicht* wurde langjährig konventionell bewirtschaftet. Vor Anlage des Versuchs wuchsen folgende Kulturen auf dem Schlag:

1998 Sommergerste
 1999 Winterweizen
 2000 Zuckerrüben
 2001 Winterweizen
 2002 - keine Daten verfügbar -
 2003 Winterroggen
 2004 Zuckerrüben
 2005 Winterweizen
 2006 Wintergerste

Das Leitprofil des Versuchsstandorts wird als Normparabraunerde auf Löss angesprochen. Als Bodenarten herrschen sind toniger Schluff (Ut3, Ut4) und schluffiger Ton (Tu4) vor (BAREJ et al. 2014). Der fruchtbare Standort erreicht eine Ackerzahl von 93 Punkten.

Anhand von Profildaten des für die vorliegende Arbeit genutzten Standortes ergeben sich die dargestellten Mengen von organisch gebundenem Kohlenstoff, Gesamt-Stickstoff sowie verschiedener Fraktionen der Nährstoffe Phosphor und Kalium (Tab. 1).

Tab. 1: Mengen von organisch gebundenem Kohlenstoff (C_{org}), Gesamt-Stickstoff (N_{ges}) (verändert nach KAUTZ et al. 2014a), Gesamt-Phosphor (P_{ges}), pflanzenverfügbarem/mit Calcium-Acetat-Laktat extrahierbarem Phosphor (P_{CAL}) (BAREJ et al. 2014), Gesamt-Kalium (K_{ges}), pflanzenverfügbarem/mit Ammonium-Acetat extrahierbarem (K_{AA}) und „nicht-austauschbarem“ (K_{n-a}) Kalium in Illit-Zwischenschichten (verändert nach VETTERLEIN et al. 2013) im *CeFiT* in Abhängigkeit von der Bodentiefe.

Tiefe [cm]	Kohlenstoff-, Stickstoff-, Phosphor- und Kaliummengen [kg C/N/P/K ha ⁻¹]						
	C_{org}	N_{ges}	P_{ges}	P_{CAL}	K_{ges}	K_{AA}	K_{n-a}
0-30	36.351	3.756	2.666	485	63.118	714	11.424
30-105	42.099	5.103	5.663	226	204.507	938	43.053

Mit Ausnahme des pflanzenverfügbaren Phosphors waren im Oberboden (0 – 30 cm Tiefe) stets geringere Nährstoffmengen vorhanden als in den sich darunter befindlichen 75 cm des Unterbodens (30 – 105 cm Tiefe). Dieser Sachverhalt belegt in Übereinstimmung mit der Literatur die hohe Bedeutung des Unterbodens als Nährstoffreservoir (KAUTZ et al. 2013b).

Der Versuchsstandort befindet sich im Regenschatten der Eifel, in dem atlantisch geprägtes Klima herrscht. Im langjährigen Mittel beträgt die Durchschnittstemperatur 9,4 °C. Die

mittlere Jahresniederschlagssumme beträgt 603,4 mm. Tab. 2 zeigt die monatlichen Durchschnittstemperaturen und Niederschlagssummen der Versuchsjahre 2010 bis 2012.

Tab. 2: Witterung in den Versuchsjahren 2010 bis 2012 und im langjährigen Mittel 1956 bis 2010. Daten der Versuchsstation Campus Klein-Altendorf.

Monat	Temperatur [°C]				Niederschlag [mm]			
	2010	2011	2012	Ø 1956-2010	2010	2011	2012	Ø 1956-2010
Jan	-1,6	2,7	4,0	1,8	22,8	35,9	86,0	34,4
Feb	1,4	3,8	-0,6	2,3	20,6	18,4	19,2	34,7
Mrz	5,6	6,5	8,1	5,4	40,5	7,9	10,5	42,6
Apr	9,4	12,6	8,7	8,5	7,9	22,0	33,9	44,4
Mai	10,7	14,5	14,5	12,8	55,6	30,1	49,2	58,4
Jun	16,7	16,5	15,3	15,7	37,4	123,3	58,5	65,7
Jul	20,3	16,0	17,2	17,4	65,1	31,5	89,3	65,8
Aug	17,0	17,8	19,0	17,0	157,9	89,6	46,8	67,2
Sep	13,0	16,2	13,6	13,8	53,7	25,8	18,0	53,6
Okt	9,2	10,7	9,9	10,0	35,6	41,8	99,9	45,5
Nov	6,0	6,7	6,3	5,5	59,3	1,5	22,1	48,7
Dez	-1,9	5,5	3,8	2,4	51,1	116,8	68,7	42,4
Ø	8,8	10,8	10,0	9,4				
Σ					607,5	544,6	602,1	603,4

Die Durchschnittstemperatur im ersten Versuchsjahr (2010) war 0,6 °C geringer als im Mittel der Jahre 1956 – 2010. Insbesondere in den Monaten Januar, Mai und Dezember waren die Temperaturen niedriger als im langjährigen Mittel, während im Juli eine überdurchschnittlich hohe Temperatur gemessen wurde. Im ersten Halbjahr 2010 fielen ca. 95 mm weniger Niederschlag als im Durchschnitt der Jahre 1956 – 2010, insbesondere die Monate April und Juni waren vergleichsweise niederschlagsarm. Im August 2010 auftretende Starkniederschläge kompensierten bilanziell die vorherige Frühsommertrockenheit, so dass die Jahressumme der Niederschläge etwas höher war als im langjährigen Mittel.

Im Versuchsjahr 2011 herrschten in sieben Monaten Temperaturen, die das langjährige Mittel um mindestens 1 °C übertrafen. Der April wies mit einer Differenz von über 4 °C die höchste Abweichung eines Monats in diesem Jahr vom langjährigen Mittel auf. Nur im Juli wurden Temperaturen gemessen, die geringer waren als der Durchschnittswert, so dass das Jahr insgesamt 1,4 °C höhere Temperaturen als das langjährige Mittel aufwies. In den Monaten Februar bis Mai fielen ca. 100 mm weniger Niederschlag als im Mittel der Jahre 1956 – 2010, die Monate Juni bis Dezember zeichneten sich durch den Wechsel von über- und unterdurchschnittlichen Niederschlägen aus. Die Niederschlagssumme im Jahr war ca. 60 mm geringer als im langjährigen Mittel.

Das dritte Versuchsjahr (2012) zeichnete sich mit Ausnahme des Februars durch ein vergleichsweise warmes Frühjahr aus. Dieser Sachverhalt bedingte mit den ebenfalls überdurchschnittlichen Temperaturen in den Monaten August und Dezember eine

Jahresdurchschnittstemperatur, die 0,6 °C höher war als im langjährigen Mittel. Von Februar bis Juni fielen insgesamt 75 mm weniger Niederschlag als im Mittel der Jahre, außerdem waren die Monate August, September und November relativ niederschlagsarm. Bilanziell wurden diese Trockenphasen durch erhöhte Niederschläge im Januar, Juli, Oktober und Dezember ausgeglichen, so dass die Niederschlagssumme im Jahr dem langjährigen Mittel in etwa entsprach.

3.2 Versuchsdesign

Der Feldversuch (*Central Field Trial*, im Folgenden *CeFIT*) bestand aus zwei zeitlich versetzten Teilversuchen mit identischem Design. Die Wiederholung der Versuchsanlage erlaubte es, Fragestellungen unter verschiedenen Witterungen/Umwelten zu bearbeiten. Der Vergleich des Umwelteinflusses auf die Versuchsergebnisse ist nicht Teil der vorliegenden Arbeit. Der erste Teilversuch (im Folgenden Versuch A) wurde im Jahr 2007 angelegt, der zweite Teilversuch (im Folgenden Versuch B) im Jahr 2009. Die Teilversuche setzten sich jeweils aus einer Vorfruchtphase und einer Nachfruchtphase zusammen. In der Vorfruchtphase wurden die Futterpflanzen Luzerne (Lu; *Medicago sativa* L.; allorhiz), Wegwarte (Ww; *Cichorium intybus* L.; allorhiz) und Rohrschwengel (Rs; *Festuca arundinacea* SCHREB.; homorhiz) für jeweils ein, zwei und drei Jahre angebaut. In der vorliegenden Arbeit werden die Varianten mit zwei Buchstaben für die Vorfruchtart und einer Zahl für deren Anbaudauer abgekürzt (Beispiel: „Ww 2“ steht für „zweijährig kultivierte Wegwarte“). Im jeweils ersten Jahr der Teilversuche wurden die dreijährig kultivierten Futterbestände angesät, und vor den ein- und zweijährig kultivierten Futterbeständen wurde Sommerroggen angebaut. Im zweiten Versuchsjahr wurden die zweijährig kultivierten Futterbestände gesät, und vor den einjährig angebauten Futterbeständen wurde Hafer angebaut. Im dritten Jahr der Vorfruchtphase wurden die dreijährig kultivierten Futterbestände gesät, so dass alle Vorfruchtbestände etabliert waren.

1. Versuchsfaktor: Vorfruchtart

Drei Faktorstufen: a) Luzerne
b) Wegwarte
c) Rohrschwengel

2. Versuchsfaktor: Anbaudauer der Vorfrucht

Drei Faktorstufen: a) Einjährig
b) Zweijährig
c) Dreijährig

Im Frühjahr des vierten Jahres wurden die Vorfruchtbestände umgebrochen, und mit Ansaat der ersten Nachfrüchte begann als zweiter Abschnitt des Versuchs die Nachfruchtphase. Die Nachfruchtphase wurde so gestaltet, dass in jedem Jahr eine homorhize (Getreide) und eine allorhize (Futtermalve bzw. Raps) Kultur miteinander hinsichtlich ihrer Reaktion auf die Vorfrucht und Anbaudauer verglichen werden konnten. Da die Getreide jährlich einen

Anbauumfang von zwei Dritteln aller Parzellen erhielten, stand innerhalb der dreijährigen Nachfrucht-Früchtesfolgen auf jeder Parzelle nur einmal eine allorhize Frucht.

3. Versuchsfaktor: Nachfrucht-Früchtesfolge

	2010/2012 (Versuch A/B)	2011/2013 (Versuch A/B)	2012/2014 (Versuch A/B)
Drei Faktorstufen: a)	Futtermalve, (<i>Malva sylvestris</i> L.)	Wintergerste, (<i>Hordeum vulgare</i> L.)	Winterroggen (<i>Secale cereale</i> L.)
b)	Sommerweizen, (<i>Triticum aestivum</i> L.)	Winterraps, (<i>Brassica napus</i> L.)	Winterroggen (<i>Secale cereale</i> L.)
c)	Sommerweizen, (<i>Triticum aestivum</i> L.)	Wintergerste, (<i>Hordeum vulgare</i> L.)	Winterraps (<i>Brassica napus</i> L.)

Somit ergaben sich 27 Varianten und eine Gesamtlauzeit von sechs Jahren je Versuch (Variantenübersicht: Anhang-Tab. 1, S. 145). Parzellen mit einer Größe von 6 m · 10 m bildeten die Varianten im Versuchsdesign einer dreifaktoriellen Streifenanlage ab. Die vier Feldwiederholungen wurden zu je einem Block zusammengefasst (Versuchsplan: Anhang-Abb. 1, S. 144).

Die Parzellen wurden in vier Streifen zu je 1,5 m Breite und 10 m Länge angelegt. Die beiden äußeren Streifen wurden für Zeiternten genutzt, während die beiden inneren möglichst ungestört blieben, um als Kernparzelle für den Mähdrusch zu dienen. Die östliche Hälfte der Parzellen war für die hier behandelten Sprossuntersuchungen reserviert, die westliche Hälfte wurde für Wurzelanalytik herangezogen.

Die Untersuchungen zu Wachstum und Ertragsbildung der Nachfrüchte erfolgten im Versuch A. Im Unterschied dazu wurden die Versuche zur Infiltrationsfähigkeit des Unterbodens (*Hood*-Infiltrometrie) sowie zu Deposition und Wiederaufnahme von Stickstoff (¹⁵N-tracer-Versuch) im Versuch B durchgeführt.

3.3 Versuchsdurchführung

Vorfruchtphase

In der Vorfruchtphase von Versuch A (2007 – 2009) wurden die Futterpflanzen Luzerne, Wegwarte und Rohrschwengel sowie Sommerroggen (2007) und Hafer (2008) hauptfruchtmäßig angebaut. Zu jeder Kultur wurde zunächst eine wendende Bodenbearbeitung mit dem Pflug und anschließend die Saatbettbereitung mit der Kreiselegge vorgenommen. Eine Düngung erfolgte nur zu den einjährig kultivierten Beständen von Wegwarte und Rohrschwengel im Jahr 2009. Die Getreide und die übrigen Vorfrüchte blieben ungedüngt (Bestandesführung der Vorfrüchte: S. 149 f.). Im Bedarfsfall wurde Unkraut manuell entfernt. Nach Getreide wurde Phacelia als Zwischenfrucht angesät, der Pflugeinsatz erfolgte erst im Frühjahr. Während der Kultur der Futterpflanzen wurden die Bestände zur jeweiligen Nutzungsreife, drei- bis viermal jährlich, gemulcht. Zum Ende der

Vorfruchtphase wurde die Versuchsfläche im Frühjahr zweimal gegrubbert und anschließend gepflügt.

Nachfruchtphase

Die Kulturen der Nachfruchtphase Sommerweizen und Futtermalve (Versuch A: 2010), Wintergerste und Winterraps (Versuch A: 2011) sowie Winterroggen und Winterraps (Versuch A: 2012) wurden konventionell geführt. Es erfolgte somit Pflugeinsatz zu jeder Hauptfrucht, und zu den Kulturen der Jahre 2010 und 2011 wurde in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante und der davon beeinflussten Menge an Residualstickstoff im Boden eine Ausgleichsdüngung mit mineralischem Stickstoff (Kalkammonsalpeter, KAS) auf einen einheitlichen Zielwert vorgenommen. Der Pflanzenschutz erfolgte chemisch, nur im Jahr 2010 wurde manuell das Unkraut reguliert (Bestandesführung der Nachfrüchte: S. 151 ff.).

3.4 Probenahme und Messungen

3.4.1 Zeiternten

Zur Erfassung der Biomasseentwicklung und der Ertragsbildung wurden sowohl in den Futterpflanzenbeständen der Vorfruchtphase als auch in den folgenden Kulturen der Nachfruchtphase Zeiternten durchgeführt. Die Zeiternten in den Vorfruchtbeständen wurden unmittelbar vor den Mulchschnitten vorgenommen. Deren Termine sind im Anhang aufgeführt (S. 149 f.); ebenfalls im Anhang befindet sich eine Terminübersicht zu den Zeiternten in den Nachfruchtbeständen mit Angabe der BBCH-Stadien und der beprobten Varianten in Bezug auf die jeweiligen Parameter (Anhang-Tab. 2, S. 154).

Je Termin und Parzelle wurden die Pflanzen von zwei separaten Flächen mit einer Größe von je 0,25 m² mithilfe von akkubetriebenen Rasenkantenschere bodennah abgeschnitten. Die Proben wurden parzellenweise vereinigt und als Mischprobe analysiert. Zunächst wurde die Gesamt-Frischmasse ermittelt. Ein Aliquot jeder Probe wurde gehäckselt und zunächst für 24 Stunden bei 60 °C, dann für weitere 24 Stunden bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Anschließend wurde durch Rückwaage der Trockenmassegehalt bestimmt und flächenbezogen die Sprosstrockenmasse berechnet.

Darüber hinaus wurde im Falle der Nachfrüchte die Sprosslänge von zehn zufällig ausgewählten Pflanzen bzw. Haupttrieben je Parzelle gemessen. Nach Wägung der Sprossmasse von drei Pflanzen (Raps und Malve) bzw. zehn Haupttrieben (Getreide) wurden deren grüne Blattspreiten vom Spross separiert. Die Blattspreitenfläche wurde mithilfe eines Planimeters (Li 3100; LI-COR, USA) erfasst, woraus unter Berücksichtigung der zugehörigen Sprossbiomasse sowie der flächenbezogenen Gesamt-Sprossbiomasse der Blattflächenindex (BFI) berechnet wurde.

In den Parzellen mit Futtermalve wurde zwei Tage nach der dritten Zeiternte zusätzlich ein Schnitt des Sprossaufwuchses von einer Grundfläche von 3 m² je Parzelle durchgeführt, mit dessen Hilfe genaue Daten der Sprossmasse erhoben wurden.

An den Terminen der Zeiternten in der zweiten Nachfrucht Wintergerste (2011) und in der dritten Nachfrucht Winterraps (2012) wurde der mit dem Chlorophyllgehalt eng korrelierte *SPAD-Value* (LOPEZ-BELLIDO et al. 2004) mit einem Handmessgerät (SPAD-502; Minolta, Japan) nicht-destruktiv an zehn gesunden, jungen Blättern je Parzelle gemessen.

3.4.2 Ertragsstruktur

Zum Zeitpunkt der Erntereife der Getreide und des Rapses wurden die Kernparzellen (je ca. 10 m²) zur Ermittlung des Kornertrages und der Tausendkornmasse mit einem Parzellenmähdrescher beerntet. Weitere Ertragsstruktur-Parameter der Getreide wurden durch Zählungen im Feld bzw. Meterschnitte (zweimal 1 lfd. m Drillreihe/Parzelle) erfasst. Zudem wurden der *Harvest-Index*, der Strohertrag, die Anzahl Ähren/m² sowie die Nährstoffgehalte in Korn und Stroh ermittelt. Mithilfe der Parameter Kornertrag, Anzahl Ähren/m² (Getreide) und Tausendkornmasse wurde die Anzahl Körner/Ähre (Getreide) bzw. die Anzahl Körner/m² (Raps) bestimmt.

3.4.3 Gaswechsel

Die Raten von Photosynthese und Transpiration wurden im Feld nicht-destruktiv mithilfe eines Porometers (CIRAS 2; PP Systems, USA) gemessen. Dazu wurde jeweils ein Blatt in die Küvette des Geräts licht- und gasdicht eingespannt und bei einer Photonenflussdichte von 1.500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ beleuchtet. Dem Blatt wurde ein luftähnliches Gasgemisch mit einer CO₂-Konzentration von 400 ppm bei einem Volumenstrom von 200 mL min⁻¹ zugeführt. Das Porometer erfasste die Konzentration von Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf im Gasgemisch vor und nach dem Kontakt mit dem eingespannten Blatt und berechnete daraus die Raten der Photosynthese (Kohlenstoffdioxid-Aufnahme in $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ Blattfläche s}^{-1}$) und der Transpiration (Wasserdampf-Abgabe in $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ Blattfläche s}^{-1}$). Nach dem Einspannen eines Blattes stiegen die Gaswechselraten an. Dieser Sachverhalt deutet auf eine Anpassung der Photosysteme an eine intensivere photosynthetisch nutzbare Strahlung (*photosynthetically active radiation*, im Folgenden PAR) infolge der künstlichen Beleuchtung hin. Nach etwa einer bis drei Minuten wurden konstante Raten gemessen. Für jedes untersuchte Blatt wurde der Konstantwert beider Gaswechselfparameter gespeichert.

Im Jahr 2010 wurden Gaswechselraten von Sommerweizen und Futtermalve als erste Nachfrüchte zu jeweils sechs Terminen in Abhängigkeit von verschiedenen Vorfruchtvarianten erfasst. Zu jedem Termin erfolgten die Gaswechselfmessungen an je einem vitalen, jungen, aber voll entfalteteten Blatt von fünf zufällig ausgewählten Pflanzen je Parzelle. In der Vegetationsperiode des Jahres 2011 fanden Messungen an den zweiten Nachfrüchten Gerste und Raps statt. Dazu wurden bei beiden Kulturen jeweils vier vollständige Messreihen durchgeführt. Der Stichprobenumfang wurde jedoch auf zehn Blätter je Parzelle erhöht. Im dritten Nachfruchtjahr (2012) wurde der Gaswechsel von Winterraps an fünf Terminen gemessen. Die ausgewählten Vorfruchtvarianten sowie die Durchführung entsprachen dem Vorgehen im Jahr 2011.

In allen Untersuchungsreihen wurden die Messwerte parzellenweise gemittelt. Die BBCH-Stadien der Bestände zu den jeweiligen Messungen sowie die untersuchten Varianten werden im Anhang dargestellt (Anhang-Tab. 3, S. 155).

Schätzung der Bestandes-Blattgaswechselraten

Die erste Methode zur Schätzung des Bestandes-Blattgaswechsels bestand in Multiplikation der gemessenen Gaswechselraten je Blattfläche mit dem Blattflächenindex.

BFI:	Blattflächenindex
GWR _{1.500} :	Gaswechselrate der oberen Blattetage bei Beleuchtung mit einer Photonenflussdichte von 1.500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
BGWR:	Bestandes-Blattgaswechselrate

$$\text{BGWR} = \text{BFI} \cdot \text{GWR}_{1.500}$$

Ergebnisse dieser Berechnung waren die Bestandes-Blattphotosyntheserate (Kohlenstoffdioxid-Aufnahme des Bestandes in $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ Bodenfläche s}^{-1}$) und die Bestandes-Blatttranspirationsrate (Wasserdampf-Abgabe des Bestandes in $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ Bodenfläche s}^{-1}$).

Durch die genannte Berechnung wurden die Bestandes-Blattgaswechselraten der Kulturen Sommerweizen (2010), Futtermalve (2010), Wintergerste (2011) und Winterraps (2012) geschätzt.

Da die Messung der Gaswechselraten und des Blattflächenindex' zumeist in zeitlicher Nähe zueinander vorgenommen wurden, waren nur vereinzelt Interpolationen zwischen Messwerten erforderlich, um die photosynthetisch aktive Blattfläche zum Zeitpunkt der Gaswechselratenmessungen zu bestimmen.

Optimierte Schätzung der Bestandes-Blattgaswechselraten

Um die Schätzung zu verbessern, wurde im Jahr 2012 eine eigens im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Messmethode eingesetzt, die die unterschiedliche photosynthetische Leistung der verschiedenen Blattetagen im Bestand berücksichtigt. Auf Grundlage des *Sun-Shade*-Modells (PURY & FARQUHAR 1997) wurden zwei Blattetagen unterschieden. Junge, vitale Blätter mit vollem Lichtgenuss wurden der oberen Blattetage zugeordnet, die älteren, teils seneszenten, beschatteten Blättern dagegen der unteren Blattetage.

Messungen mit einem SunScan-Gerät (Delta-T Devices, Großbritannien) ergaben, dass auf Ebene der unteren, beschatteten Blätter durchschnittlich 20 % der PAR zur Verfügung standen, die die jungen, vollbelichteten Blätter erreichte. Die standardisierte Beleuchtung der oberen Blattetage mit einer Photonenflussdichte von 1.500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ wurde für die obere Blattetage beibehalten, so dass sich für die Messungen in der unteren Blattetage eine Photonenflussdichte von 300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ergab. Das Verhältnis der Gaswechselraten der oberen gegenüber der unteren Blattetage wurde in Parzellen des Winterrapses 2012 nach Ww 2 ermittelt.

Die blattflächenbezogenen Gaswechselraten der vollbelichteten, jungen Blätter unterschieden sich in keiner Messreihe in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante. Daher wurde angenommen, dass auch die blattflächenbezogenen Gaswechselraten der beschatteten, teils seneszenten Blätter sowie das Verhältnis zwischen den blattflächenbezogenen Gaswechselraten der oberen und der unteren Blatttage jeder Parzelle gleich waren. Mithilfe des mittleren Verhältnisses der Gaswechselrate der unteren gegenüber der oberen Blatttage der Rapspflanzen nach Ww 2 wurde die Gaswechselrate der unteren Blatttage der Bestände aller Parzellen geschätzt.

Zur Schätzung des Bestandes-Blattgaswechsels unter Berücksichtigung des *Sun-Shade*-Modells wurde vereinfachend die Annahme getroffen, dass die Blattfläche bis zu einem Blattflächenindex von 1 vollbelichtet war und somit die obere Etage bildete.

BFI_A : Blattflächenindex bis zu einem Wert von 1; obere Blatttage;
vollbelichtete Blattfläche, 100 % PAR

$BFI_A = BFI$ (falls $BFI \leq 1$; vollbelichtet)

$BFI_A = 1$ (falls $BFI > 1$; vollbelichtet)

Die eventuell vorhandene Blattfläche, die über einen BFI von 1 hinausging, war somit beschattet und wurde als untere Blatttage angesehen.

BFI_B : Blattflächenindex oberhalb des Wertes von 1; untere Blatttage;
beschattete Blattfläche, 20 % PAR

$BFI_B = BFI - BFI_A$ ($BFI_B > 0$ falls $BFI > 1$; beschattet)

Die durch Zeiternten ermittelte Blattfläche wurde mit den gemessenen Gaswechselraten entsprechend der genannten Annahme multipliziert. Die Blattfläche bis zu einem Blattflächenindex von 1 wurde somit mit der Gaswechselrate der oberen Blatttage multipliziert, die übrige Blattfläche mit der Gaswechselrate der unteren Etage.

$BGWR_A$: Bestandes-Gaswechselrate der oberen Blatttage
bei Beleuchtung mit einer Photonenflussdichte von $1.500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

$BGWR_B$: Bestandes-Gaswechselrate der unteren Blatttage
bei Beleuchtung mit einer Photonenflussdichte von $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

GWR_{300} : Gaswechselrate der unteren Blatttage
bei Beleuchtung mit einer Photonenflussdichte von $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

$BGWR_A = BFI_A \cdot GWR_{1.500}$

$BGWR_B = BFI_B \cdot GWR_{300}$

Die sich ergebenden Teilgrößen des Bestandes-Blattgaswechsels wurden anschließend addiert.

$BGWR = BGWR_A + BGWR_B$

3.4.4 Hood-Infiltrometrie

In den Jahren 2011 und 2012 wurde im Versuch B die Infiltrationsfähigkeit des Unterbodens in einer Tiefe von 45 cm in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht gemessen. In den zu untersuchenden Flächen wurden dazu Gruben vorbereitet. Unmittelbar vor der jeweiligen Messung wurde die Sohle auf 45 cm vertieft, und anschließend mit einem Spachtel geebnet sowie mit einem Staubsauger von losen Bodenpartikeln gesäubert. Mithilfe einer durchsichtigen Kunststoffolie wurden die offene Makroporen auf der Infiltrationsfläche exakt kartiert, wobei zwischen den Größenklassen 2 - 5 mm und > 5 mm Durchmesser unterschieden wurde. Anschließend wurde die Infiltrometerhaube, die eine Bodenfläche von 483 cm² überspannt, auf den Boden aufgesetzt; die Kontaktfläche von Boden und Haube wurde abgedichtet. Je Parzelle wurden drei interne Wiederholungen der Makroporenkartierung und Infiltrationsmessung in räumlicher und zeitlicher Nähe zueinander vorgenommen.

Das eingesetzte Hood-Infiltrometer (UGS, Deutschland) führt Wasser nach dem Prinzip der Mariotte'schen Flasche nach. Die sich permanent ändernde Stauhöhe des Wassers im Vorratsbehälter wird hydraulisch kompensiert, so dass bei konstantem hydraulischem Druck ein gleichbleibender Volumenstrom des Wassers gewährleistet wird. Mithilfe des Geräts können zusätzlich Unterdrücke (Tensionen) an die anstehende Wassersäule angelegt werden. Ein Unterdruck bewirkt analog zu einer an den Boden angelegten Saugspannung, dass Poren ab einem bestimmten Äquivalenzdurchmesser entwässert bzw. von der Infiltration ausgeschlossen werden. Als Faustformel gilt dabei: $d = 3000 / h$ (d: Äquivalenzdurchmesser [µm], h: Saugspannung [hPa] an der Bodenoberfläche; Näherungslösung der *Young-Laplace*-Gleichung zur Berechnung der kapillaren Steighöhe; HARTGE & HORN 2009). Mit einem Unterdruck von 0,6 hPa lassen sich somit Poren mit einem Äquivalenzdurchmesser von ≥ 5 mm von der Infiltration ausschließen, eine Tension von 1,5 hPa verhindert die Infiltration in Poren mit einem Äquivalenzdurchmesser von ≥ 2 mm.

Das Infiltrometer wurde bei einer Tension von 0 hPa in Betrieb genommen, so dass der Boden aufgesättigt wurde. Dieser Vorgang wurde fortgesetzt, bis eine konstante Infiltration zu beobachten war, so dass von einem Fließgleichgewicht ausgegangen werden konnte. In einer ersten Messreihe wurde bei einer Tension von 0 hPa die spannungsfreie Gesamt-Infiltration erfasst. Zwei folgende Messreihen mit einem Unterdruck von 0,6 hPa bzw. 1,5 hPa erfassten die Infiltration des Bodens unter Ausschluss der Poren mit einem Äquivalenzdurchmesser von ≥ 5 mm bzw. von ≥ 2 mm. Je Messreihe wurden zehn Werte der Wasserstandsänderung von 3 cm bzw. 2 cm im Vorratsgefäß über die Zeit erfasst, mit denen anschließend die Infiltrationsrate und die feldgesättigte Wasserleitfähigkeit berechnet wurden.

Die Differenz der mittleren Infiltrationsrate bei 0 hPa abzüglich derjenigen bei 0,6 hPa wurde zur Schätzung der Infiltration in Poren der Größenklasse > 5 mm Durchmesser gebildet. Analog wurde die Differenz der mittleren Infiltrationsrate bei 0,6 hPa abzüglich derjenigen

bei 1,5 hPa zur Ermittlung der Infiltration in Poren der Größenklasse 2 - 5 mm Durchmesser genutzt.

Nach Auszählung der Makroporenkartierungen wurde die Anzahl sichtbarer unverblockter Poren je Größenklasse mit der berechneten Infiltration in Poren der entsprechenden Größenklasse verglichen.

Im Jahr 2011 fanden die Messungen im Zeitraum 17.08. - 02.10. in den Varianten Lu 2, Ww 2, Ww 3 und Rs 1 statt. Im darauf folgenden Jahr wurden die Messungen im Zeitraum 16.04. - 22.06.2012 in den Varianten Lu 1 – 2, Ww 1 – 2 und Rs 1 – 2 durchgeführt.

3.4.5 Nährstoffgehalte von Pflanzenspross und Boden

Die getrockneten Pflanzenproben aus Zeiternten und Ertragserhebungen wurden in einer Scheibenschwingmühle (RS1; Retsch, Deutschland) bei 1.400 U min^{-1} auf eine Partikelgröße von $< 100 \mu\text{m}$ vermahlen. Eine Ausnahme bildeten die Rapskörner, die aufgrund ihres Ölgehaltes in flüssigem Stickstoff gekühlt in einer Kryomühle (Freezer Mill 6750; SPEX Certiprep, USA) vermahlen werden mussten.

Die Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte der Proben wurden nach vollständiger Verbrennung und anschließender Reduktion der Verbrennungsgase, u. a. zu CO_2 und N_2 , in einem Gaschromatographen (Elementaranalyser EA 3000; Eurovector, Italien) bestimmt (RÖMPP et al. 1997).

Für die Analyse der Phosphor- und Kaliumgehalte wurden die Proben mittels Mikrowellen (MARS-Xpress; CEM, USA) in 4,6 % HNO_3 aufgeschlossen (KOTZ et al. 1972). Der Phosphorgehalt wurde anschließend in einem Filterphotometer (Typ 6010; Skalar, Niederlande) bei 880 nm gemessen (VDLUFA 1991). Der Kaliumgehalt wurde in einem Atomabsorptionsspektrometer (AAnalyst 200; Perkin Elmer, USA) bestimmt (VDLUFA 1991).

Zur Erfassung der N_{min} -Menge im Boden wurde das in den Proben enthaltene Nitrat mit Cadmium zu Nitrit reduziert, welches anschließend nach GRIESS-ILSOVAY quantifiziert wurde. Das Ammonium wurde einer modifizierten Berthelot-Reaktion (Salicylat-Methode) unterzogen. Die beiden Fraktionen des mineralischen Bodenstickstoffs wurden in einem Photometer (Continuous-flow analyzer; Skalar, Niederlande) bei 540 nm bzw. 660 nm gemessen (VDLUFA 1991).

Die Nährstoffaufnahme der Kulturen wurde durch Multiplikation der Nährstoffgehalte in der Trockenmasse mit der Spross(teil)trockenmasse errechnet.

3.5 Düngungssteigerungsversuch

Zur ersten Nachfrucht Sommerweizen wurde ein Düngungssteigerungsversuch angelegt, um die Unterschiede zwischen den Vorfruchteffekten von Luzerne und Wegwarte hinsichtlich der Stickstoffwirkung zu untersuchen. Dazu wurden in allen vier Feldwiederholungen der Varianten 2, 8, 11 und 17 (Sommerweizen nach Lu 1, Lu 3, Ww 1 bzw. Ww 3; Variantenübersicht: Anhang-Tab. 1, S. 145) jeweils fünf Teilflächen mit einer Größe von je $1,5 \text{ m} \cdot 4,0 \text{ m}$ mit gestaffelter Stickstoffdüngung angelegt, deren Position innerhalb der

Parzelle randomisiert war. Am 28.04.2010 wurde Kalkammonsalpeter (27 % N) in den Stufen 0 kg N ha⁻¹, 40 kg N ha⁻¹, 80 kg N ha⁻¹, 120 kg N ha⁻¹ und 160 kg N ha⁻¹ ausgebracht.

Am 16. - 17.06. sowie am 15. - 16.07.2010 wurden in den Teilflächen des Düngungssteigerungsversuchs Zeiternten gemäß dem unter Kap. 3.4.1 beschriebenen Schema durchgeführt. Dabei wurden die Parameter Sprossstrockenmasse, Blattflächenindex, *SPAD-Value* und Nährstoffgehalte (Stickstoff, Phosphor und Kalium) erhoben.

Aufgrund der geringen Größe der Teilflächen wurde die Endernte nicht im Mähdruschverfahren, sondern in ähnlicher Weise wie die Zeiternten durchgeführt. Je Parzelle und Düngungsstufe wurden die Pflanzen von zwei Flächen zu je 0,5 m · 1,0 m bodennah abgeschnitten. Anhand dieser Proben wurden Kornertrag, Tausendkornmasse und Nährstoffgehalte (Stickstoff, Phosphor und Kalium) bestimmt.

Weitere Parameter der Ertragsstruktur wurden mit den im Hauptversuch angewendeten Standardverfahren durch Zählungen im Feld bzw. Meterschnitte (zweimal 0,5 lfd. m Drillreihe/(Parzelle · Düngungsstufe)) erfasst (Kap. 3.4.2).

3.6 ¹⁵N-tracer-Versuch: Stickstoff-Deposition und -Wiederaufnahme

Am 13.05.2011 wurden neun 0,25 m² große, quadratische Teilflächen in Lu 3-Beständen angelegt. Jeweils zwei Teilflächen wurden in den Parzellen 20, 34 und 66 (Variante 9) und jeweils eine in den Parzellen 22, 42 und 56 (Variante 7) im Versuch B (Variantenübersicht: Anhang-Tab. 1, S. 145; Versuchsplan: Anhang-Abb. 1, S. 144). Dazu wurde zunächst die Sprossmasse der Luzerne bodennah abgeschnitten. Der verbliebene Bestandesabfall wurde mithilfe eines Staubsaugers entfernt. Anschließend wurde getrocknete Sprossmasse von Luzerne ausgebracht, die durch Kultur in einem mit ¹⁵N angereichertem Substrat einen ¹⁵N-Anteil des Gesamt-Stickstoffs von durchschnittlich 14,50 atom% aufwies. Je Teilfläche wurden 180 g Trockenmasse (TM) appliziert, was zur versuchsüblichen Beaufschlagung im Rahmen eines Mulchschnittes trockenmasseäquivalent ist. Am 27.07. wurden weitere 86 g TM der ¹⁵N-markierten, getrockneten Luzernesprossmasse je Teilfläche ausgebracht. Das ausgebrachte Pflanzenmaterial wurde mit Käfigen geschützt, um einen Austrag des isotopisch markierten Mulches zu verhindern. Die Seitenflächen der Käfige waren 10 cm hoch und bestanden aus Verbundplatten, während die Oberseite mit einem Kunststoffgeflecht mit einer Maschenweite von 5 mm bespannt war und somit Witterungseinflüsse ermöglichte.

Nach Versuchsbeginn kam es in den Käfigen sowohl zum Wiederaustreiben von Luzerne als auch zum Aufwuchs von Ackerbegleitflora. Diese unerwünschte Sprossmasse wurde wiederholt bodennah entfernt und zur Vermeidung von ¹⁵N-Austrag auf die markierte Luzernestreue bzw. den Boden aufgelegt.

Im Zeitraum 24.10. - 09.11.2011 wurden in je einer der beiden markierten Teilflächen der Parzellen 20, 34 und 66 Bodenproben genommen. In einem Kernbereich (40 cm · 40 cm) der Teilflächen wurden Proben aus dem *bulk*-Boden und aus der Drilosphäre entnommen. Dazu

wurde eine Standgrube neben den Teilflächen angelegt, um von der Seite die Tiefenstufen 0 - 45 cm, 45 – 75 cm und 75 – 105 cm des Teilflächen-Kernbereichs zu erreichen. Bioporen wurden mit Spachteln und Spateln freigelegt und in Längsrichtung angeschnitten. Mithilfe von Löffelspateln wurde die Porenwandung so dünn wie möglich abgekratzt und das Drilosphärenmaterial gesammelt. Ergänzend erfolgte die Probenahme an mehreren Stellen im *bulk*-Boden, mehrere Zentimeter von Bioporen entfernt.

Am 20.03.2012 wurde in den verbliebenen sechs Unterteilstücken der Oberboden bis 45 cm Tiefe entfernt. Um Randeffekte auszuschließen, wurde um jede Teilfläche zusätzlich ein Rand von mindestens 20 cm Breite ebenfalls auf eine Tiefe von 45 cm abgegraben. Das entfernte Bodenmaterial wurde durch Oberboden aus Lu 3-Beständen vom gleichen Standort ersetzt, die nicht mit ¹⁵N-markiertem Luzernemulch beaufschlagt worden waren. Am 30.03. erfolgte die parzellenübliche Grundbodenbearbeitung, anschließend die Bestellung mit Nachfrüchten. Im Jahr 2012 wurde auf den Teilflächen der Parzellen 20, 34 und 66 somit Weizen angebaut, auf denen der Parzellen 22, 42 und 56 dagegen Futtermalve.

Am 18.07.2012 wurde eine Biomassenernte auf den mit Malve bewachsenen Teilflächen (Parzellen 22, 42 und 56) jeweils in einem Kernbereich von 40 cm · 40 cm durchgeführt. Die Sprossmasse wurde bodennah abgeschnitten. Analog zu den Zeiternten wurden Frisch- und Trockenmasse bestimmt.

Am 06.08.2012 erfolgte in ähnlicher Weise die Beerntung der Teilflächen in den Weizen-Teilflächen (Parzellen 20, 34 und 66). Im Unterschied zum Verfahren bei Malve wurden Korn und Rest-Spross nach der Erfassung der Gesamt-Frischmasse getrennt analysiert.

Im Zeitraum 13. - 17.08.2012 wurden Proben von Bioporen und *bulk*-Boden der verbliebenen sechs Teilflächen in ähnlicher Weise wie bei der Beprobung im Herbst 2011 entnommen. Aufgrund des Austauschs des Oberbodens wurden dabei nur die Tiefenstufen 45 – 75 cm und 75 – 105 cm des Teilflächen-Kernbereichs untersucht. Kontrollproben von Pflanzenspross und Boden wurden jeweils aus den gleichen Parzellen, aber außerhalb der markierten Teilflächen entnommen.

Nach Trocknung und Vermahlung der Proben wurde deren ¹⁵N-Anteil des Gesamt-Stickstoffs mit einem Massenspektrometer (ANCA SL/2020; PDZ Europa/Sercon Ltd, Großbritannien) gemessen. Die absolut in den Spross aufgenommenen Mengen von ¹⁴N und ¹⁵N wurden durch Multiplikation der Gehalte mit der Sprosstrockenmasse berechnet. Da sich der *tracer*-Eintrag nicht nur auf die Drilosphäre beschränkte, sondern auch den *bulk*-Boden umfasste (Kap. 4.4.1), konnte der erhöhte ¹⁵N-Anteil des Gesamt-Sprosstickstoffs der Nachfrüchte nicht auf Stickstoffaufnahme aus einem bestimmten Bodenkompartment zurückgeführt werden. Da jedoch der *tracer*-Anteil des Gesamt-Stickstoffs im Boden unterhalb von 45 cm eingegrenzt werden konnte, konnte der mögliche Bereich des unterbodenbürtigen Anteils an der Gesamt-Stickstoffaufnahme in den Pflanzenspross angegeben werden:

Bezeichnungen / Definition der Variablen:

$b_{1,14}$: Absolute Menge ^{14}N in Bodenschicht 1 (0 – 45 cm)

$b_{1,15}$: Absolute Menge ^{15}N in Bodenschicht 1 (0 – 45 cm)

$b_{2,14}$: Absolute Menge ^{14}N in Bodenschicht 2 (45 – 105 cm)

$b_{2,15}$: Absolute Menge ^{15}N in Bodenschicht 2 (45 – 105 cm)

$p_{1,14}$: Absolute Menge ^{14}N im Pflanzenspross, das aus Bodenschicht 1 stammt

$p_{1,15}$: Absolute Menge ^{15}N im Pflanzenspross, das aus Bodenschicht 1 stammt

$p_{2,14}$: Absolute Menge ^{14}N im Pflanzenspross, das aus Bodenschicht 2 stammt

$p_{2,15}$: Absolute Menge ^{15}N im Pflanzenspross, das aus Bodenschicht 2 stammt

p_{14} : Absolute Menge ^{14}N in der Pflanze (bekannt)

p_{15} : Absolute Menge ^{15}N in der Pflanze (bekannt)

$\in \mathbb{R}$: Element der reellen Zahlen

Anteil von ^{15}N des in einer Bodenschicht vorkommenden Gesamt-Stickstoffs

k : Anteil von ^{15}N des in Bodenschicht 1 vorkommenden Gesamt-Stickstoffs, also:

$$(1) \quad \frac{b_{1,15}}{b_{1,14} + b_{1,15}} = k \text{ für ein bekanntes } k \in \mathbb{R}$$

Der Anteil von ^{15}N des Gesamt-Stickstoffs in Bodenschicht 1 ist bekannt, da im ausgetauschten Oberboden der standorttypische Anteil von ^{15}N des Gesamt-Stickstoffs vorhanden ist.

c : Anteil von ^{15}N des Gesamt-Stickstoffs in Bodenschicht 2, also:

$$(2) \quad \frac{b_{2,15}}{b_{2,14} + b_{2,15}} = c \text{ für ein } c \in \mathbb{R};$$

Der genaue Anteil von ^{15}N des Gesamt-Stickstoffs in Bodenschicht 2 ist unbekannt. Dieser Sachverhalt ist dadurch begründet, dass kein homogener Eintrag des *tracer*-markierten Mulchs und damit keine homogen erhöhten Gehalte von ^{15}N gegeben waren. Daher war eine repräsentative Probenahme im Feld nicht möglich.

Die möglichen Werte, die c annehmen kann, können aber eingegrenzt werden:

Im aus dem Unterboden aufgenommenen Stickstoff konnte maximal der gleiche ^{15}N -Anteil vorliegen wie im ausgebrachten Luzernemulch, da während der Umsetzung von organisch gebundenem zu pflanzenverfügbarem Stickstoff keine Aufkonzentration des schwereren Isotops eintritt (SHEARER & KOHL 1986). Der maximale ^{15}N -Anteil des unterbodenbürtigen Stickstoffs betrug demnach 14,50 atom%. Voraussetzung dafür wäre allerdings gewesen, dass in den Unterboden die Abbauprodukte des Luzernemulches unvermischt eingetragen worden wären, und dass die Nachfrüchte ausschließlich diese Stickstoffquelle aus dem Unterboden genutzt hätten.

Der minimale ^{15}N -Anteil des unterbodenbürtigen Stickstoffs entsprach dem ^{15}N -Anteil im jeweiligen Nachfruchtspross(teil). Diese untere Grenze wäre jedoch nur unter der Bedingung

möglich gewesen, dass die Pflanze keinen Stickstoff aus dem Oberboden aufgenommen hätte.

Für möglichen Werte, die c annehmen kann, kann somit ein Intervall angegeben werden. Beide Grenzwerte unterliegen Bedingungen, die sie sehr unwahrscheinlich machen. Mithilfe der genannten Überlegungen kann jedoch der mögliche Wertebereich des Anteils von ^{15}N des gesamten aus dem Unterboden aufgenommenen Stickstoffs \odot eingegrenzt werden. Die Mindest-Stickstoffaufnahme aus dem Unterboden ergibt sich, wenn für c der höchstmögliche Wert in die Gleichungen eingesetzt wird *et vice versa*.

Eine Näherung an die tatsächlichen Gegebenheiten ergibt sich, indem für c der höchste in Proben der Bodenschicht 2 gemessene Wert eingesetzt wird.

Diskriminierung von ^{15}N gegenüber ^{14}N

Im komplexen und heterogenen System Boden sind viele Prozessschritte notwendig, um beispielsweise organisch gebundenen Stickstoff pflanzenverfügbar zu machen. Dabei weisen viele biologische, chemische und physikalische Vorgänge eine Diskriminierung von ^{15}N gegenüber ^{14}N auf. Der jeweilige Isotopen-Fraktionierungsfaktor β wird definiert als Reaktionsrate der Moleküle mit leichtem Isotop (^{14}N) dividiert durch die Reaktionsrate der Moleküle mit schwerem Isotop (^{15}N), standardisiert durch die Konzentration beider Molekülarten (SHEARER & KOHL 1986):

$$\beta = \frac{\frac{d(^{14}\text{N})}{dt}}{(^{14}\text{N})} \div \frac{\frac{d(^{15}\text{N})}{dt}}{(^{15}\text{N})}$$

Der Isotopen-Fraktionierungsfaktor β ist von spezifischen Parametern abhängig und somit nicht konstant (SHEARER & KOHL 1986). Es wird jedoch angenommen, dass bezüglich der die Isotopen-Fraktionierung betreffenden Faktoren im Wesentlichen ähnliche Bedingungen zwischen den markierten Unterteilstücken und den Kontrollflächen im nicht-markierten Bereich der Parzellen herrschten. Die einzelnen Fraktionierungsfaktoren β für unterschiedliche Prozessschritte wurden im *CeFIT* nicht bestimmt. Allerdings ist der Anteil von ^{15}N des Gesamt-Stickstoffs in der Pflanze gegenüber dem Boden um den Faktor t verändert, was als Integration aller isotopenfraktionierenden Einflüsse interpretiert wird. Um diesen Faktor zu ermitteln, wurde Spross- und Bodenmaterial aus dem unmarkierten Bereich der Parzellen massenspektrometrisch untersucht. Analog zu den Unterteilstücken bezeichnet p_{14} die Menge von ^{14}N in der Versuchspflanze und p_{15} die Menge von ^{15}N in der Versuchspflanze; beide Werte sind bekannt. Da das Verhältnis der beiden Isotope im Boden bekannt ist (entspricht k , s. o.), kann der Diskriminierungsfaktor t ermittelt werden, d. h. es gilt:

$$(3) \quad \frac{p_{15}}{p_{14}+p_{15}} = t \cdot k = t \cdot \frac{b_{1;15}}{b_{1;14}+b_{1;15}} \Leftrightarrow t = \frac{p_{15}}{p_{14}+p_{15}} \cdot \frac{b_{1;14}+b_{1;15}}{b_{1;15}}$$

Dieser Faktor ist somit bekannt. Die Auswertung einer Pflanze, die auf Bodenschichten mit unterschiedlich hohem *tracer*-Anteil des Gesamt-Stickstoffs wächst, erfolgt unter der

Annahme, dass der Diskriminierungsfaktor sowohl für die Aufnahme der Isotope aus Bodenschicht 1 als auch für die Aufnahme der Isotope aus Bodenschicht 2 gilt.

Wird angenommen, dass sich die Menge der jeweiligen Isotope in der Pflanze nur aus den in den beiden Bodenschichten jeweils vorkommenden Isotopen zusammensetzt, dann gilt:

$$(4) \quad p_{14} = p_{1;14} + p_{2;14} \text{ und}$$

$$(5) \quad p_{15} = p_{1;15} + p_{2;15}, \text{ wobei sowohl } p_{14} \text{ als auch } p_{15} \text{ bekannte Zahlen sind, da der } ^{15}\text{N-Anteil des Gesamt-Stickstoffs in der Pflanze bekannt ist.}$$

Außerdem kennt man den Zusammenhang zwischen $\frac{b_{1;15}}{b_{1;14}+b_{1;15}}$ und $\frac{p_{1;15}}{p_{1;14}+p_{1;15}}$ bzw. zwischen $\frac{b_{2;15}}{b_{2;14}+b_{2;15}}$ und $\frac{p_{2;15}}{p_{2;14}+p_{2;15}}$ aufgrund der angenommenen Diskriminierung, die für beide Bodenschichten gleichermaßen gelten soll, nämlich:

$$(6) \quad \frac{p_{1;15}}{p_{1;14}+p_{1;15}} = t \cdot \frac{b_{1;15}}{b_{1;14}+b_{1;15}} \Leftrightarrow \frac{p_{1;15}}{p_{1;14}+p_{1;15}} = t \cdot k$$

Das Verhältnis der aus Bodenschicht 1 stammenden Isotope ist bekannt. Für die Isotope aus Bodenschicht 2 ergibt sich:

$$(7) \quad \frac{p_{2;15}}{p_{2;14}+p_{2;15}} = t \cdot \frac{b_{2;15}}{b_{2;14}+b_{2;15}} \Leftrightarrow \frac{p_{2;15}}{p_{2;14}+p_{2;15}} = t \cdot c$$

Dieses Verhältnis ist nicht bekannt, da c nicht bekannt ist. Zumindest kann aber auch hier ein Intervall angegeben werden, in dem das Verhältnis der aus Bodenschicht 2 stammenden Isotope liegt.

Damit sind die beiden Anteile von ^{15}N der gesamten Stickstoffaufnahme aus jeder der beiden Bodenschichten (nämlich $t \cdot k$ und $t \cdot c$) sowie der Anteil von ^{15}N des Gesamt-Stickstoffs im Pflanzenspross ($\frac{p_{15}}{p_{14}+p_{15}}$) bekannt und es kann berechnet werden, in welchem Verhältnis die beiden Ausgangsanteile von ^{15}N des Gesamt-Stickstoffs der Bodenschichten in den Anteil von ^{15}N des Gesamt-Stickstoffs im Pflanzenspross einfließen.

Dazu sei a_1 [a_2] der Anteil, mit dem der Anteil von ^{15}N des Gesamt-Stickstoffs aus Bodenschicht 1 [Bodenschicht 2] in den Anteil von ^{15}N des Gesamt-Stickstoffs im Pflanzenspross einfließt.

Mit diesen Bezeichnungen gilt:

$$(8) \quad a_1 \cdot t \cdot k + a_2 \cdot t \cdot c = \frac{p_{15}}{p_{14}+p_{15}} \text{ und}$$

$$(9) \quad a_1 + a_2 = 1.$$

Die beiden Gleichungen aus (8) und (9) können als lineares Gleichungssystem verstanden werden:

$$\begin{array}{rcl}
 I. (i) & a_1 + & a_2 = 1 \\
 II. (i) & t \cdot k \cdot a_1 + & t \cdot c \cdot a_2 = \frac{p_{15}}{p_{14} + p_{15}} \quad | \quad t \cdot k \cdot I. - II. \\
 \hline
 I. (i) & a_1 + & a_2 = 1 \\
 II. (ii) & & t \cdot (k - c) \cdot a_2 = t \cdot k - \frac{p_{15}}{p_{14} + p_{15}} \quad | \quad II. (ii): t \cdot (k - c) \\
 \hline
 I. (i) & a_1 + & a_2 = 1 \\
 II. (iii) & & a_2 = \frac{t \cdot k - \frac{p_{15}}{p_{14} + p_{15}}}{t \cdot (k - c)} \\
 \hline
 \end{array}$$

Setzt man Gleichung II. (iii) in Gleichung I. (i) ein, wird a_1 wie folgt berechnet:

$$a_1 = 1 - \frac{t \cdot k - \frac{p_{15}}{p_{14} + p_{15}}}{t \cdot (k - c)} = \frac{t \cdot (k - c) - (t \cdot k - \frac{p_{15}}{p_{14} + p_{15}})}{t \cdot (k - c)} = \frac{\frac{p_{15}}{p_{14} + p_{15}} - t \cdot c}{t \cdot (k - c)}$$

Damit sind die beiden Anteile bestimmt:

$$(10) \quad a_1 = \frac{\frac{p_{15}}{p_{14} + p_{15}} - t \cdot c}{t \cdot (k - c)} \quad \text{und} \quad a_2 = \frac{t \cdot k - \frac{p_{15}}{p_{14} + p_{15}}}{t \cdot (k - c)}$$

3.7 Statistische Auswertung

Die erhobenen Daten wurden mithilfe des Programms SPSS in Version 22 (IBM, USA) einer Ausreißeranalyse unterzogen, um Einflüsse von kleinräumiger Heterogenität, hervorgerufen beispielsweise durch ungleichmäßiges Auflaufen, Schadnager etc., möglichst auszuschließen. Dazu wurden parameterweise die Datensätze auf Werte, die um mehr als den eineinhalbfachen Interquartilabstand über dem 75 %-Quantil bzw. unter dem 25 %-Quantil lagen, untersucht. Für die weitere Analyse wurden die entsprechenden Daten ausgeschlossen, wenn dadurch keine systematische Diskriminierung einzelner Varianten auftrat.

Da der Versuch zu Deposition und Wiederaufnahme von ^{15}N nur in Parzellen mit bzw. nach Lu 3 durchgeführt wurde und bei diesem Teilversuch somit kein Streifendesign vorlag, wurde die statistische Auswertung auf Grundlage einer Blockanlage ebenfalls mit dem Statistikprogramm SPSS vorgenommen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen im Düngungssteigerungsversuch wurden zunächst mithilfe eines statistischen Modells für das Versuchsdesign einer Spaltanlage zweifaktoriell (Faktor 1: Vorfruchtvariante; Faktor 2: Düngungsstufe) ausgewertet. Da in einer Vielzahl der Auswertungen signifikante Wechselwirkungen zwischen den Faktoren festgestellt wurden, wurde der Versuch einheitlich einfaktoriell (Wirkung der Düngungsstufe auf Ebene jeder Vorfruchtvariante *et vice versa*) als Blockanlage ausgewertet.

Alle weiteren statistischen Untersuchungen wurden unter Berücksichtigung des Versuchsdesigns (Streifenanlage) ausgewertet. Die Verarbeitung des komplexen statistischen Modells (S. 146) wurde mit dem Programm SAS Version 9.3 (SAS Institute, USA) durchgeführt. Mithilfe des Shapiro-Wilk-Tests wurden die Datensätze zunächst auf Normalverteilung untersucht. Normalverteilung war zumeist gegeben. Da Zeitreihenexperimente immer nach gleichem Verfahren ausgewertet werden sollen (MOTULSKY 2010), blieben vereinzelt Abweichungen von der Normalverteilung unberücksichtigt, so dass einheitlich eine ANOVA mit Tukey-Test als *Post-hoc* durchgeführt wurde. Im Falle von signifikanten Wechselwirkungen zwischen den Faktoren wurde auf Ebene jeder Faktorstufe der Einfluss des jeweils anderen Faktors geprüft und bei signifikanten Unterschieden dargestellt.

Um die Kornerträge der jeweils zwei Kulturen der Jahre 2011 und 2012 statistisch vergleichen zu können, wurden alle Werte mittels Division durch den mittleren Ertrag der jeweiligen Kultur normiert. Die so berechneten Relativ-Erträge wurden dreifaktoriell (Vorfruchtart, Anbaudauer der Vorfrucht sowie Nachfruchtart) mit einem entsprechenden SAS-Modell (S. 147) ausgewertet.

4 Ergebnisse

4.1 Vorfruchtphase

Sprosstrockenmasse

In der Vorfruchtphase von 2007 bis 2009 bildeten die Futterpflanzen summiert über jährlich zumeist vier Aufwüchse im Mittel 11,7 t TM ha⁻¹ Sprossmasse pro Jahr. In Abhängigkeit von Vorfruchtart und Nutzungsjahr traten dabei große Unterschiede zwischen den Varianten auf. Rs 1 wies im Jahr 2009 mit 4,8 t TM ha⁻¹ die geringste, Lu 3 im zweiten Nutzungsjahr (2008) mit 21,0 t TM ha⁻¹ die höchste Sprossmasseproduktion in einem Jahr auf.

Für jede Vorfruchtart wurde festgestellt, dass die dreijährig kultivierten Bestände über die gesamte Nutzungsdauer kumuliert eine signifikant höhere Sprossmasse erreichten als die zweijährig kultivierten Bestände, die ihrerseits eine signifikant höhere kumulierte Sprossmasse bildeten als die einjährigen Bestände. Im Mittel aller Anbaudauern wurde die größte Sprossmasse von Luzerne, die mittlere von Wegwarte und die geringste von Rohrschwingel gebildet (Tab. 3).

Tab. 3: Sprosstrockenmasse der Vorfruchtbestände in Summe der Aufwüchse eines Jahres bzw. aller Jahre (2007 - 2009) in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen der summierten Sprosstrockenmasse einer Vorfruchtart bezogen auf ein Jahr bzw. die Summe aller Jahre. Unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Jahres- bzw. Gesamt-Erträgen verschiedener Vorfruchtarten als Durchschnitt aller Anbaudauern. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Sprosstrockenmasse [t TM ha ⁻¹]			
		2007	2008	2009	gesamt
Luzerne	1			8,42 b	8,42 c
	2		8,55 b	18,57 a	27,12 b
	3	6,34	20,96 a	18,15 a	51,79 a
	∅	6,34 B	14,75 A	15,05 A	29,11 A
Weg- warte	1			8,11 b	8,11 c
	2		6,87 b	11,05 a	17,92 b
	3	8,08	16,64 a	8,61 ab	41,41 a
	∅	8,08 A	11,76 B	9,25 B	22,48 B
Rohr- schwingel	1			4,76 b	4,76 c
	2		5,77 b	9,41 a	15,19 b
	3	7,46	13,01 a	8,49 a	36,42 a
	∅	7,46 AB	9,39 B	7,56 C	18,79 C

Nährstoffaufnahme in den Spross

Die jährliche **Stickstoffaufnahme** der Vorfrüchte betrug im Mittel 265,4 kg N ha⁻¹. Sie hatte eine Spannweite von 101,6 kg N ha⁻¹ im Falle von Rs 1 im Jahr 2009 bis 732,0 kg N ha⁻¹ im Falle von Lu 3 im zweiten Nutzungsjahr (2008). Die Stickstoffaufnahme der legumen Luzerne war im zweiten und dritten Nutzungsjahr deutlich höher als im Ansaatjahr. Im Unterschied dazu war die Stickstoffaufnahme von Wegwarte und Rohrschwingel gegenüber dem Ansaatjahr im zweiten Jahr tendenziell weniger stark erhöht oder konstant und im dritten

Jahr geringer. Analog zur Sprossmasseproduktion war das Mittel der kumulierten Stickstoffaufnahme von Luzerne am höchsten, gefolgt von Wegwarte und Rohrschwengel. Die Luzernebestände nahmen während ihrer gesamten Kulturdauer mindestens doppelt so viel Stickstoff auf wie die entsprechenden Wegwarte- und Rohrschwengelkulturen, einzige Ausnahme davon war Ww 1 (Tab. 4).

Tab. 4: Stickstoffaufnahme der Vorfruchtbestände in Summe der Aufwüchse eines Jahres bzw. aller Jahre (2007 - 2009) in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen der summierten Stickstoffaufnahme einer Vorfruchtart bezogen auf ein Jahr bzw. die Summe aller Jahre. Unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Jahres- bzw. Gesamt-Stickstoffaufnahme verschiedener Vorfruchtarten als Durchschnitt aller Anbaudauern. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Stickstoffaufnahme [kg N ha ⁻¹]			
		2007	2008	2009	gesamt
Luzerne	1			275,5 b	275,5 c
	2		296,5 b	574,8 a	871,3 b
	3	228,1	732,0 a	558,4 a	1.746,7 a
	∅	228,1	514,3 A	469,6 A	964,5 A
Wegwarte	1			184,5 b	184,5 c
	2		174,1 b	178,2 a	352,3 b
	3	215,1	302,5 a	137,4 a	870,1 a
	∅	215,1	238,3 B	166,7 B	469,0 B
Rohrschwengel	1			101,6 b	101,6 c
	2		143,1	146,5 a	289,6 b
	3	193,0	217,1	117,8 b	721,0 a
	∅	193,0	180,1 B	122,0 C	370,7 C

Im Durchschnitt aller Varianten und Jahre nahmen die Vorfrüchte jährlich 36,7 kg P ha⁻¹ auf. Die geringste Aufnahme wurde mit 13,4 kg P ha⁻¹ für Rs 1 im Jahr 2009 festgestellt, die höchste mit 75,4 kg P ha⁻¹ für Lu 3 im zweiten Nutzungsjahr (2008). Die **Phosphoraufnahme** der allorhizen Vorfrüchte Luzerne und Wegwarte lag in den Jahren 2008 und 2009, und infolge dessen auch im Mittel der kumulierten Gesamt-Phosphoraufnahme, deutlich über der des Rohrschwengels (Tab. 5).

Tab. 5: Phosphoraufnahme der Vorfruchtbestände in Summe der Aufwüchse eines Jahres bzw. aller Jahre (2007 - 2009) in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen der summierten Phosphoraufnahme einer Vorfruchtart bezogen auf ein Jahr bzw. die Summe aller Jahre. Unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Jahres- bzw. Gesamt-Phosphoraufnahme verschiedener Vorfruchtarten als Durchschnitt aller Anbaudauern. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Phosphoraufnahme [kg P ha ⁻¹]			
		2007	2008	2009	gesamt
Luzerne	1			22,9 b	22,9 c
	2		26,8 b	64,5 a	91,2 b
	3	24,1	75,4 a	59,2 a	182,8 a
	∅	24,1	51,1 A	48,9 A	99,0 A
Weg- warte	1			29,4 b	29,4 c
	2		25,2 b	45,9 a	71,1 b
	3	29,2	74,0 a	39,9 ab	172,3 a
	∅	29,2	49,6 A	38,4 B	90,9 B
Rohr- schwingel	1			13,4 b	13,4 c
	2		17,9 b	25,5 a	43,3 b
	3	27,6	36,4 a	23,9 a	115,5 a
	∅	27,6	27,1 B	20,9 C	57,4 C

Die durchschnittliche jährliche **Kaliumaufnahme** der Vorfrüchte betrug 440,0 kg K ha⁻¹. Die geringste Aufnahme mit 139,5 kg K ha⁻¹ lag im Falle von Rs 1 im Jahr 2009 vor, die höchste Aufnahme mit 841,3 kg K ha⁻¹ wurde bei Ww 3 im zweiten Nutzungsjahr (2008) festgestellt. Luzerne und Wegwarte wiesen eine höhere kumulierte Kaliumaufnahme als Rohrschwingel auf (Tab. 6).

Tab. 6: Kaliumaufnahme der Vorfruchtbestände in Summe der Aufwüchse eines Jahres bzw. aller Jahre (2007 - 2009) in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen der summierten Kaliumaufnahme einer Vorfruchtart bezogen auf ein Jahr bzw. die Summe aller Jahre. Unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Jahres- bzw. Gesamt-Kaliumaufnahme verschiedener Vorfruchtarten als Durchschnitt aller Anbaudauern. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Kaliumaufnahme [kg K ha ⁻¹]			
		2007	2008	2009	gesamt
Luzerne	1			281,3 b	281,3 c
	2		360,8 b	705,8 a	1.066,5 b
	3	259,8	826,3 a	651,3 a	1.997,3 a
	∅	259,8 B	593,5 A	546,1 A	1.115,0 A
Weg- warte	1			498,9	498,9 c
	2		505,4 b	553,1	1.058,5 b
	3	428,1	841,3 a	454,3	2.151,8 a
	∅	428,1 A	673,4 A	502,1 A	1.236,4 A
Rohr- schwingel	1			139,5 b	139,5 c
	2		231,3	218,2 a	449,5 b
	3	375,3	359,4	230,5 a	1.340,4 a
	∅	375,3 AB	295,4 B	196,1 B	643,1 B

Bodennährstoffgehalte nach Ende der Vorfruchtphase

Die N_{\min} -Menge im Boden wurde während aller Vegetationsperioden der Nachfruchtphase erfasst. Entsprechende Daten und Ausführungen sind in den jeweiligen Kapiteln zu den Nachfrüchten enthalten (Kap. 4.2.1.4, S. 43; Kap. 4.2.3.4, S. 56; Kap. 4.2.7.4, S. 71).

Nach Ende der Vorfruchtphase wurden keine Unterschiede zwischen Werten des **Phosphorgehalts** des Bodens in Abhängigkeit von ausgewählten Vorfruchtvarianten festgestellt (Tab. 7). Mit durchschnittlich 39 mg P_2O_5 /100 g Feinboden befand sich der Boden der Tiefenstufe 0 - 30 cm nach VDLUFA-Einteilung in der Gehaltsklasse E „sehr hoch“ (VDLUFA 1991).

Tab. 7: Phosphorgehalt des Bodens im Frühjahr 2010 in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der Vorfruchtvariante im Versuch A. Keine signifikanten Unterschiede. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

Phosphorgehalt des Bodens [mg P_2O_5 /100 g Feinboden]				
Tiefe [cm]	0 – 30	30 – 45	45 – 75	75 – 105
Lu 2	39,48	22,58	2,80	2,27
Ww 2	38,96	18,31	2,47	2,21
Rs 1	39,39	21,84	2,99	2,72
\emptyset	39,28	20,91	2,75	2,40

In ähnlicher Weise wurde hinsichtlich des **Kaliumgehaltes** im Boden ausgewählter Vorfruchtvarianten kein Unterschied festgestellt (Tab. 8). Der durchschnittliche Kaliumgehalt von 52 mg K_2O /100 g Feinboden der Tiefenstufe 0 – 30 cm entsprach nach VDLUFA-Einteilung analog zu Phosphor der Gehaltsklasse E „sehr hoch“ (VDLUFA 1991).

Tab. 8: Kaliumgehalt des Bodens im Frühjahr 2010 in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der Vorfruchtvariante im Versuch A. Keine signifikanten Unterschiede. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

Kaliumgehalt des Bodens [mg K_2O /100 g Feinboden]				
Tiefe [cm]	0 – 30	30 – 45	45 – 75	75 – 105
Lu 2	51,86	27,42	13,00	14,64
Ww 2	54,35	27,38	12,81	13,02
Rs 1	50,84	32,19	11,92	13,70
\emptyset	52,35	29,00	12,58	13,79

4.2 Nachfruchtphase

Eine schematische Übersicht der für die vorliegende Arbeit untersuchten Fruchtfolgen befindet sich im Anhang (Anhang-Tab. 1, S. 145).

4.2.1 Erste Nachfrucht: Sommerweizen (2010)

4.2.1.1 Sprossentwicklung und Gaswechsel

Sprosstrockenmasse

Die Sprosstrockenmasse des Weizens war zur zweiten und dritten Zeiternte nach Luzerne signifikant höher als nach Wegwarte. Zudem wurde zur dritten Zeiternte nach Luzerne eine höhere Sprosstrockenmasse als nach Rohrschwengel festgestellt (Abb. 1).

Die mittlere Sprossmasse des Sommerweizens nahm von der ersten Zeiternte bis zur vierten Zeiternte von 2 t TM ha⁻¹ auf 14 t TM ha⁻¹ zu. Bei der fünften Zeiternte wurde mit 10 t ha⁻¹ wieder eine geringere Trockenmasse ermittelt. Zur ersten Zeiternte wurde eine signifikante Wechselwirkung zwischen den Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer festgestellt.

Die genannten Befunde entsprechen nicht Hypothese 1. Im Unterschied dazu unterstützen sie Hypothese 2.

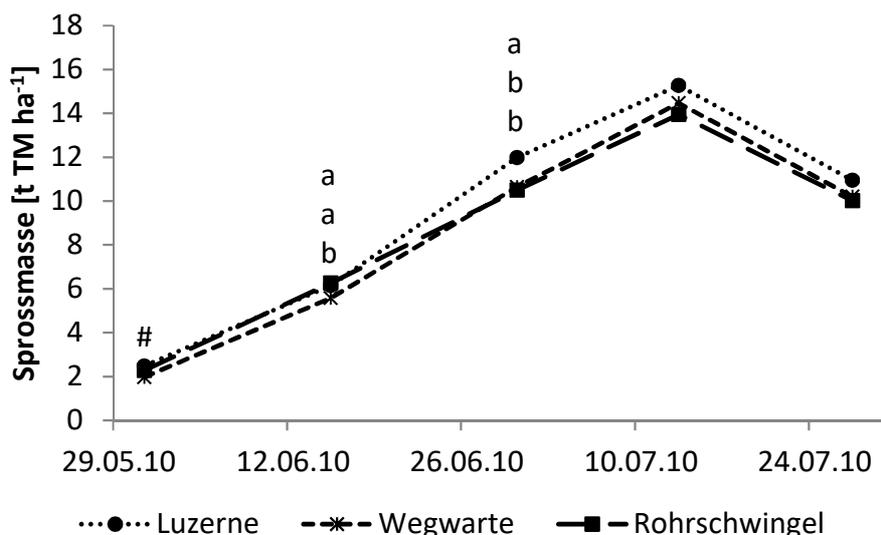


Abb. 1: Sprosstrockenmasse von Sommerweizen in Abhängigkeit von der Vorfruchtart. Fünf Zeiternten (31.05. - 27.07.2010) im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Faktorstufe. Das Zeichen # kennzeichnet eine Wechselwirkung der Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

Die Anbaudauer der Vorfrucht beeinflusste zu keiner Zeiternte die Sprosstrockenmasse des Sommerweizens in Form einer Hauptwirkung (Anhang-Tab. 4, S. 156).

Zur ersten Zeiternte war die Sprosstrockenmasse des Weizens nach Ww 3 jedoch signifikant höher als nach Ww 2 (Tab. 9). Zudem war die Sprossmasse nach Lu 1 höher als nach Ww 1.

Die Untersuchung der Sprosstrockenmasse des Weizens gab demnach zur ersten Zeiternte Hinweise auf teilweise Gültigkeit der Hypothesen 2 und 3. Die deutliche Mehrheit der Sprossmassedaten des Weizens unterstützt dagegen die Hypothese 3 nicht.

Tab. 9: Wechselwirkung der Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht beim Parameter Sprosstrockenmasse von Sommerweizen zur ersten Zeiternte (31.05.2010) im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten nach gleicher Vorfruchtart in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht. Unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bei gleicher Anbaudauer der Vorfrucht in Abhängigkeit von der Vorfruchtart. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Sprosstrockenmasse [t TM ha ⁻¹]					
		Luzerne		Wegwarte		Rohrschwengel	
Dauer	1	2,54	A	1,77	ab B	2,16	AB
	2	2,21		1,52	b	2,02	
	3	2,39		2,38	a	2,36	

Blattflächenindex

Von der ersten bis zur fünften Zeiternte nahm der Blattflächenindex des Sommerweizens von etwa 4 auf 0 ab. Im Vergleich der Varianten mit einjährig kultivierter Vorfrucht (Lu 1, Ww 1, Rs 1) wurde der Blattflächenindex teilweise von der Vorfruchtart beeinflusst. Zum ersten und vierten Termin wurde der höchste BFI nach Lu 1 ermittelt (Abb. 2).

Die Ergebnisse der BFI-Untersuchungen an Sommerweizen nach einjährig kultivierter Vorfrucht bestätigen nicht Hypothese 1. Im Unterschied dazu unterstützen sie teilweise Hypothese 2.

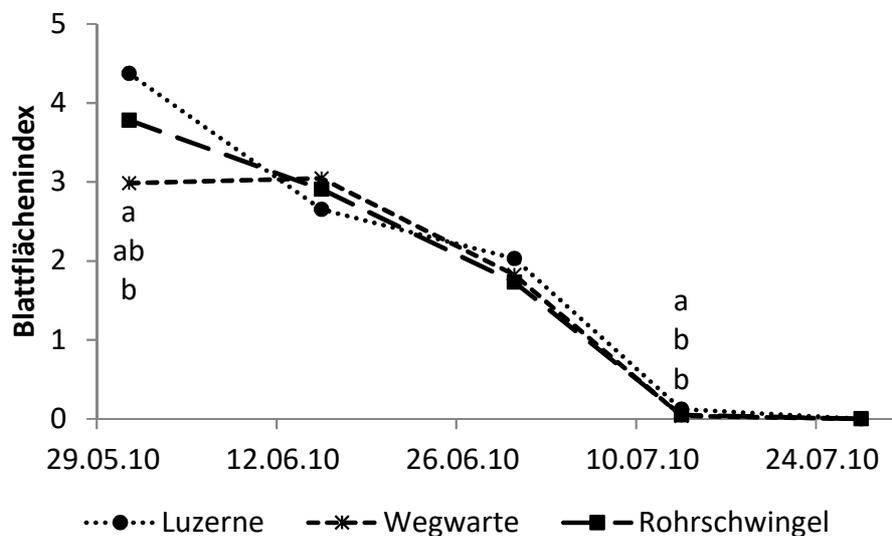


Abb. 2: Blattflächenindex von Sommerweizen nach einjährig kultivierter Vorfrucht in Abhängigkeit von der Vorfruchtart. Fünf Zeiternten (31.05. - 27.07.2010) im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Faktorstufe. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

Der BFI des Weizens wurde durch die Anbaudauer der allorhizen Vorfrüchte zu keiner Messung in Form einer Hauptwirkung beeinflusst (Anhang-Tab. 5, S. 156).

Zur zweiten Zeiternte lag jedoch eine Wechselwirkung zwischen der Art der allorhizen Vorfrucht (Luzerne bzw. Wegwarte) und deren Anbaudauer vor. Nach Ww 3 wurde ein höherer BFI festgestellt als nach Ww 2 (Tab. 10).

Die Ergebnisse der BFI-Messung nach Wegwarte stehen somit teilweise in Übereinstimmung mit Hypothese 3.

Tab. 10: Wechselwirkung der Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht beim Parameter Blattflächenindex von Sommerweizen zur zweiten Zeiternte (15.06.2010) im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten nach gleicher Vorfruchtart in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Blattflächenindex	
		Luzerne	Wegwarte
Dauer	1	2,55	2,92 ab
	2	2,23	2,40 b
	3	2,30	3,29 a

Sprosslänge

Die Sprosslänge des Sommerweizens wurde von den Versuchsfaktoren nicht beeinflusst (Anhang-Tab. 6, S. 156). Aufgrund dieses Sachverhalts können die Hypothesen 1, 2 und 3 nicht bestätigt werden.

Blattphotosyntheserate

Im Vergleich der Varianten mit einjährig kultivierter Vorfrucht hatte die Vorfruchtart keinen Einfluss auf die Photosyntheserate des Sommerweizens (Anhang-Tab. 7, S. 157).

Die Photosyntheserate der Weizenblätter nahm im Mittel aller berücksichtigten Varianten im Zeitraum 21.06. - 01.07.2010 von $20 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ auf $5 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ab. Zur fünften Messung wurde mit einer mittleren Photosyntheserate von etwa $13 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ eine vorübergehende Zunahme der Werte gemessen. Zur sechsten Messung wurde mit durchschnittlich $3 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ die niedrigste Photosyntheserate ermittelt. Die Ergebnisse der Photosynthesemessungen an Weizen nach einjährig angebauten Vorfrüchten stehen nicht im Einklang mit den Hypothesen 1 und 2.

Die unterschiedliche Anbaudauer der allorhizen Vorfrüchte hatte keinen konsistenten Einfluss auf die Photosynthese der ersten Nachfrucht Sommerweizen. Zum letzten Termin war die Photosyntheserate nach zweijährig kultivierter Vorfrucht signifikant höher als nach einjährig kultivierter und dreijährig kultivierter Vorfrucht (Abb. 3). Die vorgestellten Messungen unterstützen Hypothese 3 nicht.

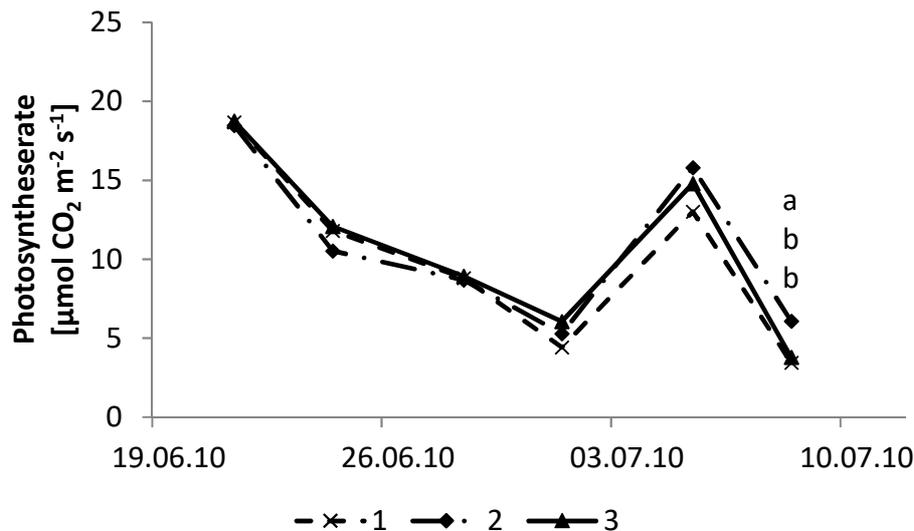


Abb. 3: Blattphotosyntheserate von Sommerweizen bezogen auf 1 m² Blattfläche nach Luzerne und Wegwarte in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht. Sechs Messreihen (21.06. - 08.07.2010) im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Faktorstufe. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

Bestandes-Blattphotosyntheserate

Die Vorfruchtart hatte im Vergleich der einjährig kultivierten Vorfrüchte keinen Einfluss auf die Bestandesphotosynthese (Anhang-Tab. 8, S. 157).

Der Verlauf der geschätzten Bestandesphotosyntheserate des Sommerweizens ähnelt dem der Photosyntheserate, weist jedoch aufgrund des fortschreitenden Rückgangs des Blattflächenindex' eine stärker fallende Tendenz auf. Vom ersten bis zum letzten Messtermin nahm die Bestandesphotosyntheserate von ca. 65 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ auf unter 10 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ab. Die Ergebnisse der Bestandesphotosynthese-Schätzung stehen analog zu denen der Photosynthesemessung nicht in Übereinstimmung mit Hypothese 1 und Hypothese 2.

Die Bestandesphotosynthese des Weizens nach Luzerne und Wegwarte wurde nur vereinzelt von der Anbaudauer der Vorfrucht beeinflusst. Zum ersten Messtermin lag eine Wechselwirkung zwischen den Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht auf. Vom zweiten bis zum fünften Messtermin wurde keine Beeinflussung der Bestandesphotosynthese des Weizens durch die Anbaudauer der Vorfrucht festgestellt. Im Unterschied dazu erreichte der Weizenbestand am letzten Termin nach zweijährig kultivierter Vorfrucht eine höhere Photosynthese als nach einjährig kultivierter (Abb. 4). Die Schätzung der Bestandesphotosynthese unterstützt nach Auswertung der Hauptwirkungen somit ebenfalls nicht Hypothese 3.

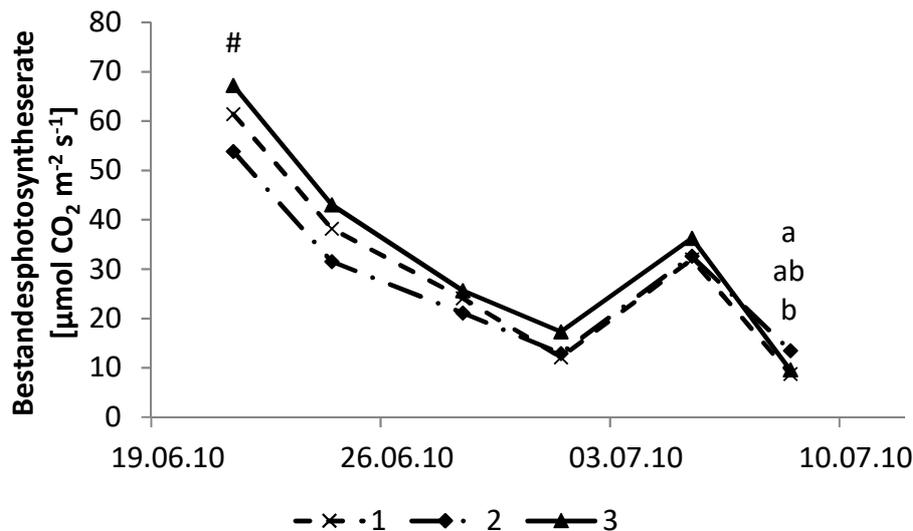


Abb. 4: Bestandes-Blattphotosyntheserate von Sommerweizen bezogen auf 1 m² Bodenfläche nach Luzerne und Wegwarte in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht. Sechs Messreihen (21.06. - 08.07.2010) im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Faktorstufe. Das Zeichen # kennzeichnet eine Wechselwirkung der Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

Zum ersten Messtermin war die Bestandesphotosynthese des Weizens nach allorhizen Vorfrüchten nach Ww3 signifikant höher als nach Ww2 (Tab. 11). Dieses Ergebnis unterstützt teilweise Hypothese 3.

Tab. 11: Wechselwirkung der Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht beim Parameter Bestandes-Blattphotosyntheserate von Sommerweizen bezogen auf 1 m² Bodenfläche zur ersten Messung (21.06.2010) im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten nach gleicher Vorfruchtart in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

Bestandesphotosyntheserate [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]			
		Luzerne	Wegwarte
Dauer	1	66,44	56,46 ab
	2	60,39	47,38 b
	3	57,90	76,61 a

Blatttranspirationsrate

Im Untersuchungszeitraum (21.06.10 – 08.07.10) hatte die Vorfruchtart im Vergleich der einjährig kultivierten Vorfrüchte keinen konsistenten Einfluss auf die Transpirationsrate des Sommerweizens (Anhang-Tab. 9, S. 157). In den Messungen wurde eine mittlere Transpirationsrate der Weizenblätter zwischen 1,2 und 3,2 mmol H₂O m⁻² s⁻¹ erfasst. Die Ergebnisse stehen Hypothese 1 und Hypothese 2 entgegen.

Im Unterschied dazu wurde die Transpirationsrate des Sommerweizens von der Anbaudauer der allorhizen Vorfrüchte beeinflusst. Zu allen sechs Messterminen wurde die tendenziell geringste Transpirationsrate nach einjähriger Kultur der Vorfrüchte ermittelt. Die relativen Unterschiede nahmen bis zum fünften Termin zu, und zum sechsten Messtermin wies der Weizen nach zweijähriger Vorfrucht eine signifikant höhere Transpirationsrate auf als nach

ein- und dreijährigem Anbau (Abb. 5). Die Zeitreihe der Transpirationsrate bestätigt Hypothese 3.

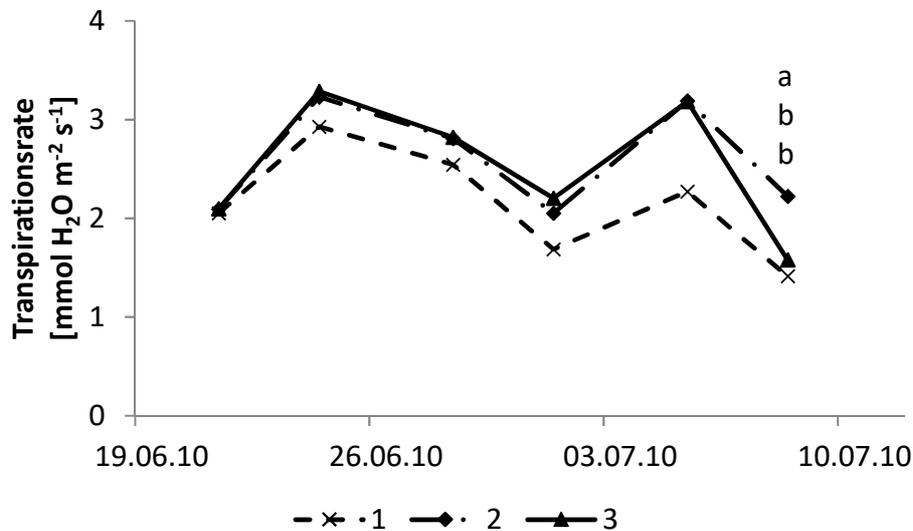


Abb. 5: Blatttranspirationsrate von Sommerweizen bezogen auf 1 m² Blattfläche nach Luzerne und Wegwarte in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht. Sechs Messreihen (21.06. - 08.07.2010) im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Faktorstufe. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

Bestandes-Blatttranspirationsrate

Analog zur Bestandesphotosynthese wurde auch die Bestandestranspiration von der Vorfruchtart im Vergleich der einjährig kultivierten Vorfrüchte nicht beeinflusst (Anhang-Tab. 10, S. 158). Die Bestandestranspirationsrate stieg zunächst vom ersten zum zweiten Messtermin von 7 mmol H₂O m⁻² s⁻¹ auf 10 mmol H₂O m⁻² s⁻¹ und nahm anschließend bis zur letzten Messung auf etwa 3 mmol H₂O m⁻² s⁻¹ ab. Die Messergebnisse der Bestandestranspirationsrate bestätigen weder Hypothese 1 noch Hypothese 2.

Die Bestandestranspiration des Weizens nach Luzerne und Wegwarte wies zum dritten Messtermin eine signifikante Wechselwirkung zwischen den Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht auf. Eine weitere signifikante Beeinflussung der Bestandestranspiration des Weizens durch die Anbaudauer der allorhizen Vorfrüchte wurde nicht festgestellt. Tendenziell war die Bestandestranspiration nach dreijährig kultivierter Vorfrucht stets höher als nach einjährig kultivierter Vorfrucht. Zu den beiden letzten Messterminen wurden darüber hinaus im Trend unterschiedlich hohe Bestandestranspirationen nach zweijährigem verglichen mit einjährigem Anbau der Vorfrüchte festgestellt. Nach zweijähriger Kultur wurden tendenziell höhere Werte der Bestandestranspiration ermittelt (Abb. 6). Unter Vorbehalt können die Ergebnisse als übereinstimmend mit Hypothese 3 interpretiert werden.

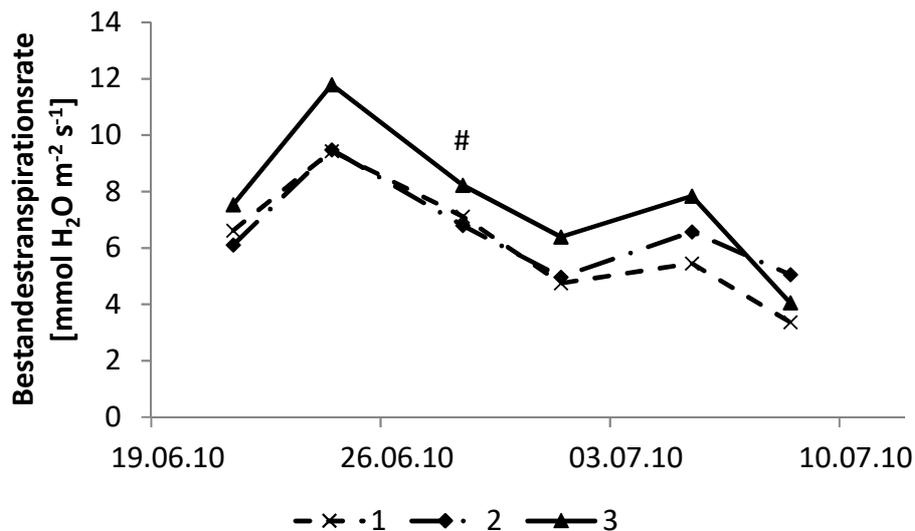


Abb. 6: Bestandes-Blatttranspirationsrate von Sommerweizen bezogen auf 1 m² Bodenfläche nach Luzerne und Wegwarte in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht. Sechs Messreihen (21.06. - 08.07.2010) im Versuch A. Das Zeichen # kennzeichnet eine Wechselwirkung der Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

Zum dritten Messtermin wies Weizen nach Ww 3 eine höhere Bestandestranspirationsrate auf als Weizen nach Ww 2 sowie nach Lu 3 (Tab. 12). Im Vergleich der dreijährigen Vorfrüchte bestätigen die Ergebnisse nicht Hypothese 2. Im Unterschied dazu stehen die Ergebnisse der Bestandestranspirationsratenmessungen nach Wegwarte unter Vorbehalt mit Hypothese 3 in Einklang.

Tab. 12: Wechselwirkung der Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht beim Parameter Bestandes-Blatttranspirationsrate von Sommerweizen bezogen auf 1 m² Bodenfläche zur dritten Messung (28.06.2010) im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten nach gleicher Vorfruchtart in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht. Unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bei gleicher Anbaudauer der Vorfrucht in Abhängigkeit von der Vorfruchtart. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Bestandestranspirationsrate [mmol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹]		
		Luzerne	Wegwarte	
Dauer	1	6,27		7,96 ab
	2	7,15		6,45 b
	3	6,02	B	10,44 a A

4.2.1.2 Ertragsstruktur

Der **Kornertrag** des Sommerweizens betrug im Mittel 4,1 t TM ha⁻¹. Es wurde eine signifikante Wechselwirkung zwischen den Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht festgestellt (Tab. 13 und Tab. 14).

Die mittlere **Tausendkornmasse** (TKM) betrug 36,4 g. Nach Wegwarte wurde eine signifikant höhere TKM erreicht als nach Luzerne. In Varianten mit mehrjähriger Vorfrucht war die TKM höher als in Varianten mit einjährig kultivierter Vorfrucht. Die durchschnittliche **Anzahl Körner/Ähre** betrug 17,5. Nach Luzerne bildete der Weizen mehr Körner/Ähre als nach Wegwarte.

Im Mittel aller Varianten bildete der Sommerweizen 662 **Ähren/m²**. Weder die Vorfruchtart noch die Anbaudauer der Vorfrucht hatten einen signifikanten Einfluss auf die Ährendichte (Tab. 13).

Der **Strohertrag** des Sommerweizens war nach Luzerne mit ca. 6,1 t TM ha⁻¹ höher als nach Wegwarte und Rohrschwengel mit je ca. 5,5 t TM ha⁻¹. Gemittelt über alle Varianten wurden 5,7 t TM ha⁻¹ Stroh geerntet.

Der **Harvest-Index** betrug im Mittel 0,43. Nach dreijähriger Vorfrucht wurde ein höherer Wert festgestellt als nach einjähriger (Tab. 13).

Die Ertragsstrukturparameter des Sommerweizens zeigen bezüglich der Hypothesen ein uneinheitliches Bild. Die Ergebnisse der Anzahl Körner/Ähre sowie des Strohertrags stehen im Einklang mit Hypothese 2, wohingegen die TKM diese Hypothese nicht bestätigt. Die Daten der Parameter TKM und *Harvest-Index* unterstützen zudem Hypothese 3.

Tab. 13: Ertragsstruktur von Sommerweizen (2010) in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht im Versuch A. TKM: Tausendkornmasse. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Stufe des jeweiligen Versuchsfaktors. Das Zeichen # kennzeichnet eine Wechselwirkung der Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Ertragsstruktur					
		Kornertrag [t TM ha ⁻¹]	TKM [g]	Anzahl Körner/Ähre	Anzahl Ähren/m ²	Strohertrag [t TM ha ⁻¹]	<i>Harvest-Index</i>
Art	Lu	4,37 #	35,5 b	19,7 a	641,7	6,10 a	0,42
	Ww	4,01 #	37,1 a	16,1 b	683,0	5,52 b	0,43
	Rs	3,97 #	36,6 ab	16,8 ab	660,8	5,44 b	0,43
Dauer	1	3,96 #	35,2 b	17,7	655,2	5,90	0,41 b
	2	4,21 #	37,0 a	16,8	692,7	5,72	0,43 ab
	3	4,18 #	36,9 a	18,0	637,5	5,44	0,44 a
	∅	4,12	36,4	17,5	661,8	5,69	0,43

Nach Lu 3 war der Kornertrag sowohl gegenüber Lu 1 als auch gegenüber Rs 3 signifikant erhöht (Tab. 14). Der Kornertrag des Weizens nach dreijähriger Vorfrucht steht im Einklang mit Hypothese 1 und Hypothese 2. Die Ergebnisse des Parameters Kornertrag nach Luzerne stützen Hypothese 3.

Tab. 14: Wechselwirkung der Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht beim Parameter Korntrockenmasse von Sommerweizen (2010) im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten nach gleicher Vorfruchtart in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht. Unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede des Kornertrags bei gleicher Anbaudauer der Vorfrucht in Abhängigkeit von der Vorfruchtart. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Korntrockenmasse [t TM ha ⁻¹]					
		Luzerne		Wegwarte		Rohrschwengel	
Dauer	1	3,56	b	3,26		3,65	
	2	3,85	ab	3,64		3,63	
	3	4,14	a A	3,69	AB	3,21	B

4.2.1.3 Nährstoffaufnahme in den Spross

Die Ergebnisse der Nährstoffgehaltsanalysen des Weizensprosses gibt Anhang-Tab. 11 (S. 158) wieder.

Die statistische Auswertung der Parameter Stickstoff-, Phosphor- und Kaliumaufnahme wies analog zur Sprosstrockenmasse zur ersten Zeiternte des Weizens eine Wechselwirkung zwischen den Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer aus.

Ebenfalls analog zu den Daten der Sprosstrockenmasse wurden zur fünften Zeiternte geringere Mengen von Stickstoff, Phosphor und Kalium im Spross festgestellt als zur vierten Zeiternte.

Zur ersten Zeiternte wurde beim Parameter **Stickstoffaufnahme** in den Spross eine Wechselwirkung zwischen den Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer festgestellt. Im Mittel der Varianten betrug die Stickstoffaufnahme zur ersten Zeiternte etwa 84 kg N ha^{-1} (Tab. 15). Ab der zweiten Zeiternte lag nach Luzerne eine höhere Stickstoffaufnahme als nach Rohrschwengel und, mit Ausnahme der dritten Zeiternte, als nach Wegwarte vor. Im Vergleich der Zeiternten wurde die maximale Aufnahme zur vierten Beprobung mit ca. 177 kg N ha^{-1} erreicht. In das Korn wurden im Mittel der Varianten 96 kg N ha^{-1} aufgenommen. Bei diesem Parameter wurde eine Wechselwirkung zwischen den Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht festgestellt. Das Stroh enthielt durchschnittlich 22 kg N ha^{-1} . Nach Luzerne wurde eine höhere Stickstoffaufnahme erreicht als nach Wegwarte und Rohrschwengel.

Zur ersten und zweiten Probenahme lag beim Parameter **Phosphoraufnahme** in den Weizenspross eine Wechselwirkung zwischen den Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer vor. Zur dritten Zeiternte war die Phosphoraufnahme nach Luzerne höher als nach Rohrschwengel. Die mittlere aufgenommene Menge von Phosphor stieg von 13 kg P ha^{-1} zur ersten Zeiternte auf 33 kg P ha^{-1} zur vierten Zeiternte (Tab. 15). Die Körner wiesen im Mittel der Varianten eine Aufnahme von 16 kg P ha^{-1} auf. Die statistische Auswertung ergab für die Daten der Phosphoraufnahme ins Korn eine Wechselwirkung zwischen den Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht. Das Stroh enthielt durchschnittlich 4 kg P ha^{-1} . Es wurde keine Beeinflussung durch die Versuchsfaktoren festgestellt.

Zur ersten Zeiternte wurde bei der **Kaliumaufnahme** in den Spross eine Wechselwirkung zwischen den Faktoren Vorfruchtart und Kulturdauer festgestellt. Im Mittel betrug die Kaliumaufnahme zur ersten Zeiternte 119 kg K ha^{-1} (Tab. 15). Die Kaliumaufnahme nach Luzerne war zur zweiten und dritten Beprobung höher als nach Wegwarte, und zur zweiten bis vierten Zeiternte höher als nach Rohrschwengel. Die höchste Kaliumaufnahme wurde für die dritte Zeiternte mit 219 kg K ha^{-1} berechnet. Ins Korn wurden durchschnittlich 21 kg K ha^{-1} aufgenommen. Die Daten wiesen eine Wechselwirkung zwischen den Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht auf. Das Stroh enthielt im Mittel 56 kg K ha^{-1} . Nach Luzerne war die Kaliumaufnahme in das Stroh höher als nach Wegwarte und Rohrschwengel. Es wurde somit wiederholt festgestellt, dass die Aufnahme von Stickstoff,

Phosphor und Kalium nach der Vorfrucht Luzerne höher war als nach Wegwarte und/oder Rohrschwengel. Dieser Sachverhalt bestätigt nicht Hypothese 1. Im Unterschied dazu wird Hypothese 2 unterstützt.

Tab. 15: Nährstoffaufnahme in den Spross von Sommerweizen zu den fünf Zeiternteterminen (31.05. - 27.07.2010) und im Erntegut in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Stufe des jeweiligen Versuchsfaktors. Das Zeichen # kennzeichnet eine Wechselwirkung der Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Nährstoffaufnahme [kg N/P/K ha ⁻¹]								
		31.05.10	15.06.10	30.06.10	13.07.10	27.07.10	13.08.10	13.08.10		
		Spross	Spross	Spross	Spross	Spross	Korn	Stroh		
Stickstoff	Art	Lu	97,3 #	159,6 a	215,5 a	205,3 a	144,3 a	112,6 #	29,0 a	
		Ww	71,0 #	118,8 b	153,2 b	169,5 ab	91,5 b	87,9 #	18,8 b	
		Rs	84,4 #	136,3 b	151,2 b	154,0 b	96,6 b	86,2 #	17,3 b	
	Dauer	1	87,6 #	141,5	174,5	183,9	110,9	95,1 #	24,2	
		2	77,0 #	131,6	170,7	171,6	98,8	95,7 #	20,2	
		3	88,1 #	141,6	171,0	174,5	122,6	95,8 #	21,2	
	Ø	84,2	138,2	172,1	176,7	110,8	95,5	21,7		
	Phosphor	Art	Lu	14,4 #	23,1 #	31,7 a	33,1	19,1	16,9 #	3,9
			Ww	11,4 #	21,8 #	28,9 ab	34,7	17,1	15,6 #	4,3
			Rs	12,0 #	23,2 #	26,7 b	31,0	15,8	15,2 #	3,3
Dauer		1	12,4 #	21,8 #	28,7	31,8	16,9	15,2 #	3,7	
		2	11,3 #	22,3 #	29,1	33,8	16,1	16,8 #	4,0	
		3	14,1 #	24,0 #	29,3	33,3	19,1	15,8 #	3,9	
Ø		12,6	22,7	29,0	33,0	17,4	15,9	3,9		
Kalium	Art	Lu	135,9 #	229,8 a	273,2 a	249,2 a	127,7	21,7 #	73,7 a	
		Ww	101,4 #	179,4 b	196,0 b	191,5 ab	109,2	20,6 #	51,1 b	
		Rs	120,1 #	203,0 b	191,8 b	181,2 b	95,4	20,0 #	43,9 b	
	Dauer	1	119,0 #	201,5	226,2	203,3	109,7	20,7 #	59,4	
		2	108,2 #	199,2	213,3	197,6	100,0	20,8 #	52,2	
		3	130,0 #	211,4	216,3	216,6	122,5	20,7 #	58,5	
	Ø	119,2	204,1	218,7	205,9	110,8	20,8	56,2		

Die Stickstoffaufnahme des Weizens war zur ersten Zeiternte nach Ww 3 höher als nach Ww 2, und nach Lu 1 und Lu 2 höher als nach Ww 1 bzw. Ww 2 (Tab. 16). Der Weizen nahm nach Luzerne signifikant mehr Stickstoff ins Korn auf als nach Wegwarte und Rohrschwengel. Lediglich im Vergleich der Vorfrüchte Lu 2 und Ww 2 war der Unterschied nur tendenziell

Zur ersten Zeiternte war die Phosphoraufnahme des Weizens nach Ww 3 höher als nach Ww 2. Zur zweiten Zeiternte lag eine höhere Phosphoraufnahme des Weizens nach Rs 2 verglichen mit Ww 2 vor. Nach Lu 3 war die Phosphoraufnahme ins Korn höher als nach Rs 3 (Tab. 16).

Zur ersten Zeiternte wurde nach Ww 3 eine höhere Kaliumaufnahme als nach Ww 1 und Ww 2 festgestellt. Außerdem war die Kaliumaufnahme nach Lu 1 und Lu 2 höher als nach Ww 1 bzw. Ww 2. Nach Lu 3 nahmen die Körner mehr Kalium auf als nach Rs 3 (Tab. 16).

Die genauere Analyse der statistischen Wechselwirkungen deutet analog zu der erwähnten Hauptwirkung des Faktors Vorfruchtart darauf hin, dass mehrfach nach Luzerne höhere Nährstoffaufnahmen des Weizens erzielt wurden als nach Wegwarte und/oder Rohrschwengel. Diese Unterschiede waren im Falle der Wechselwirkungen nicht nach allen Anbaudauern gleich ausgeprägt, doch unterstützen die Ergebnisse zumeist Hypothese 2. Zudem zeigt sich, dass die Nährstoffaufnahme des Weizens vereinzelt mit zunehmender Anbaudauer der Vorfrucht stieg. Im Unterschied zu der vorgestellten Auswertung der Hauptwirkungen des Faktors Anbaudauer der Vorfrucht treten in den Wechselwirkungen somit Hinweise auf, die die Hypothese 3 bestätigen.

Tab. 16: Wechselwirkung der Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht bei Untersuchungen zur Nährstoffaufnahme in den Spross von Sommerweizen (2010) im Versuch A. Betroffene Parameter sind Stickstoffaufnahme (erste Zeiternte, 31.05.2010), Stickstoffaufnahme ins Korn, Phosphoraufnahme (erste und zweite Zeiternte, 31.05. und 15.06.2010), Phosphoraufnahme ins Korn, Kaliumaufnahme (erste Zeiternte, 31.05.2010) sowie Kaliumaufnahme ins Korn. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen je Parameter signifikante Unterschiede zwischen Varianten nach gleicher Vorfruchtart in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht. Unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede der Nährstoffaufnahme bei gleicher Anbaudauer der Vorfrucht in Abhängigkeit von der Vorfruchtart. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Nährstoffaufnahme [kg N/P/K ha ⁻¹]							
		Luzerne		Wegwarte		Rohrschwengel			
NA (1)	Dauer	1	111,0	A	65,2	ab	B	86,7	AB
		2	93,4	A	57,8	b	B	79,8	AB
		3	87,6		90,0	a		86,6	
NA (Korn)	Dauer	1	110,6	A	82,1		B	92,6	B
		2	107,4	A	91,0		AB	88,5	B
		3	119,6	A	90,5		B	77,4	B
PA (1)	Dauer	1	14,7		10,5	ab		12,0	
		2	13,5		9,0	b		11,6	
		3	15,0		14,7	a		12,5	
PA (2)	Dauer	1	23,5		21,6			20,4	
		2	21,2	AB	20,0		B	25,7	A
		3	24,7		23,7			23,6	
PA (Korn)	Dauer	1	15,9		14,3			15,3	
		2	16,9		17,0			16,5	
		3	17,8	A	15,6		AB	14,0	B
KA (1)	Dauer	1	146,1	A	90,3	b	B	120,7	AB
		2	128,4	A	81,7	b	B	114,9	AB
		3	133,3		132,2	a		124,8	
KA (Korn)	Dauer	1	20,9		19,8			21,4	
		2	20,9		21,1			20,5	
		3	23,1	A	21,0		AB	18,1	B

4.2.1.4 Mineralischer Bodenstickstoff

Beim mineralischen Bodenstickstoff traten zwischen den Varianten in Abhängigkeit von der Vorfruchtart große Unterschiede auf. Nach Luzerne wurde zu allen Terminen in allen untersuchten Bodenschichten eine höhere N_{\min} -Menge festgestellt als nach den nicht-legumen Vorfrüchten (Anhang-Tab. 12, S. 159). Im Mittel aller beprobten Varianten enthielt der Boden bis in eine Tiefe von 105 cm Ende Mai 2010, sechs Wochen nach gestaffelter mineralischer Stickstoffdüngung (Bestandesführung von Sommerweizen: S. 151), $115,0 \text{ kg } N_{\min} \text{ ha}^{-1}$. Ende Juli wurde im Boden mit im Mittel $40,6 \text{ kg } N_{\min} \text{ ha}^{-1}$ deutlich weniger mineralischer Stickstoff festgestellt.

Oftmals enthielt der Unterboden nach Luzerne auch einen höheren Anteil der gesamten N_{\min} -Menge im Boden verglichen mit den Parzellen mit nicht-legumer Vorfrucht.

Von Ende Mai bis Mitte Juni nahm die Menge von mineralischem Bodenstickstoff nach Luzerne in den obersten 45 cm des Bodenprofils von durchschnittlich $175 \text{ kg } N_{\min} \text{ ha}^{-1}$ um etwa $100 \text{ kg } N_{\min} \text{ ha}^{-1}$ ab, während nach den nicht-legumen Vorfrüchten maximal mit $30 \text{ kg } N_{\min} \text{ ha}^{-1}$ eine erheblich geringere Abnahme ermittelt wurde. Dennoch wurde nach Luzerne zur letzten Beprobung eine um etwa $30 \text{ kg } N_{\min} \text{ ha}^{-1}$ höhere N_{\min} -Menge im Boden der obersten Tiefenstufe festgestellt als nach Wegwarte und Rohrschwingel. Die Anbaudauer der Vorfrucht hatte keinen einheitlichen Einfluss auf die N_{\min} -Menge im Boden. Die Befunde deuten darauf hin, dass trotz der höheren Ausgleichsdüngung zu Weizen nach Wegwarte und Rohrschwingel im Boden unter Weizen nach Luzerne eine höhere N_{\min} -Menge vorhanden war als nach Wegwarte und Rohrschwingel. Dieser Sachverhalt bestätigt nachdrücklich Hypothese 2, während er Hypothese 3 nicht unterstützt.

4.2.2 Erste Nachfrucht: Futtermalve (2010)

4.2.2.1 Sprossentwicklung und Gaswechsel

Sprosstrockenmasse

Die Sprosstrockenmasse der Futtermalve war zum ersten Beprobungstermin nach Luzerne höher als nach Rohrschwingel. Im Untersuchungszeitraum (09. – 28.07.10) verdoppelte sich die Sprosstrockenmasse von 3 t TM ha^{-1} auf 6 t TM ha^{-1} (Abb. 7).

Die Ergebnisse der Sprossmasseuntersuchungen unterstützen nicht Hypothese 1, wohingegen teilweise eine Übereinstimmung der Ergebnisse mit Hypothese 2 festgestellt wird.

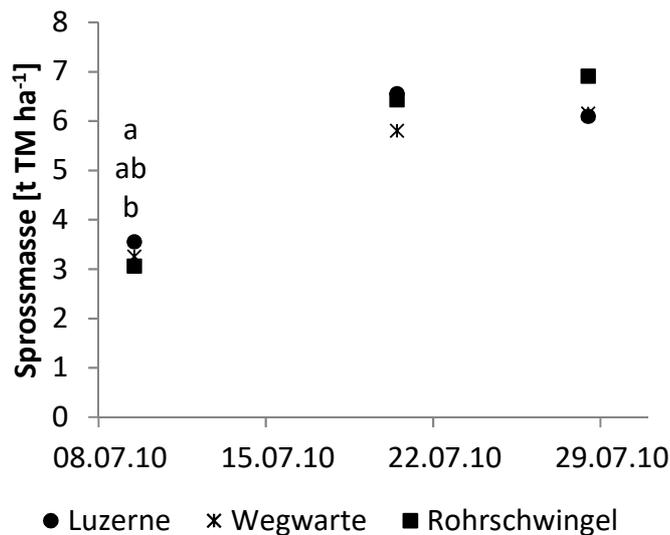


Abb. 7: Sprosstrockenmasse von Futtermalve in Abhängigkeit von der Vorfruchtart. Drei Zeiternten (09.07. - 28.07.2010) im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Faktorstufe. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

Die Anbaudauer der Vorfrucht hatte keinen Einfluss auf die Sprosstrockenmasse der Malve (Anhang-Tab. 13, S. 160). Aufgrund der Messergebnisse der Sprosstrockenmasse kann Hypothese 3 somit nicht bestätigt werden.

Bei der auf größerer Fläche ($3 \text{ m}^2/\text{Parzelle}$) durchgeführten Zeiternte wurden generell niedrigere Werte der Sprosstrockenmasse festgestellt als bei der zwei Tage zuvor standardmäßig durchgeführten Zeiternte. Dieser Sachverhalt wurde vermutlich dadurch begründet, dass für die Zeiternten auf kleiner Fläche gezielt Bereiche ohne Bestandeslücken ausgewählt wurden. Dieses Vorgehen war für eine Fläche von $3 \text{ m}^2/\text{Parzelle}$ nicht möglich, so dass Heterogenität in den ausgewählten Flächen zu geringeren Werten der hochgerechneten Sprosstrockenmasse führte. Analog zu der letzten standardmäßigen Zeiternte wurde keine Beeinflussung der Sprosstrockenmasse der Malve durch die Vorfruchtart festgestellt. Im Unterschied dazu hatte die Anbaudauer der Vorfrucht einen Einfluss auf die Sprosstrockenmasse. Nach mehrjährigem Anbau der Vorfrüchte wurden signifikant höhere Werte festgestellt als nach einjährig kultivierter Vorfrucht (Tab. 17). Im Unterschied zu den Befunden der standardmäßigen Zeiternten können die Ergebnisse der großflächigeren Zeiternte die Hypothese 1 und 2 nicht bestätigen. Hypothese 3 steht demgegenüber im Einklang mit den Ergebnissen.

Tab. 17: Sprosstrockenmasse von Futtermalve in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht. Zeiternte am 30.07.2010 im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Faktorstufe. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

Sprosstrockenmasse [t TM ha ⁻¹]		
Art	Lu	4,74
	Ww	4,53
	Rs	4,61
Dauer	1	4,24 b
	2	4,75 a
	3	4,86 a
	∅	4,62

Blattflächenindex

Von der ersten bis zur dritten Zeiternte nahm der durchschnittliche Blattflächenindex der Malve nach einjährig kultivierter Vorfrucht von 2,5 auf 1,8 ab. Zur dritten Zeiternte wurde nach Ww 1 ein höherer BFI als nach Lu 1 festgestellt (Abb. 8). Dieser Sachverhalt bestätigt Hypothesen 1 und 2 nicht.

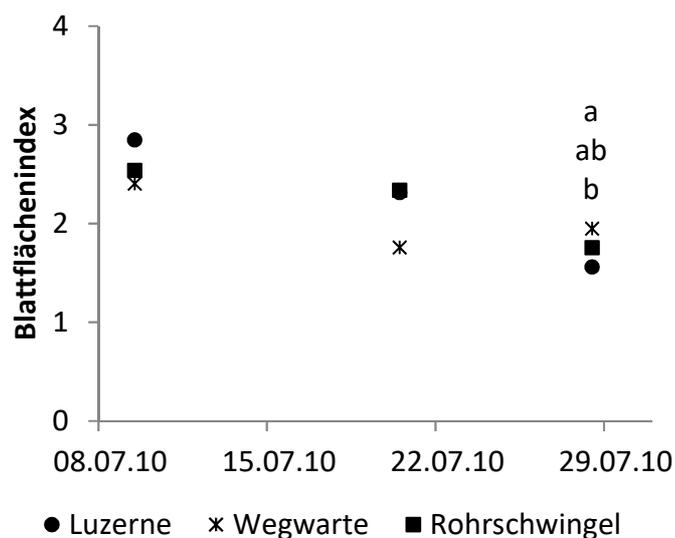


Abb. 8: Blattflächenindex von Futtermalve nach einjährig kultivierter Vorfrucht in Abhängigkeit von der Vorfruchtart. Drei Zeiternten (09.07. - 28.07.2010) im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Faktorstufe. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

Die Anbaudauer der allorhizen Vorfrüchte hatte keinen Einfluss auf den BFI (Anhang-Tab. 14, S. 160). Die BFI-Ergebnisse von Malve nach Luzerne und Wegwarte bestätigen daher nicht Hypothese 3.

Sprosslänge

Die Sprosslänge der Futtermalve wurde von den Versuchsfaktoren nicht beeinflusst (Anhang-Tab. 15, S. 160). Dieser Sachverhalt steht nicht im Einklang mit den Hypothesen 1, 2 und 3.

Blattphotosyntheserate

Die Photosyntheserate der Futtermalve nach einjährig kultivierter Vorfrucht betrug zum ersten und zweiten Messtermin etwa $25 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ und zum dritten bis sechsten Messtermin etwa $20 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Die Vorfruchtart hatte im Vergleich der einjährig kultivierten Vorfrüchte keinen einheitlichen Einfluss auf die Photosyntheserate der Malve. Zum zweiten Termin wiesen die Malvepflanzen nach allorhizen Vorfrüchten Lu 1 und Ww 1 eine signifikant höhere Photosyntheserate auf als nach dem homorhizen Rs 1. Zum vierten Termin erreichte die Malve im Gegensatz dazu nach Rs 1 eine signifikant höhere Rate als nach Ww 1 (Abb. 9). Eine hypothesenbezogene Evaluierung der Ergebnisse der Photosynthesemessungen an Malve wird aufgrund der im Zeitverlauf inkonsistenten Ergebnisse unterlassen.

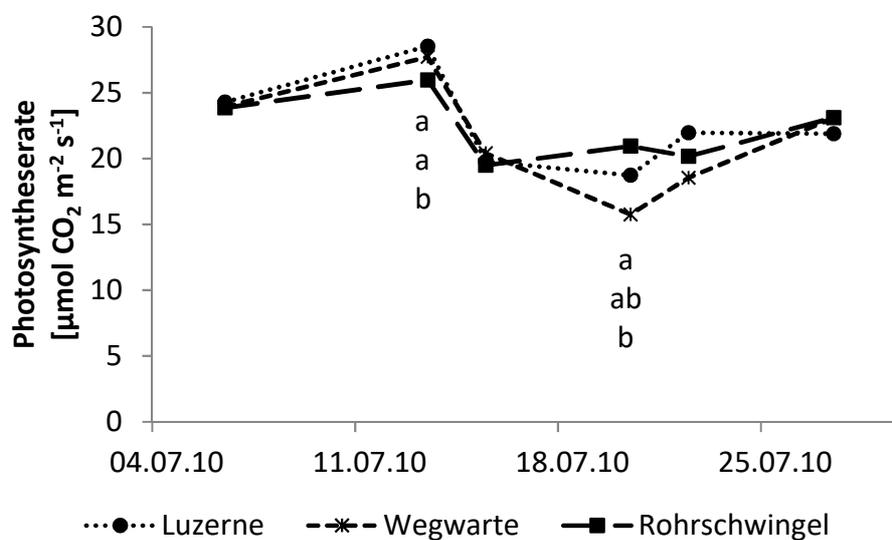


Abb. 9: Blattphotosyntheserate von Futtermalve bezogen auf 1 m^2 Blattfläche nach einjährig kultivierter Vorfrucht in Abhängigkeit von der Vorfruchtart. Sechs Messreihen (06.07. - 27.07.2010) im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Faktorstufe. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

Zu zwei Messterminen war die Photosyntheserate der Malve nach zweijährigem Anbau von Luzerne und Wegwarte höher als nach einjähriger Kultur. Am letzten Termin war der Unterschied signifikant (Abb. 10). Die Ergebnisse der Photosynthesemessungen an Malve unterstützen somit zum Teil Hypothese 3.

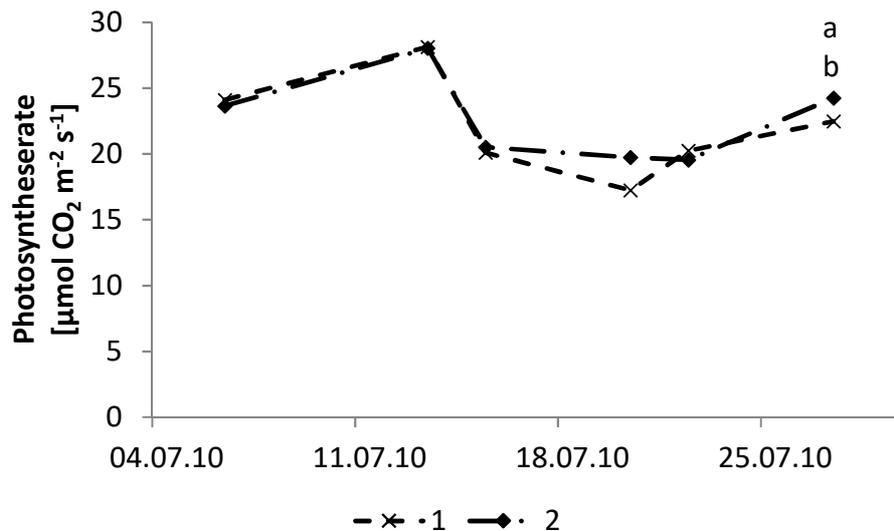


Abb. 10: Blattphotosyntheserate von Futtermalve bezogen auf 1 m² Blattfläche nach Luzerne und Wegwarte in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht. Sechs Messreihen (06.07. - 27.07.2010) im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Faktorstufe. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

Bestandes-Blattphotosyntheserate

In den Varianten mit einjährig kultivierter Vorfrucht wurde die höchste Bestandesphotosyntheserate der Futtermalve zu vier von sechs Messterminen nach Lu 1 erfasst. Am zweiten Termin war der Unterschied verglichen mit Ww 1 signifikant. Im Unterschied dazu wurde zum vierten Termin festgestellt, dass die Bestandesphotosyntheserate des Weizens nach Rs 1 höher war als nach Ww 1. Zum sechsten Termin nach wurde Lu 1 eine verglichen mit Ww 1 signifikant geringere Bestandesphotosyntheserate gemessen (Abb. 11). Im Trend wird daher keine Übereinstimmung mit Hypothese 1 festgestellt. Im Unterschied dazu wird Hypothese 2 unter Vorbehalt bestätigt.

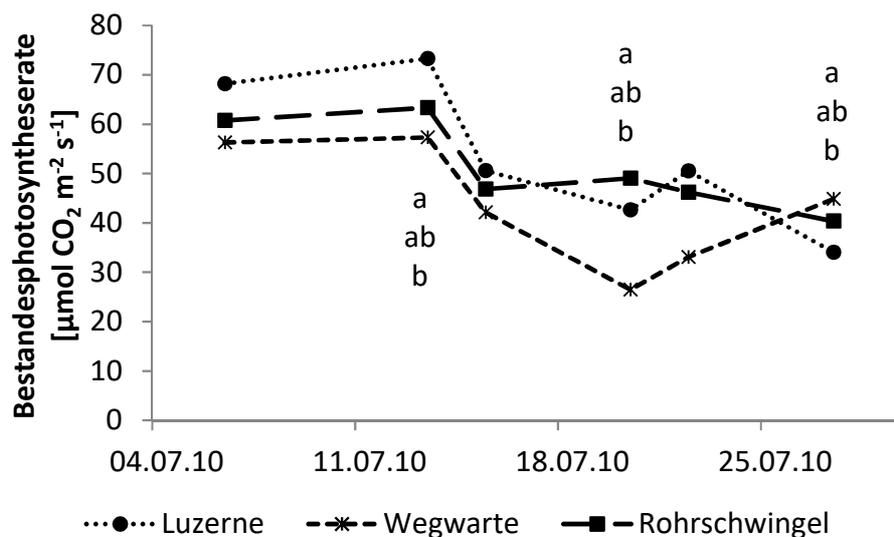


Abb. 11: Bestandes-Blattphotosyntheserate von Futtermalve bezogen auf 1 m² Bodenfläche nach einjährig kultivierter Vorfrucht in Abhängigkeit von der Vorfruchtart. Sechs Messreihen (06.07. - 27.07.2010) im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Faktorstufe. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

Die Anbaudauer der Vorfrüchte Luzerne und Wegwarte hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Bestandesphotosynthese der Malve (Anhang-Tab. 16, S. 161). Dieser Aspekt steht nicht im Einklang mit Hypothese 3.

Blatttranspirationsrate

Die Transpirationsrate der Malve nach einjährig kultivierter Vorfrucht wurde durch die Vorfruchtart im einjährigen Anbau nur zum letzten Messtermin signifikant beeinflusst. Nach Lu 1 wies die Malve eine signifikant geringere Transpirationsrate auf als nach Ww 1 und Rs 1 (Abb. 12). Zu den übrigen Messterminen wurden im Trend gegensätzliche, jedoch nicht konsistente Abstufungen festgestellt. Über alle Termine betrug die Transpirationsrate der Malve zwischen 2,5 und 4,5 $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Die Transpirationsrate der Malve wurde somit nicht entsprechend den Hypothesen 1 und 2 beeinflusst.

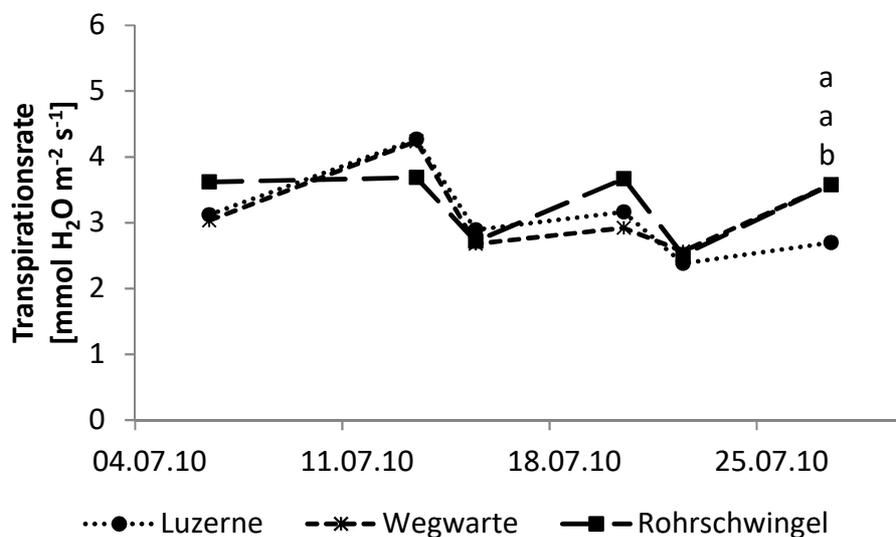


Abb. 12: Blatttranspirationsrate von Futtermalve bezogen auf 1 m^2 Blattfläche nach einjährig kultivierter Vorfrucht in Abhängigkeit von der Vorfruchtart. Sechs Messreihen (06.07. - 27.07.2010) im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Faktorstufe. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

Die Anbaudauer der allorhizen Vorfrüchte hatte keinen Effekt auf die Transpirationsrate der Malve (Anhang-Tab. 17, S. 161). Aufgrund dessen kann Hypothese 3 nicht bestätigt werden.

Bestandes-Blatttranspirationsrate

Die Bestandestranspirationsrate der Futtermalve im Vergleich der einjährig kultivierten Vorfrüchte wurde analog zur Bestandesphotosynthese im Zeitverlauf nicht einheitlich durch die Vorfruchtart beeinflusst. Festzustellen ist jedoch, dass zu den ersten fünf Terminen nach Lu 1 durchgängig höhere Werte als nach Ww 1 gemessen wurden. Am dritten Messtermin war dieser Unterschied signifikant. Im Unterschied dazu wurden zur vierten Messung nach Rs 1 höhere Werte als nach Ww 1 erfasst. Zum sechsten Messtermin wurde dagegen nach Lu 1 eine geringere Transpirationsrate als nach Ww 1 und Rs 1 festgestellt (Abb. 13).

Die Bestandesphotosyntheserate der Malve nahm im generellen Verlauf von 7 - 9 $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ zum ersten Messtermin auf 4 - 6 $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ zum letzten Termin ab, war dabei aber Schwankungen unterworfen. Hypothese 1 wird aufgrund der

Messergebnisse nicht bestätigt. Im Unterschied dazu unterstützt die im Trend festgestellte höhere Bestandestranspirationsrate nach Luzerne verglichen mit Wegwarte unter Vorbehalt Hypothese 2.

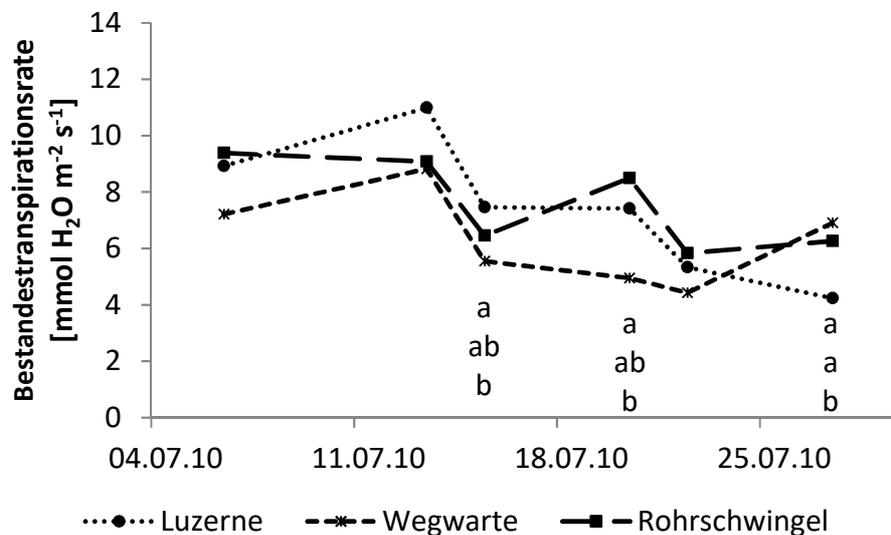


Abb. 13: Bestandes-Blatttranspirationsrate von Futtermalve bezogen auf 1 m² Bodenfläche nach einjährig kultivierter Vorfrucht in Abhängigkeit von der Vorfruchtart. Sechs Messreihen (06.07. - 27.07.2010) im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Faktorstufe. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

Die Anbaudauer der Vorfrucht hatte im Vergleich von Luzerne und Wegwarte keinen Einfluss auf die Bestandestranspiration der Futtermalve (Anhang-Tab. 18, S. 161). Analog zu den Ergebnissen der Transpirationsratenmessungen wird keine Übereinstimmung mit Hypothese 3 festgestellt.

4.2.2.2 Nährstoffaufnahme in den Spross

Die Nährstoffgehalte im Malvenspross sind in der Anhang-Tab. 19 (S. 162) wiedergegeben.

Zur zweiten Zeiternte wurden die höchsten Nährstoffaufnahmen festgestellt. Nach einem Anstieg der Nährstoffaufnahme vom ersten zum zweiten Termin wurden zur dritten Beprobung im Trend wieder geringere Werte festgestellt (Tab. 18).

Nach Luzerne wurde zu allen Terminen die höchste **Stickstoffaufnahme** festgestellt. Zur ersten Zeiternte war dieses Ergebnis signifikant. Die mittlere Stickstoffaufnahme nahm von 114 kg N ha⁻¹ zur ersten auf 163 kg N ha⁻¹ zur zweiten Zeiternte zu.

Von der ersten zur zweiten Zeiternte stieg die **Phosphoraufnahme** von 11 kg P ha⁻¹ auf 19 kg P ha⁻¹. Vorfruchtart und Kulturdauer der Vorfrucht beeinflussten diesen Parameter nicht.

Die mittlere **Kaliumaufnahme** betrug zur ersten Zeiternte 144 kg K ha⁻¹ und zur zweiten Zeiternte 204 kg K ha⁻¹. Während zur ersten Beprobung nach Luzerne eine höhere Kaliumaufnahme als nach Rohrschwengel vorlag, wies die Malve zur dritten Zeiternte nach Rohrschwengel eine höhere Aufnahme als nach Wegwarte auf.

Insbesondere die Stickstoffaufnahme der Malve bestätigt Hypothese 2. Im Unterschied dazu stehen die Ergebnisse nicht in Übereinstimmung mit den Hypothesen 1 und 3.

Tab. 18: Nährstoffaufnahme in den Spross von Futtermalve zu den drei Zeiternteterminen (09.07. - 28.07.2010) in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Stufe des jeweiligen Versuchsfaktors. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Nährstoffaufnahme [kg N/P/K ha ⁻¹]			
		09.07.10	20.07.10	28.07.10	
Stickstoff	Art	Lu	130,6 a	184,7	169,1
		Ww	106,6 b	147,0	148,0
		Rs	103,3 b	158,2	159,1
	Dauer	1	110,5	162,5	154,3
		2	113,7	160,1	155,2
		3	118,6	167,3	166,7
		∅	114,3	163,3	158,7
Phosphor	Art	Lu	12,3	18,6	17,2
		Ww	10,9	18,9	18,1
		Rs	10,8	19,2	20,9
	Dauer	1	11,2	17,8	17,8
		2	11,5	19,3	19,0
		3	11,5	19,6	19,6
		∅	11,4	18,9	18,8
Kalium	Art	Lu	160,7 a	216,8	185,4 ab
		Ww	136,5 ab	184,8	183,3 b
		Rs	131,1 b	211,5	203,9 a
	Dauer	1	133,0	191,6	183,2
		2	144,5	205,8	191,9
		3	153,4	215,6	197,5
		∅	143,6	204,3	190,9

4.2.3 Zweite Nachfrucht: Wintergerste (2011)

4.2.3.1 Sprossentwicklung und Gaswechsel

Sprosstrockenmasse

Die Sprosstrockenmasse der Wintergerste war zur ersten Zeiternte nach Luzerne höher als nach Rohrschwengel (Abb. 14). Von Mitte Februar bis Anfang Juni nahm die Sprosstrockenmasse der Gerste von 0,4 t TM ha⁻¹ auf 16 t TM ha⁻¹ zu, etwa 90 % der Zunahme entfiel auf den Zeitraum von Mitte April bis Anfang Juni. Die zu Beginn der Vegetationsperiode festgestellten Unterschiede unterstützen teilweise die Hypothesen 1 und 2.

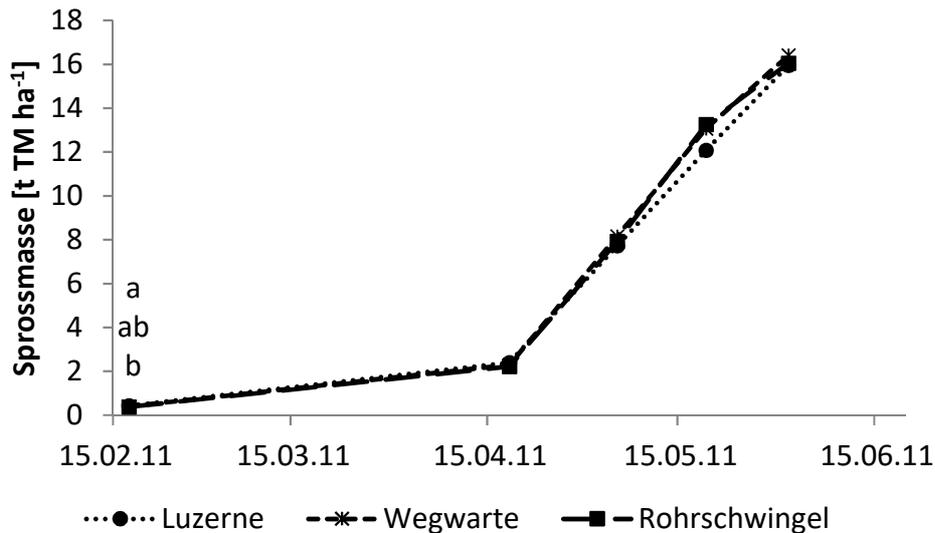


Abb. 14: Sprosstrockenmasse von Wintergerste in Abhängigkeit von der Vorfruchtart. Fünf Zeiternten (17.02. - 01.06.2011) im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Faktorstufe. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

Die Anbaudauer der Vorfrucht hatte keinen Einfluss auf die Sprosstrockenmasse der Gerste (Anhang-Tab. 20, S. 162). Aufgrund der Ergebnisse kann Hypothese 3 somit nicht bestätigt werden.

Blattflächenindex

Der Blattflächenindex der Wintergerste nahm von Mitte April bis Anfang Mai von 3,7 auf 5,3 zu und ging bis Anfang Juni wieder auf einen Wert von 3,1 zurück. Die Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht hatten keinen Einfluss auf den BFI (Anhang-Tab. 21, S. 163). Die Untersuchungsergebnisse der Blattfläche der Gerste stehen nicht im Einklang mit den Hypothesen 1, 2 und 3.

Sprosslänge

Die Sprosslänge der Wintergerste nahm von Mitte April bis Mitte Mai von 36 cm auf 114 cm zu und veränderte sich bis Anfang Juni nahezu nicht mehr. Der Parameter wurde von den Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht nicht beeinflusst (Anhang-Tab. 22, S. 163). Aufgrund der Messergebnisse der Sprosslänge können die Hypothesen 1, 2 und 3 nicht bestätigt werden.

SPAD-Value

Der mittlere *SPAD-Value* der Gerstenblätter betrug zu allen Messterminen 46 bis 53. Er zeigte keine Reaktion auf die Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht (Anhang-Tab. 23, S. 163). Entsprechend den Ergebnissen der BFI- und Sprosslänge-Untersuchungen wird beim hypothesenbezogenen Abgleich der *SPAD-Value*-Messungen keine Übereinstimmung mit den Hypothesen 1, 2 und 3 festgestellt.

Blattphotosyntheserate

Die Photosyntheserate der Wintergerste wurde zum Ende der Wachstumsphase vom Faktor Vorfruchtart beeinflusst. Nach Luzerne wurde ab dem vierten Messtermin eine tendenziell höhere Photosyntheserate als nach den beiden anderen Vorfrüchten gemessen. Zum fünften Messtermin waren die Unterschiede signifikant (Abb. 15). Im Mittel der Varianten betrug die Photosyntheserate zum ersten Messtermin $10 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Nach einer Steigerung auf etwa $15 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ zum zweiten Messtermin nahm die Rate auf unter $10 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ zum vierten Messtermin ab, worauf ein erneuter Anstieg der Photosyntheserate auf $17 - 23 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ zum fünften Messtermin folgte. Die Ergebnisse der Photosyntheserate-Messungen unterstützen nicht Hypothese 1. Zum Ende des Wachstums der Gerste wurden Ergebnisse erhoben, die Hypothese 2 bestätigen.

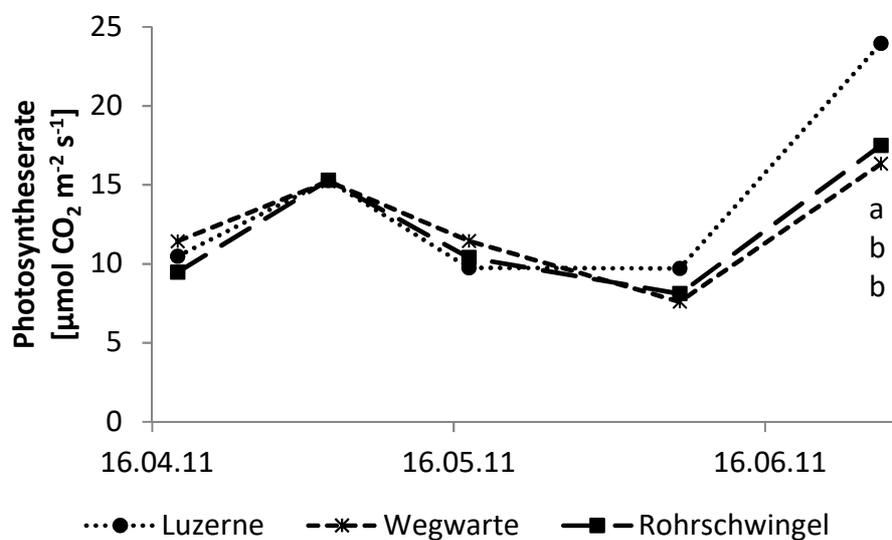


Abb. 15: Blattphotosyntheserate von Wintergerste bezogen auf 1 m^2 Blattfläche in Abhängigkeit von der Vorfruchtart. Fünf Messreihen (18.04. - 27.06.2011) im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Faktorstufe. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

Die Anbaudauer der Vorfrucht (ein- verglichen mit zweijähriger Kultur) hatte keinen Einfluss auf die Blattphotosyntheserate der Gerste (Anhang-Tab. 24, S. 164). Dieser Sachverhalt steht nicht im Einklang mit Hypothese 3.

Bestandes-Blattphotosyntheserate

Bei der Bestandesphotosyntheserate der Wintergerste wurden zum ersten Messtermin nach Wegwarte höhere Werte als nach Rohrschwengel gemessen. Im folgenden Messzeitraum wurde der Einfluss der Vorfruchtart nicht bestätigt (Abb. 16). Die Bestandesphotosynthese stieg von der ersten Messung mit $35 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ zur zweiten Messung mit $80 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ deutlich an. Bis zum vierten Messtermin nahm der Wert auf etwa $30 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ab. Zum ersten Messtermin unterstützten die Werte der Bestandesphotosyntheserate der Gerste Hypothese 1. Die Ergebnisse der weiteren Messungen bestätigen die Hypothesen 1 und 2 nicht.

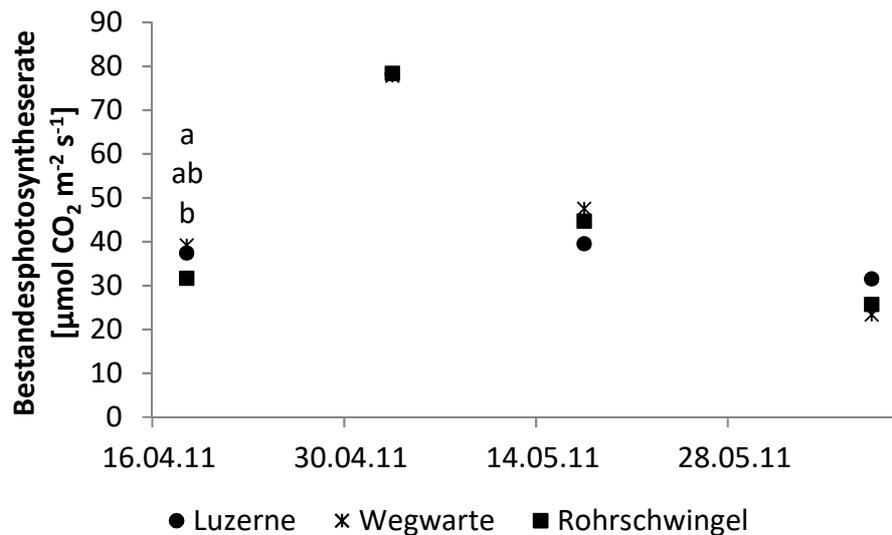


Abb. 16: Bestandes-Blattphotosyntheserate von Wintergerste bezogen auf 1 m² Bodenfläche in Abhängigkeit von der Vorfruchtart. Vier Messreihen (18.04. - 07.06.2011) im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Faktorstufe. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

Zu keinem Zeitpunkt hatte die Anbaudauer der Vorfrucht einen Einfluss auf die Bestandesphotosynthese der Wintergerste (Anhang-Tab. 25, S. 164). Dieser Sachverhalt steht nicht im Einklang mit Hypothese 3.

Blatttranspirationsrate

Die Transpirationsrate der Wintergerste nahm vom ersten bis zum vierten Messtermin von 3,2 mmol H₂O m⁻² s⁻¹ auf 2,2 mmol H₂O m⁻² s⁻¹ ab. Zum fünften Messtermin wurden mit 3,8 mmol H₂O m⁻² s⁻¹ im Mittel der Varianten die höchsten Werte im Untersuchungszeitraum ermittelt. Die Transpirationsrate der Wintergerste wurde durch die Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht nicht signifikant beeinflusst (Anhang-Tab. 26, S. 164). Die Ergebnisse der Transpirationsratenmessungen an Gerste unterstützen nicht die Hypothesen 1, 2 und 3.

Bestandes-Blatttranspirationsrate

Die Bestandestranspirationsrate der Gerste war im Untersuchungszeitraum verglichen mit der Bestandesphotosyntheserate deutlich geringeren Schwankungen unterworfen. Nach einer geringen Zunahme der Werte von 11 mmol H₂O m⁻² s⁻¹ auf 12 mmol H₂O m⁻² s⁻¹ vom ersten zum zweiten Termin nahm die Bestandestranspirationsrate bis zur vierten Messung auf 7 mmol H₂O m⁻² s⁻¹ ab. Weder Vorfruchtart noch Anbaudauer der Vorfrucht beeinflussten die Bestandestranspiration der Wintergerste signifikant (Anhang-Tab. 27, S. 165). Analog zur Transpirationsrate stehen auch die Messergebnisse der Bestandestranspirationsrate der Gerste nicht im Einklang mit den Hypothesen 1, 2 und 3.

4.2.3.2 Ertragsstruktur

Die Parameter Kornertrag, Tausendkornmasse, Strohertrag sowie *Harvest-Index* wurden für das bespelzte Korn ermittelt.

Der **Kornertrag** der Wintergerste betrug im Mittel aller Varianten 8,0 t TM ha⁻¹. Es wurde kein Einfluss der Versuchsfaktoren auf den Kornertrag festgestellt.

Die durchschnittliche **Tausendkornmasse** betrug 54,1 g. Nach Luzerne war die TKM geringer als nach Wegwarte und Rohrschwingel.

Im Mittel aller Varianten bildete die Wintergerste 446 **Ähren/m²** mit durchschnittlich 32,7 **Körnern/Ähre**. Beide Parameter wurden nicht durch die Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht beeinflusst.

Der mittlere **Strohertrag** betrug 3,9 t TM ha⁻¹, der durchschnittliche **Harvest-Index** 0,67. Beide Parameter wurden durch die Vorfruchtart und durch die Anbaudauer der Vorfrucht nicht beeinflusst (Tab. 19).

Bei einem angenommenen Spelzanteil von zehn Gewichtsprozenten betrug der mittlere spelzfreie Kornertrag 7,16 t TM ha⁻¹, der mittlere Strohertrag inklusive Spelzen 4,72 t TM ha⁻¹ und der korrigierte mittlere *Harvest-Index* 0,60.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Ertragsstrukturparameter der Wintergerste die Hypothesen 1, 2 und 3 nicht bestätigen.

Tab. 19: Ertragsstruktur von Wintergerste (2011) in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht im Versuch A. TKM: Tausendkornmasse. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Stufe des jeweiligen Versuchsfaktors. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Ertragsstruktur					
		Kornertrag	TKM	Anzahl	Anzahl	Strohertrag	Harvest-
		[t TM ha ⁻¹]	[g]	Körner/Ähre	Ähren/m ²	[t TM ha ⁻¹]	Index
Art	Lu	7,74	52,8 b	33,4	456,6	4,00	0,66
	Ww	8,02	54,8 a	32,9	447,4	3,79	0,67
	Rs	8,13	55,0 a	31,6	432,5	3,97	0,67
Dauer	1	8,38	54,3	32,1	439,4	3,99	0,67
	2	7,78	54,5	33,3	446,0	3,81	0,67
	3	7,83	53,6	32,5	451,1	3,99	0,67
	∅	7,96	54,1	32,7	445,5	3,92	0,67

4.2.3.3 Nährstoffaufnahme in den Spross

Die Nährstoffgehalte des Gerstensprosses gibt Anhang-Tab. 28 (S. 166) wieder.

Die **Stickstoffaufnahme** des Gerstensprosses war im Trend nach Luzerne stets höher als nach Wegwarte oder Rohrschwingel. Zum ersten sowie zum fünften Beprobungstermin waren die Unterschiede statistisch signifikant. Im Mittel betrug die Stickstoffaufnahme zur ersten Zeiternte 21 kg N ha⁻¹. Zur vierten Zeiternte wurde die höchste Aufnahme von im

Mittel 196 kg N ha^{-1} festgestellt. Die Gerste wies nach Luzerne eine höhere Stickstoffaufnahme in das Korn sowie in das Stroh auf als nach Wegwarte und Rohrschwengel. In das Korn wurden im Mittel der Varianten 112 kg N ha^{-1} aufgenommen. Die mittlere Stickstoffaufnahme in das Stroh betrug 13 kg N ha^{-1} (Tab. 20). Die Anbaudauer der Vorfrucht hatte zu keinem Zeitpunkt einen signifikanten Einfluss auf die Stickstoffaufnahme der Gerste.

Die **Phosphoraufnahme** war zum ersten Termin nach Luzerne höher als nach Wegwarte und Rohrschwengel. Im Durchschnitt betrug die Phosphoraufnahme zur ersten Beprobung 2 kg P ha^{-1} und erreichte zur vierten Zeiternte 40 kg P ha^{-1} . Im Mittel der Varianten wurden 25 kg P ha^{-1} in das Korn sowie 4 kg P ha^{-1} in das Stroh aufgenommen. Die Versuchsfaktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht beeinflussten weder die Aufnahmen in das Korn noch in das Stroh.

Die mittlere **Kaliumaufnahme** nahm von 20 kg K ha^{-1} zur ersten Zeiternte auf 300 kg K ha^{-1} zur fünften Zeiternte zu. Gerstenkorn und Gerstenstroh erreichten eine mittlere Kaliumaufnahme von 39 kg K ha^{-1} bzw. 55 kg K ha^{-1} . Die Versuchsfaktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht hatten zu Beginn der Vegetationsperiode einen tendenziellen Einfluss auf die Kaliumaufnahme. Im Trend wurde mehr Kalium nach Luzerne als nach Wegwarte und Rohrschwengel aufgenommen, und nach mehrjährig kultivierter Vorfrucht tendenziell mehr als nach einjährig kultivierter. Ein signifikanter Einfluss der Versuchsfaktoren wurde nicht festgestellt (Tab. 20).

In der Übersicht bestätigen die dargestellten Ergebnisse der Nährstoffaufnahme der Gerste nicht die Hypothesen 1 und 3. Im Unterschied dazu stehen einige Erhebungen im Einklang mit Hypothese 2.

Tab. 20: Nährstoffaufnahme in den Spross von Wintergerste zu den fünf Zeiternteterminen (17.02. - 01.06.2011) und im Erntegut in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Stufe des jeweiligen Versuchsfaktors. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Nährstoffaufnahme [kg N/P/K ha ⁻¹]								
		17.02.11	18.04.11	05.05.11	19.05.11	01.06.11	11.07.11	11.07.11		
		Spross	Spross	Spross	Spross	Spross	Korn	Stroh		
Stickstoff	Art	Lu	23,1 a	83,4	158,3	210,9	206,4 a	124,7 a	17,0 a	
		Ww	20,3 b	81,9	149,4	188,0	179,5 b	104,0 b	10,2 b	
		Rs	19,4 b	77,5	137,4	189,6	174,4 b	108,6 b	11,4 b	
	Dauer	1	20,1	72,9	136,2	196,3	166,5	114,2	13,2	
		2	21,0	83,9	152,9	212,2	196,8	109,2	12,3	
		3	21,7	85,7	156,0	179,2	198,1	114,8	12,9	
		∅	20,9	80,8	148,4	195,9	187,1	112,4	12,8	
	Phosphor	Art	Lu	2,7 a	15,1	29,1	38,0	37,2	24,9	3,6
			Ww	2,3 b	14,4	29,4	39,9	37,7	24,8	3,3
			Rs	2,3 b	13,7	28,4	41,2	37,8	26,2	4,0
Dauer		1	2,4	12,7	27,0	37,9	35,1	25,1	3,5	
		2	2,5	15,2	30,9	43,0	39,2	25,7	3,8	
		3	2,4	15,4	29,0	38,0	38,6	25,0	3,7	
		∅	2,4	14,4	28,9	39,6	37,7	25,3	3,7	
Kalium	Art	Lu	20,6	121,7	253,1	260,2	303,0	38,4	58,0	
		Ww	18,9	122,5	253,9	281,5	303,8	38,4	51,9	
		Rs	18,8	113,9	240,9	277,8	290,0	38,6	56,1	
	Dauer	1	17,4	100,0	235,0	246,4	285,0	41,4	57,9	
		2	20,5	121,5	266,1	306,6	308,0	37,2	53,3	
		3	20,5	135,3	246,8	265,6	305,9	37,8	54,8	
		∅	19,5	119,0	249,3	272,8	299,6	38,5	55,3	

4.2.3.4 Mineralischer Bodenstickstoff

Vier Wochen nach der mineralischen Stickstoffdüngung, die durch geringe Gaben nach Luzerne die Variantenunterschiede der N_{\min} -Menge im Boden ausgangs des Winters egalieren sollte (Bestandesführung von Wintergerste: S. 152), enthielt der Boden bis in eine Tiefe von 105 cm im Mittel 71,8 kg N_{\min} ha⁻¹. Bis Anfang Juni 2011 nahm die Menge von mineralischem Bodenstickstoff auf durchschnittlich 26,7 kg N_{\min} ha⁻¹ ab, und stieg bis zur Ernte wiederum im Mittel auf 45,6 kg N_{\min} ha⁻¹ (Anhang-Tab. 29, S. 167).

Zur ersten Beprobung war im Oberboden der Parzellen nach Luzerne eine geringere N_{\min} -Menge vorhanden als nach Wegwarte und Rohrschwengel, was vermutlich auf die geringere Stickstoffdüngergabe zurückzuführen ist. Im Unterschied dazu wurde mit fortschreitender Vegetationsperiode eine größere N_{\min} -Menge im Boden nach Luzerne gegenüber Wegwarte und Rohrschwengel festgestellt. Dieser Sachverhalt weist auf eine höhere Stickstoffnachlieferung aus noch vorhandenen Resten der Luzerne verglichen mit denen von Wegwarte und Rohrschwengel hin.

Während der Unterboden im April 2011 nach Luzerne eine höhere N_{\min} -Menge als nach Wegwarte und Rohrschwingel aufwies, nivellierten sich mit Fortschreiten der Vegetation die Unterschiede, so dass später keine im Zeitablauf konsistenten Variantenunterschiede in Abhängigkeit von der Vorfruchtart oder der Anbaudauer der Vorfrucht zu erkennen waren. Insgesamt bestätigen die Ergebnisse der N_{\min} -Untersuchungen Hypothese 2, wohingegen sie mit Hypothese 3 nicht im Einklang stehen.

4.2.4 Zweite Nachfrucht: Winterraps (2011)

4.2.4.1 Gaswechsel

Blattphotosyntheserate

Die Photosyntheserate der Rapsblätter nahm von Mitte April bis Mitte Juni 2011 von ca. $22 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ auf ca. $7 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ab. Die Werte wurden durch die Vorfruchtart nicht beeinflusst (Anhang-Tab. 30, S. 168). Aufgrund dieses Sachverhalts können die Hypothesen 1 und 2 nicht bestätigt werden.

Während der Raps zu den ersten drei Messterminen keine Beeinflussung der Blattphotosynthese durch die Anbaudauer der Vorfrucht zeigte, wurde zum Ende der Wachstumsperiode nach zweijähriger Vorfrucht eine höhere Blattphotosyntheserate als nach einjähriger ermittelt (Abb. 17). Der zum Wachstumsende erfasste Unterschied der Photosyntheserate des Rapses unterstützt analog zu der der ersten allorhizen Nachfrucht Malve die Hypothese 3.

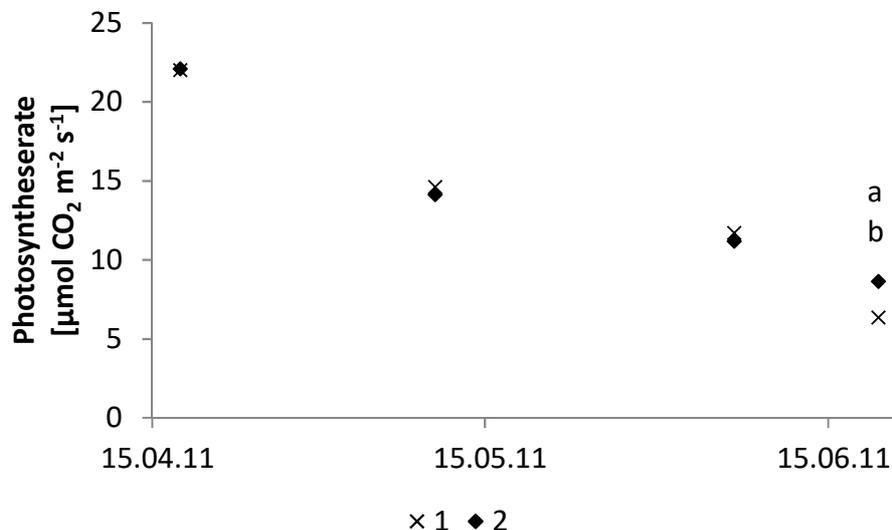


Abb. 17: Blattphotosyntheserate von Winterraps bezogen auf 1 m^2 Blattfläche in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht. Vier Messreihen (17.04. - 19.06.2011) im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Faktorstufe. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

Blatttranspirationsrate

Die Transpirationsrate der Rapsblätter betrug zum ersten und zweiten Messtermin $4,0 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ bzw. $4,4 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Zu den folgenden Messterminen wurden mit $2,5 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ bzw. $0,8 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ geringere Werte festgestellt. Die Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht beeinflussten die Transpirationsrate der Rapsblätter nicht (Anhang-Tab. 31, S. 168). Die Messergebnisse stehen somit nicht im Einklang mit den Hypothesen 1, 2 und 3.

4.2.4.2 Ertragsstruktur

Der **Kornertrag** des Winterrapses war nach Luzerne mit $4,4 \text{ t TM ha}^{-1}$ höher als nach Rohrschwengel mit $3,8 \text{ t TM ha}^{-1}$. Im Mittel aller Varianten betrug der Rapsertag $4,0 \text{ t TM ha}^{-1}$. Die Anbaudauer der Vorfrucht hatte keinen Einfluss auf den Kornertrag (Tab. 21).

Im Durchschnitt aller Varianten wurden $79.810 \text{ Körner/m}^2$ gebildet, wobei keine Beeinflussung durch die Vorfruchtvarianten auftrat.

Die **Tausendkornmasse** des Rapses war nach Luzerne höher als nach Wegwarte und Rohrschwengel. Im Mittel der Varianten betrug die Tausendkornmasse $5,0 \text{ g}$ (Tab. 21).

Die Ertragsstrukturparameter bestätigen teilweise die Hypothesen 1 und 2. Im Unterschied dazu unterstützen die Ergebnisse nicht Hypothese 3.

Tab. 21: Ertragsstruktur von Winterraps (2011) in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht im Versuch A. TKM: Tausendkornmasse. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Stufe des jeweiligen Versuchsfaktors. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Ertragsstruktur		
		Kornertrag	Anzahl	TKM
		[t TM ha ⁻¹]	Körner/m ²	[g]
Art	Lu	4,40 a	82.774	5,1 a
	Ww	3,80 ab	78.667	5,0 b
	Rs	3,78 b	77.988	5,0 b
Dauer	1	3,92	80.487	5,0
	2	3,78	78.814	5,0
	3	3,85	80.128	5,0
	∅	3,99	79.810	5,0

4.2.4.3 Nährstoffaufnahme in das Korn

Die Nährstoffgehalte des Rapskorns werden in Anhang-Tab. 32 (S. 168) wiedergegeben.

Die **Stickstoffaufnahme** des Rapskorns war nach Luzerne höher als nach Wegwarte und Rohrschwengel. Im Durchschnitt aller Varianten betrug die Stickstoffaufnahme 101 kg N ha^{-1} . Die Anbaudauer der Vorfrucht hatte keinen Einfluss auf die Stickstoffaufnahme des Rapskorns (Tab. 22).

Die mittlere **Phosphoraufnahme** in das Rapskorn betrug 23 kg P ha⁻¹. Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht hatten keinen Einfluss auf diesen Parameter.

Die **Kaliumaufnahme** des Korns war nach Luzerne höher als nach Rohrschwengel. Im Durchschnitt wurden 20 kg K ha⁻¹ in das Rapskorn aufgenommen. Die Anbaudauer der Vorfrucht hatte keinen Einfluss auf die Kaliumaufnahme (Tab. 22).

Die Nährstoffaufnahme ins Korn steht in Übereinstimmung mit den Hypothesen 1 und 2. Im Gegensatz dazu wird Hypothese 3 nicht bestätigt.

Tab. 22: Nährstoffaufnahme von Winterraps (2011) ins Korn in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Stufe des jeweiligen Versuchsfaktors. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Nährstoffaufnahme [kg N/P/K ha ⁻¹]		
		Stickstoff	Phosphor	Kalium
Art	Lu	116,9 a	24,4	21,4 a
	Ww	97,3 b	23,4	19,3 ab
	Rs	90,0 b	22,3	19,1 b
Dauer	1	100,0	22,8	19,5
	2	99,7	23,6	20,0
	3	104,5	23,8	20,4
	∅	101,4	23,4	19,9

4.2.5 Relativ-Erträge der zweiten Nachfrüchte Wintergerste und Winterraps

Der durchschnittliche, mithilfe des mittleren Kornertrags der jeweiligen Kultur (= 100 %) normierte Relativ-Ertrag der zweiten Nachfrüchte Wintergerste und Winterraps wurde weder von der Nachfruchtart noch von der Vorfruchtart oder der Anbaudauer der Vorfrucht beeinflusst (Tab. 23). Dieser Befund steht nicht im Einklang mit den Hypothesen 1 bis 4.

Tab. 23: Relativ-Ertrag im Jahr 2011 (gemittelt über die Kulturen Wintergerste und Winterraps) in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht im Versuch A. Keine signifikanten Unterschiede. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

Relativer Kornertrag im Jahr 2011 [%]					
Lu	Ww	Rs	1	2	3
98,8	99,4	101,8	102,0	97,6	100,8

4.2.6 Dritte Nachfrucht: Winterroggen (2012)

4.2.6.1 Ertragsstruktur

Der **Kornertrag** des Winterroggens betrug im Mittel aller Varianten 7,1 t TM ha⁻¹. Der Parameter unterlag keiner signifikanten Beeinflussung durch die Versuchsfaktoren (Tab. 24).

Im Mittel aller Varianten wurde eine **Tausendkornmasse** von 33,2 g erreicht. Es lag kein Einfluss der Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer vor.

Der Roggen bildete im Mittel 513 **Ähren/m²** mit durchschnittlich 41,9 **Körnern/Ähre**. Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht hatten keinen Einfluss auf Ährendichte und Kornzahl pro Ähre.

Der mittlere **Strohertrag** des Winterroggens betrug 8,4 t TM ha⁻¹ und der mittlere **Harvest-Index** 0,46. Beide Parameter wurden von den Versuchsfaktoren nicht beeinflusst (Tab. 24).

Die Ertragsstrukturparameter des Roggens bestätigen, ähnlich denen der zweiten Nachfrucht Gerste, nicht die Hypothesen 1, 2 und 3.

Tab. 24: Ertragsstruktur von Winterroggen (2012) in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht im Versuch A. TKM: Tausendkornmasse. Keine signifikanten Unterschiede. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Ertragsstruktur					
		Kornertrag [t TM ha ⁻¹]	TKM [g]	Anzahl Körner/Ähre	Anzahl Ähren/m ²	Strohertrag [t TM ha ⁻¹]	Harvest- Index
Art	Lu	7,34	33,8	40,2	519,4	8,55	0,46
	Ww	7,19	33,0	43,1	513,9	8,50	0,46
	Rs	6,91	33,0	41,9	504,2	8,24	0,45
Dauer	1	7,41	32,8	42,7	510,1	8,62	0,46
	2	6,93	33,9	40,0	514,2	8,23	0,46
	3	7,07	33,0	43,3	513,1	8,43	0,45
	Ø	7,14	33,2	41,9	512,5	8,43	0,46

4.2.6.2 Nährstoffaufnahme in den Spross

Nach Luzerne war die **Stickstoffaufnahme** in das Roggenkorn höher als nach Wegwarte und Rohrschwengel. Im Mittel der Varianten betrug die Stickstoffaufnahme 81 kg N ha⁻¹. Die mittlere Stickstoffaufnahme in das Stroh betrug 29 kg N ha⁻¹. Nach Luzerne wurden nur tendenziell höhere Werte als nach Wegwarte und Rohrschwengel festgestellt. Die Stickstoffaufnahmen in Stroh und Korn wurden von der Anbaudauer der Vorfrucht nicht beeinflusst (Tab. 25).

Die durchschnittliche **Phosphoraufnahme** in das Korn betrug 23 kg P ha⁻¹, in das Stroh 10 kg P ha⁻¹. Beide Parameter wurden von den Versuchsfaktoren nicht beeinflusst.

Das Korn wies eine mittlere **Kaliumaufnahme** von 39 kg K ha⁻¹ auf, das Stroh eine Kaliumaufnahme von 132 kg K ha⁻¹. In beiden Fällen wurde kein Einfluss der Versuchsfaktoren festgestellt (Tab. 25).

Die Stickstoffaufnahme ins Roggenkorn steht in Übereinstimmung mit Hypothese 2. Im Unterschied dazu bestätigen die weiteren Messergebnisse die Hypothesen 1, 2 und 3 nicht.

Tab. 25: Nährstoffaufnahme von Winterroggen (2012) in Korn und Stroh in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Stufe des jeweiligen Versuchsfaktors. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Nährstoffaufnahme [kg N/P/K ha ⁻¹]					
		Korn			Stroh		
Art		Stickstoff	Phosphor	Kalium	Stickstoff	Phosphor	Kalium
		Lu		90,9 a	23,2	39,5	33,4
Ww		77,2 b	23,2	39,4	27,8	10,4	132,1
Rs		75,6 b	22,0	38,5	26,0	9,5	127,3
Dauer		Stickstoff	Phosphor	Kalium	Stickstoff	Phosphor	Kalium
		1	80,9	22,6	39,7	28,7	9,7
2		78,1	22,7	38,1	26,6	9,7	128,6
3		84,7	23,2	39,8	32,2	10,3	135,1
∅		81,2	22,8	39,1	29,1	9,9	131,9

4.2.7 Dritte Nachfrucht: Winterraps (2012)

4.2.7.1 Sprossentwicklung und Gaswechsel

Sprosstrockenmasse

Zu allen Beprobungsterminen wiesen die Rapspflanzen nach Luzerne eine mindestens tendenziell höhere oberirdische Biomasse auf als nach Wegwarte und Rohrschwengel. An zwei Terminen waren die Unterschiede zwischen Raps nach Luzerne und Raps nach mindestens einer anderen Vorfrucht signifikant (Abb. 18). Aus diesem Grund wird Hypothese 1 nicht bestätigt. Im Unterschied dazu stehen die Ergebnisse im Einklang mit Hypothese 2.

Von Ende März bis Ende Mai nahm die Sprosstrockenmasse des Rapses von 2,8 t TM ha⁻¹ auf 9,8 – 12,9 t TM ha⁻¹ zu.

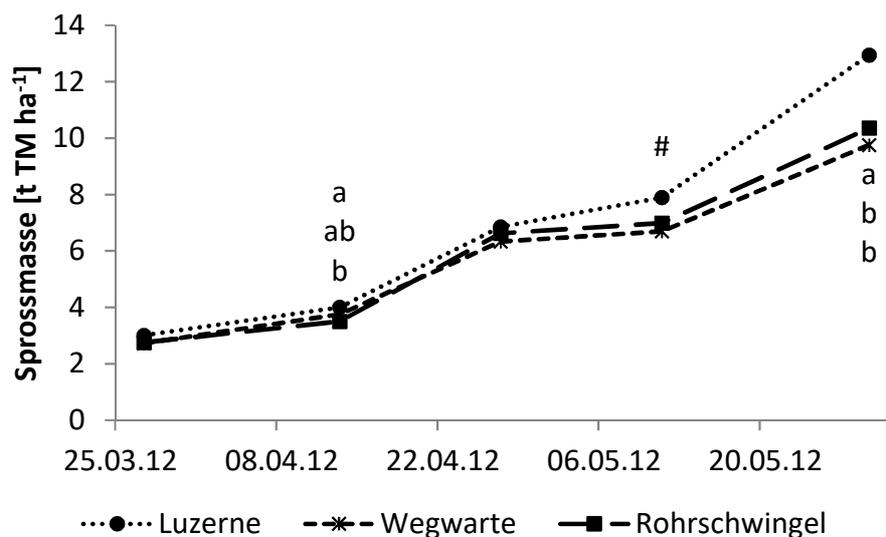


Abb. 18: Sprosstrockenmasse von Winterraps in Abhängigkeit von der Vorfruchtart. Fünf Zeiternten (27.03. - 29.05.2012) im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Faktorstufe. Das Zeichen # kennzeichnet eine Wechselwirkung der Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

Zur vierten Zeiternte trat eine signifikante Wechselwirkung zwischen den Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht auf. Im Vergleich der zweijährig angebauten Vorfrüchte wurde nach Luzerne eine höhere Rapssprossmasse festgestellt als nach Rohrschwengel (Tab. 26). Dieser Sachverhalt steht in Übereinstimmung mit den Hypothesen 1 und 2.

Tab. 26: Wechselwirkung der Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht beim Parameter Sprosstrockenmasse von Winterraps zur vierten Zeiternte (11.05.2012) im Versuch A. Unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede der Sprosstrockenmasse bei gleicher Anbaudauer der Vorfrucht in Abhängigkeit von der Vorfruchtart. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Sprosstrockenmasse [t TM ha ⁻¹]		
		Luzerne	Wegwarte	Rohrschwengel
Dauer	1	7,75	6,44	7,45
	2	8,53 A	6,94 AB	6,62 B
	3	8,37	7,51	7,73

Die Anbaudauer der Vorfrucht hatte mit Ausnahme der erwähnten Wechselwirkung keinen signifikanten Einfluss auf die Entwicklung der Sprosstrockenmasse des Rapses (Anhang-Tab. 34, S. 169). Dieses Ergebnis bestätigt Hypothese 3 nicht.

Blattflächenindex

Der Blattflächenindex des Rapses war nach Luzerne zu allen Beprobungsterminen generell höher als nach Wegwarte und Rohrschwengel. Zur vierten Zeiternte war der Unterschied signifikant (Abb. 19). Insgesamt war der BFI mit einem maximalen Wert von 2,4 niedriger als für ein optimales Wachstum erforderlich. Die Ergebnisse stehen nicht in Übereinstimmung mit Hypothese 1, während sie Hypothese 2 bestätigen.

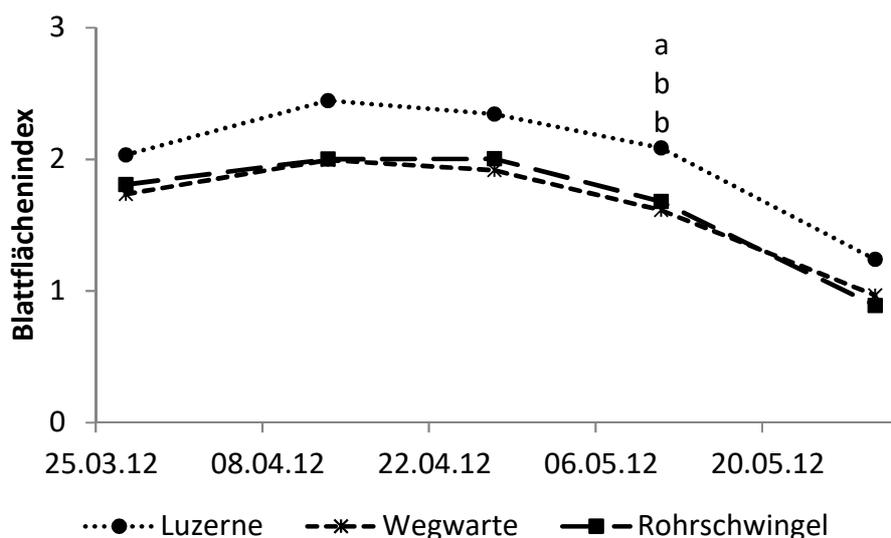


Abb. 19: Blattflächenindex von Winterraps in Abhängigkeit von der Vorfruchtart. Fünf Zeiternten (27.03. - 29.05.2012) im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Faktorstufe. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

Die Anbaudauer der Vorfrucht hatte keinen signifikanten Einfluss auf den Blattflächenindex des Rapses (Anhang-Tab. 35, S. 169). Hypothese 3 wird somit nicht unterstützt.

Sprosslänge

Nach Luzerne und Rohrschwingel wies der Raps zur ersten Zeiternte eine höhere Sprosslänge auf als nach Wegwarte. Dieser Unterschied nivellierte sich, aber zum Ende des Wachstums erreichte der Raps eine höhere finale Sprosslänge nach Luzerne als nach Wegwarte und Rohrschwingel (Abb. 20). Im Untersuchungszeitraum nahm die Sprosslänge von 27 cm auf 111 cm zu. Von der vierten zur fünften Zeiternte wurde keine Veränderung mehr festgestellt. Die Ergebnisse stehen nicht im Einklang mit Hypothese 1, wohingegen Hypothese 2 bestätigt wird.

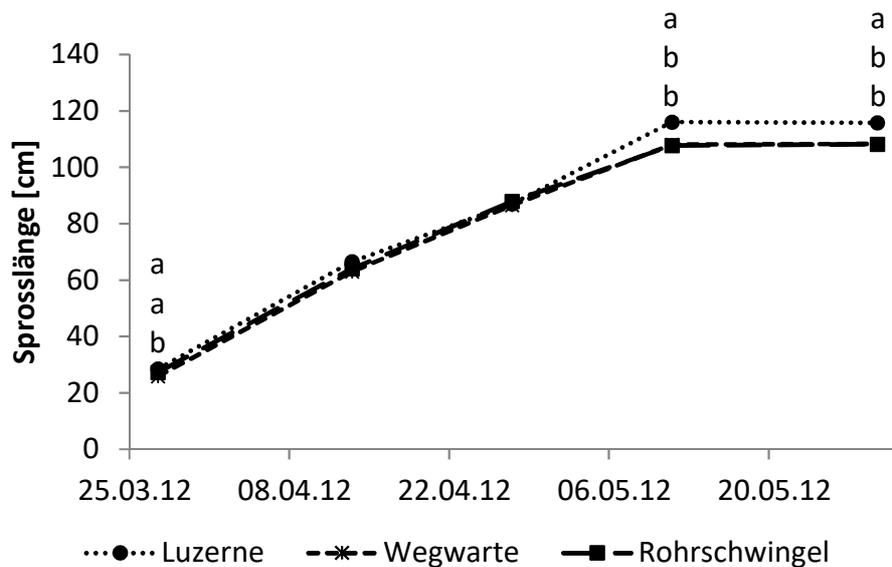


Abb. 20: Sprosslänge von Winterraps in Abhängigkeit von der Vorfruchtart. Fünf Zeiternten (27.03. - 29.05.2012) im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Faktorstufe. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

Die Anbaudauer der Vorfrucht hatte dagegen keinen Einfluss auf die Sprosslänge des Rapses (Anhang-Tab. 36, S. 170). Dieser Umstand unterstützt nicht Hypothese 3.

SPAD-Value

Der Faktor Vorfruchtart hatte nur in Wechselwirkung mit dem Faktor Anbaudauer der Vorfrucht einen Einfluss auf den *SPAD-Value* der Rapsblätter (Anhang-Tab. 37, S. 170). Zur vierten Zeiternte war der *SPAD-Value* des Rapses im Vergleich der zweijährigen Vorfrüchte nach Wegwarte höher als nach Rohrschwingel (Tab. 27).

Tab. 27: Wechselwirkung der Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht beim Parameter *SPAD-Value* von Winterraps zur vierten Zeiternte (11.05.2012) im Versuch A. Unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bei gleicher Anbaudauer der Vorfrucht in Abhängigkeit von der Vorfruchtart. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		<i>SPAD-Value</i>		
		Luzerne	Wegwarte	Rohrschwingel
Dauer	1	55,1	53,2	51,9
	2	53,7 AB	56,7 A	50,9 B
	3	55,0	52,3	54,1

Zudem wurde zum dritten Messtermin ein signifikanter Einfluss der Anbaudauer der Vorfrucht festgestellt. Nach zweijähriger Vorfrucht wurden höhere Messwerte als nach ein- und dreijährigem Anbau erfasst. Ein entsprechender Trend trat an den übrigen Messterminen jedoch nicht auf (Abb. 21). Die Ergebnisse der *SPAD-Value*-Messungen an Rapsblättern stehen nicht im Einklang mit den Hypothesen 1, 2 und 3.

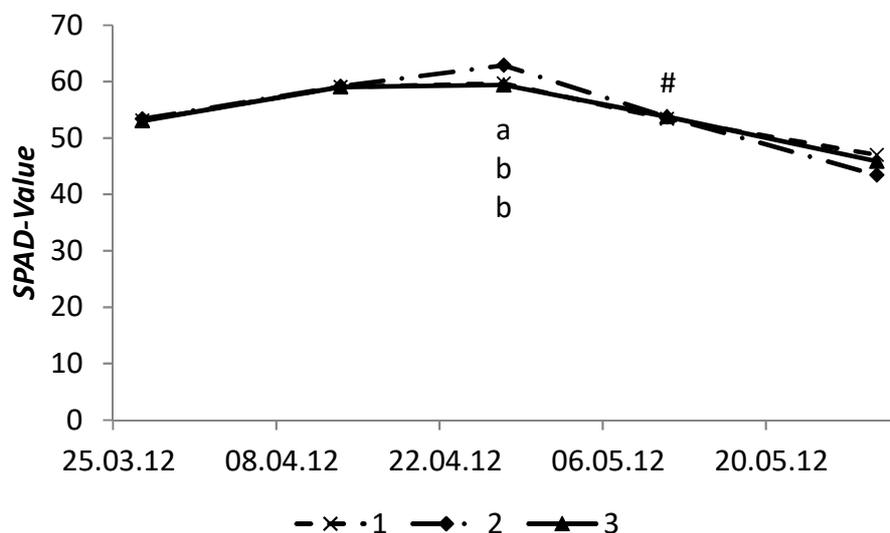


Abb. 21: *SPAD-Value* von Winterraps in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrüchte. Fünf Messungen (27.03. - 29.05.2012) im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Faktorstufe. Das Zeichen # kennzeichnet eine Wechselwirkung der Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

Blattphotosyntheserate

Die Photosyntheserate der Rapsblätter nahm von der ersten bis zur vierten Messung von ca. $19 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ auf ca. $9 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ab. Zur fünften Messreihe waren nur noch an Rapspflanzen, die nach Luzerne wuchsen, hinreichend große Blätter für die Messungen vorhanden. Aus diesem Grund konnte die zweifaktorielle Auswertung der Daten nur für die ersten vier Messtermine erfolgen. Dabei wurde kein Einfluss der Versuchsfaktoren festgestellt (Anhang-Tab. 38, S. 171). Die Messergebnisse bestätigen die Hypothesen 1, 2 und 3 nicht. Einzige Ausnahme ist die beobachtete längere Blattflächendauer von Winterraps nach Luzerne verglichen mit Raps nach Wegwarte und Rohrschwingel.

Bestandes-Blattphotosyntheserate

Erste Schätzung

Im Trend war die Bestandesphotosyntheserate von Winterraps nach Luzerne wiederholt höher als nach Wegwarte und Rohrschwengel. Zum vierten Messtermin war der Unterschied signifikant (Abb. 22). Im Verlauf der Messreihe nahm die Bestandesphotosyntheserate von ca. $37 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ auf etwas über $0 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ab. Die Ergebnisse der Bestandesphotosyntheserate-Messung bestätigen Hypothese 1 nicht. Im Unterschied dazu unterstützen sie Hypothese 2.

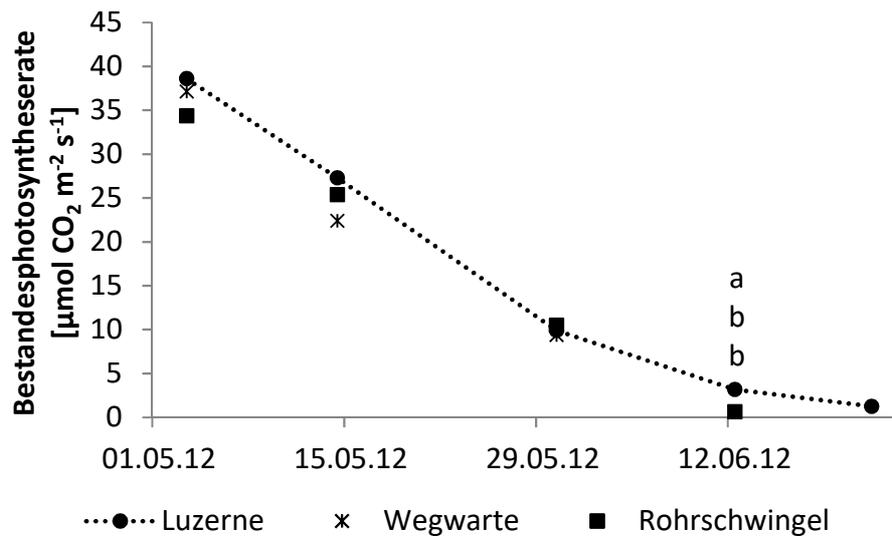


Abb. 22: Bestandes-Blattphotosyntheserate von Winterraps bezogen auf 1 m^2 Bodenfläche in Abhängigkeit von der Vorfruchtart. Fünf (nach Luzerne) bzw. vier (nach Wegwarte und Rohrschwengel) Messreihen (03.05. - 22.06.2012 bzw. 03.05. - 12.06.2012) im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Faktorstufe. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

Im Unterschied zur Vorfruchtart hatte die Anbaudauer der Vorfrucht keinen Einfluss auf die Bestandesphotosynthese (Anhang-Tab. 39, S. 171). Dieser Sachverhalt bestätigt nicht Hypothese 3.

Optimierte Schätzung

Das Ergebnis der optimierten Schätzung der Bestandesphotosynthese entspricht im generellen Verlauf und in der Abstufung der einzelnen Datenreihen untereinander weitgehend dem Ergebnis der ersten Schätzung. Allerdings erreichten die absoluten Werte nur ca. 50 % der nach der ersten Methode berechneten Werte. Die Bestandesphotosyntheserate betrug zum ersten Termin nach der optimierten Schätzung nur ca. $20 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ und nahm dann analog zur ersten Schätzmethode auf etwas über $0 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ zum vierten bzw. fünften Messtermin ab. Zum vierten Messtermin wurde auch mit der optimierten Schätzmethode eine höhere Bestandesphotosynthese nach Luzerne als nach Wegwarte und Rohrschwengel ermittelt (Abb. 23). Die optimierte Schätzung der Bestandesphotosynthese kann, analog zur ersten Schätzung, Hypothese 1 nicht bestätigen. Im Unterschied dazu wird Hypothese 2 teilweise unterstützt.

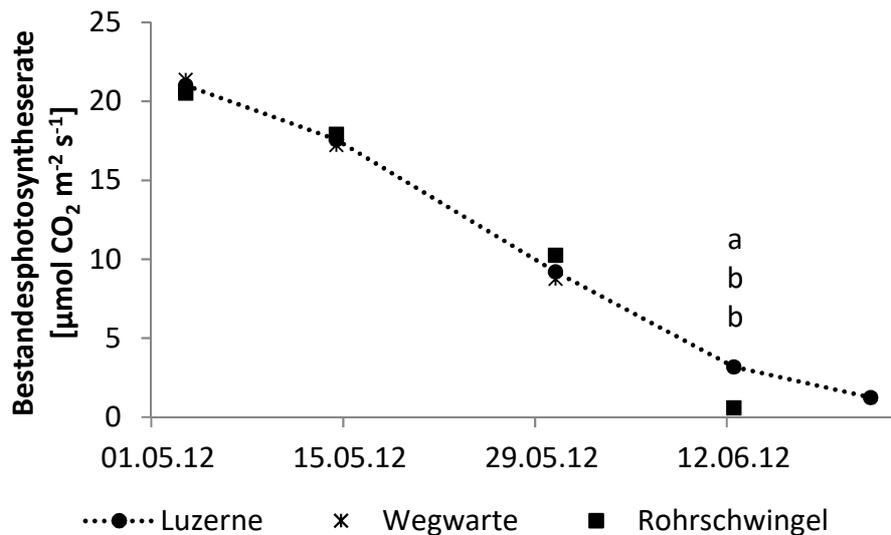


Abb. 23: Bestandes-Blattphotosyntheserate von Winterraps bezogen auf 1 m² Bodenfläche nach optimierter Schätzung in Abhängigkeit von der Vorfruchtart. Fünf (nach Luzerne) bzw. vier (nach Wegwarte und Rohrschwingel) Messreihen (03.05. - 22.06.2012 bzw. 03.05. - 12.06.2012) im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Faktorstufe. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

Analog zu den Ergebnissen der ersten Schätzmethode wurde auch mit der verbesserten Schätzung keine Beeinflussung der Bestandesphotosyntheserate in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht festgestellt (Anhang-Tab. 40, S. 171). Daher unterstützen die Ergebnisse der optimierten Schätzung der Bestandesphotosynthese nicht Hypothese 3.

Blatttranspirationsrate

Die mittlere Transpirationsrate der Rapsblätter nahm von der ersten bis zur dritten Messung von 2,3 mmol H₂O m⁻² s⁻¹ auf 3,7 mmol H₂O m⁻² s⁻¹ zu. Anschließend nahm die Rate auf 2,8 mmol H₂O m⁻² s⁻¹ zur vierten Messung ab. Eine fünfte Messung konnte wie im Abschnitt zur Photosyntheserate erwähnt nur an Rapspflanzen nach Luzerne durchgeführt werden (1,7 mmol H₂O m⁻² s⁻¹), da in den übrigen Varianten keine Rapsblätter in der benötigten Größe mehr vorhanden waren.

Die Vorfruchtart hatte zu den vier Terminen der vollständigen Messreihen keinen signifikanten Einfluss auf die Blatttranspirationsrate des Rapses. Tendenziell waren die Werte nach Luzerne zunächst niedriger, später höher als nach den anderen Vorfrüchten Wegwarte und Rohrschwingel. Die Anbaudauer der Vorfrucht hatte keinen Einfluss auf die Transpirationsrate (Anhang-Tab. 41, S. 172). Die Ergebnisse der Transpirationsratenmessungen stehen nicht im Einklang mit den Hypothesen 1, 2 und 3.

Bestandes-Blatttranspirationsrate

Erste Schätzung

Die Bestandestranspirationsrate des Rapses nach Luzerne war bei fortschreitender Seneszenz der Bestände höher als nach Wegwarte und Rohrschwingel. Zum vierten Termin waren die Unterschiede signifikant (Abb. 24). Die Transpirationsrate nahm vom ersten Messtermin mit 4,5 mmol H₂O m⁻² s⁻¹ bis zum zweiten Messtermin zunächst zu und danach

bis zum vierten bzw. fünften Messtermin auf etwas über $0 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ab. Die Ergebnisse bestätigen Hypothese 1 nicht. Sie stehen jedoch im Einklang mit Hypothese 2.

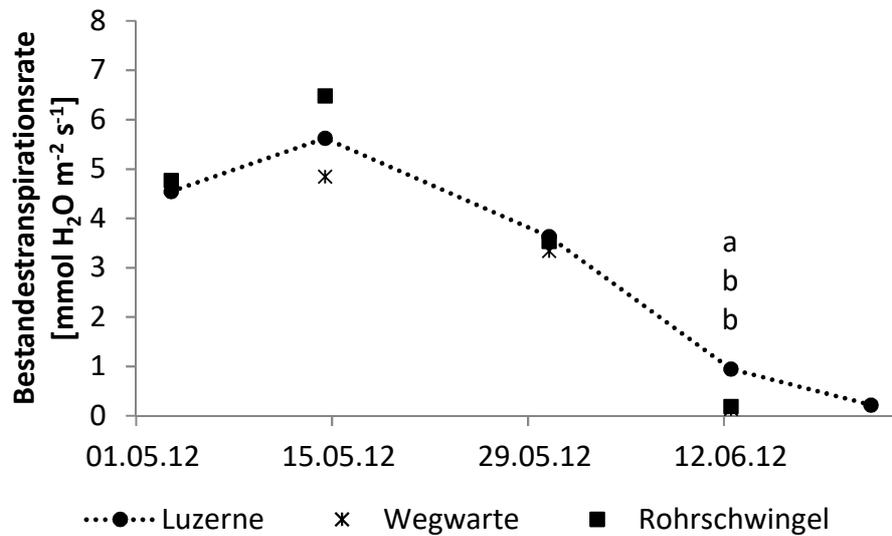


Abb. 24: Bestandes-Blatttranspirationsrate von Winterraps bezogen auf 1 m^2 Bodenfläche in Abhängigkeit von der Vorfruchtart. Fünf (nach Luzerne) bzw. vier (nach Wegwarte und Rohrschwingel) Messreihen (03.05. - 22.06.2012 bzw. 03.05. - 12.06.2012) im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Faktorstufe. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

Im Unterschied dazu hatte die Anbaudauer der Vorfrucht zu keinem Termin einen Einfluss auf die Transpirationsrate des Rapsbestandes (Anhang-Tab. 42, S. 172). Aus diesem Grund wird Hypothese 3 nicht bestätigt.

Optimierte Schätzung

Für den ersten Messtermin ergab die optimierte Schätzung eine mittlere Bestandestranspirationsrate des Winterrapses von $4,0 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Nach einer Zunahme der Bestandestranspirationsrate zum zweiten Termin ging sie anschließend bis zum vierten bzw. fünften Termin zurück. An allen Terminen lagen die mittleren Ergebnisse der optimierten Schätzung maximal 15 % unter den jeweiligen Werten der ersten Schätzung. Im Unterschied zur optimierten Schätzung der Bestandesphotosyntheserate ergaben sich somit deutlich geringere Abweichungen zwischen der ersten und der optimierten Schätzung der Bestandestranspirationsrate. Analog zu den Ergebnissen der ersten Methode ergab die Schätzung zum vierten Termin nach Luzerne eine höhere Bestandestranspiration als nach Wegwarte und Rohrschwingel (Abb. 25).

Sowohl die erste als auch die optimierte Schätzung der Bestandesphotosyntheserate und der Bestandestranspirationsrate unterstützen nicht Hypothese 1. Im Unterschied dazu wird Hypothese 2 bestätigt.

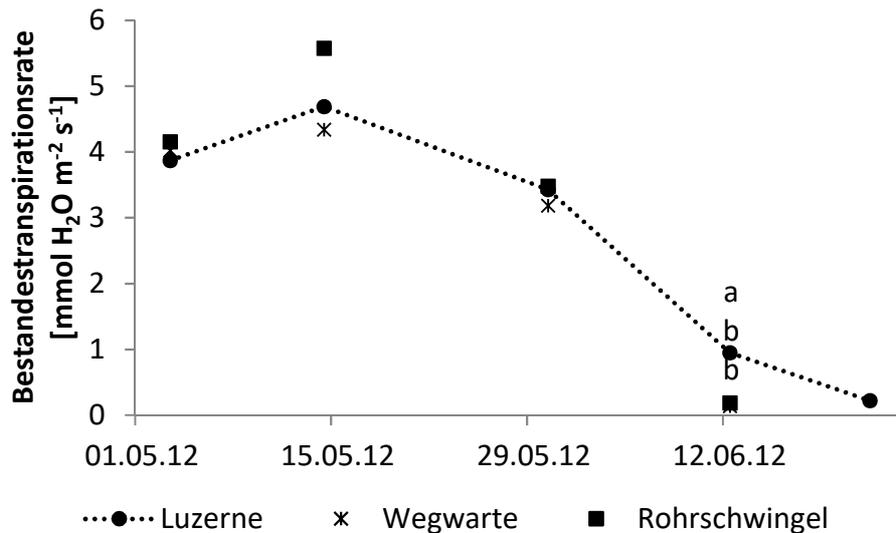


Abb. 25: Bestandes-Blatttranspirationsrate von Winterraps bezogen auf 1 m² Bodenfläche nach optimierter Schätzung in Abhängigkeit von der Vorfruchtart. Fünf (nach Luzerne) bzw. vier (nach Wegwarte und Rohrschwingel) Messreihen (03.05. - 22.06.2012 bzw. 03.05. - 12.06.2012) im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Faktorstufe. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

Nach den Ergebnissen der optimierten Schätzung hatte die Anbaudauer der Vorfrucht, übereinstimmend mit den Ergebnissen der ersten Schätzmethode, keinen Einfluss auf die Transpiration des Rapsbestandes (Anhang-Tab. 43, S. 172). Aus diesem Grund wird Hypothese 3 nicht bestätigt.

4.2.7.2 Ertragsstruktur

Der **Kornertrag** des Winterrapses war nach Luzerne mit 2,8 t TM ha⁻¹ höher als nach Wegwarte mit 2,5 t TM ha⁻¹ und Rohrschwingel mit 2,6 t TM ha⁻¹. Mehrjähriger Anbau der Vorfrüchte führte zu einem tendenziell höheren Kornertrag als einjähriger Anbau. Im Mittel aller Varianten betrug der Kornertrag 2,6 t TM ha⁻¹.

Der Rapsertag 2012 war deutlich geringer als der des Vorjahres. Hauptgrund dafür war eine starke Spätinfektion der Bestände mit Grauschimmel (*Botrytis cinerea* PERS.), der einen Großteil der Schoten im oberen Drittel der Pflanzen massiv schädigte.

Die **Anzahl Körner/m²** war nach Luzerne höher als nach Wegwarte. Im Durchschnitt wurden 54.280 Körner/m² geerntet. Mit steigender Anbaudauer der Vorfrucht stieg die Anzahl der Körner tendenziell an.

Nach Luzerne wurde eine höhere **Tausendkornmasse** erreicht als nach Wegwarte. Die mittlere TKM betrug 4,9 g. Die Anbaudauer der Vorfrucht hatte keinen Einfluss auf die Tausendkornmasse (Tab. 28).

Die Ertragsstrukturparameter stehen nicht im Einklang mit Hypothese 1. Im Unterschied dazu bestätigen sie Hypothese 2. Für Hypothese 3 wurde eine tendenzielle Übereinstimmung festgestellt.

Tab. 28: Ertragsstruktur von Winterraps (2012) in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht im Versuch A. TKM: Tausendkornmasse. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Stufe des jeweiligen Versuchs-faktors. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Ertragsstruktur		
		Kornertrag	Anzahl	TKM
		[t TM ha ⁻¹]	Körner/m ²	[g]
Art	Lu	2,84 a	57.708 a	4,9 a
	Ww	2,49 b	51.733 b	4,8 b
	Rs	2,57 b	53.222 ab	4,9 ab
Dauer	1	2,41	49.588	4,9
	2	2,72	55.498	4,9
	3	2,76	56.972	4,9
	∅	2,64	54.280	4,9

4.2.7.3 Nährstoffaufnahme in den Spross

Die Nährstoffgehalte im Rapsspross sind in Anhang-Tab. 44 (S. 173) aufgeführt.

In den Zeiternten wurde festgestellt, dass die **Stickstoffaufnahme** in den Rapsspross nach Luzerne zumeist signifikant höher war als nach Wegwarte und Rohrschwengel. Die mittlere Stickstoffaufnahme betrug zur ersten Zeiternte 104 kg N ha⁻¹. Bereits zur dritten Beprobung wurde mit einer Aufnahme von im Mittel 161 kg N ha⁻¹ der höchste Wert im Untersuchungszeitraum ermittelt. Die in den Zeiternten gefundene Abstufung wurde auch bei der Analyse des Kornes festgestellt. Nach Luzerne wurde eine höhere Stickstoffaufnahme in das Korn ermittelt als nach Wegwarte und Rohrschwengel. Tendenziell wurde nach mehrjährigem Anbau der Vorfrüchte mehr Stickstoff in den Spross aufgenommen als nach einjährigem. Im Mittel der Varianten wurden 64 kg N ha⁻¹ in das Korn aufgenommen (Tab. 29).

Die **Phosphoraufnahme** war nach Luzerne höher als nach Wegwarte und Rohrschwengel. In mehreren Zeiternten waren die Unterschiede signifikant. Die Phosphoraufnahme stieg von 14 kg P ha⁻¹ zur ersten Zeiternte auf 42 kg P ha⁻¹ zur fünften Beprobung. Analog zu den letzten Zeiternten wurde nach Luzerne verglichen mit Wegwarte und Rohrschwengel eine höhere Phosphoraufnahme ins Korn festgestellt. Die durchschnittliche Phosphoraufnahme in das Korn betrug 16 kg P ha⁻¹. Mehrjährig kultivierte verglichen mit einjährig kultivierter Vorfrucht führte tendenziell zu höheren Phosphoraufnahmen.

Analog zur Phosphoraufnahme war auch die **Kaliumaufnahme** des Rapses nach Luzerne höher als nach Wegwarte und Rohrschwengel. Zu mehreren Zeiternten waren die Unterschiede signifikant. Der Raps hatte bis zur ersten Zeiternte im Mittel 99 kg K ha⁻¹ aufgenommen, und bis zur fünften Zeiternte 211 kg K ha⁻¹. Analog zu den Befunden der Sprossuntersuchungen war die Kaliumaufnahme in das Rapskorn nach Luzerne höher als nach Wegwarte. Die Kaliumaufnahme stieg tendenziell mit zunehmender Anbaudauer der

Vorfrucht. Die Kaliumaufnahme ins Korn betrug im Mittel aller Varianten 14 kg K ha^{-1} (Tab. 29).

Die Nährstoffaufnahme in den Rapsspross bestätigt Hypothese 1 nicht. Die Ergebnisse stehen jedoch in Übereinstimmung mit Hypothese 2. Im Trend bestätigen die Ergebnisse Hypothese 3, jedoch sind signifikante Abstufungen in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht nicht gegeben.

Tab. 29: Nährstoffaufnahme in den Spross von Winterraps zu den fünf Zeiternteterminen (27.03. - 29.05.2012) und im Erntegut in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Stufe des jeweiligen Versuchsfaktors. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Nährstoffaufnahme [kg N/P/K ha^{-1}]						
		27.03.12	13.04.12	27.04.12	11.05.12	29.05.12	10.07.12	
		Spross	Spross	Spross	Spross	Spross	Korn	
Stickstoff	Art	Lu	116,0 a	150,7 a	183,1 a	190,1 a	186,3 a	74,2 a
		Ww	95,9 b	126,6 b	145,9 b	127,8 b	122,8 b	58,9 b
		Rs	99,9 b	131,8 ab	152,6 b	136,5 b	131,8 b	59,1 b
	Dauer	1	97,6	143,6	158,9	136,5	142,7	58,3
		2	106,3	131,2	160,4	157,3	140,5	66,2
		3	107,1	139,1	162,4	160,6	156,2	67,7
		∅	103,7	137,9	160,6	151,5	146,5	64,1
Phosphor	Art	Lu	15,9 a	23,3	31,7 a	40,7 a	49,3 a	17,8 a
		Ww	13,4 b	20,7	27,5 b	33,4 b	37,2 b	15,7 b
		Rs	13,9 ab	19,9	29,3 ab	34,6 b	40,4 ab	15,8 b
	Dauer	1	13,5	20,5	28,5	34,2	42,4	15,2
		2	14,7	21,0	30,6	35,4	40,9	17,3
		3	14,9	22,7	29,9	39,0	43,4	16,8
		∅	14,4	21,4	29,7	36,2	42,3	16,4
Kalium	Art	Lu	109,2 a	144,1	209,8 a	221,5 a	250,4 a	15,7 a
		Ww	91,5 b	130,8	170,5 b	178,9 b	187,6 b	13,4 b
		Rs	96,7 ab	128,4	181,8 b	183,7 b	198,4 b	14,0 ab
	Dauer	1	92,3	133,3	174,8	183,1	205,9	13,2
		2	101,6	134,9	203,2	191,4	209,1	14,9
		3	103,0	136,8	187,3	209,6	218,8	14,7
		∅	99,0	135,0	188,4	194,7	211,3	14,4

4.2.7.4 Mineralischer Bodenstickstoff

Der Boden bis 105 cm Tiefe enthielt Ende Januar 2012 im Mittel der Varianten 29,6 kg N_{min} ha⁻¹ mit nur geringen Variantenunterschieden. Bis zur zweiten Beprobung nahm die N_{min}-Menge im Boden nach einer in allen Varianten einheitlichen Stickstoffdüngung auf durchschnittlich 150,4 kg N_{min} ha⁻¹ zu. Bis Anfang Juni reduzierte sich die mittlere N_{min}-Menge im Boden auf 26,1 kg N_{min} ha⁻¹ und nahm bis zur Ernte wiederum auf 42,5 kg N_{min} ha⁻¹ zu (Anhang-Tab. 45, S. 174). Die Entwicklung der N_{min}-Menge im Boden war zumeist variantenunabhängig. Nur vereinzelt, wie Anfang April, wurde nach Luzerne eine höhere N_{min}-Menge festgestellt als nach Wegwarte und Rohrschwengel. Die Kulturdauer der Vorfrüchte hatte keinen im Zeitablauf einheitlichen Einfluss auf die N_{min}-Menge im Boden. Allerdings wurde Mitte März, zur Zeit der höchsten in diesem Jahr gemessenen N_{min}-Menge im Boden, nach mehrjähriger Vorfrucht eine tendenziell höhere N_{min}-Menge gefunden als nach einjähriger (Anhang-Tab. 45, S. 174). Im Trend werden somit Hypothese 2 und Hypothese 3 bestätigt.

4.2.8 Relativ-Erträge der dritten Nachfrüchte Winterroggen und Winterraps

Der durchschnittliche, mithilfe des mittleren Kornertrags der jeweiligen Kultur (= 100 %) normierte Relativ-Ertrag der dritten Nachfrüchte Winterroggen und Winterraps war nach Luzerne höher als nach Wegwarte und Rohrschwengel (Tab. 30). Dieser Sachverhalt bestätigt Hypothese 1 nicht. Die Ergebnisse unterstützen jedoch Hypothese 2.

Tab. 30: Relativ-Ertrag im Jahr 2012 (gemittelt über die Kulturen Winterroggen und Winterraps) im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Relativerträgen in Abhängigkeit von der Stufe des jeweiligen Versuchsfaktors. Das Zeichen # kennzeichnet eine Wechselwirkung der Faktoren Nachfruchtart (Winterroggen und Winterraps) und Anbaudauer der Vorfrucht. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

Relativer Kornertrag im Jahr 2012 [%]					
Lu	Ww	Rs	1	2	3
104,8 a	97,8 b	97,3 b	98,0 #	100,5 #	101,7 #

Es wurde eine Wechselwirkung zwischen den Faktoren Nachfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht festgestellt. Während der Raps nach Lu 2 einen höheren relativen Kornertrag erbrachte als der Roggen, wurde nach Ww 1 ein höherer relativer Kornertrag des Roggens festgestellt (Tab. 31). Dieser Sachverhalt steht nicht im Einklang mit Hypothese 3 und Hypothese 4.

Tab. 31: Wechselwirkung der Faktoren Nachfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht beim Parameter relativer Kornertrag im Jahr 2012 (gemittelt über die Kulturen Winterroggen und Winterraps) im Versuch A. Unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede des Relativertrags in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

	Relativer Kornertrag im Jahr 2012 [%]			
	Winterroggen		Winterraps	
Lu 1	109,9		98,6	
Lu 2	97,4	B	115,3	A
Lu 3	101,0		107,8	
Ww 1	102,4	A	86,1	B
Ww 2	100,3		97,0	
Ww 3	99,4		102,0	
Rs 1	97,4		88,7	
Rs 2	94,0		99,8	
Rs 3	97,2		102,2	

4.2.9 Übersicht der Sprossentwicklung, des Gaswechsels und der Ertragsbildung der Nachfrüchte

An den sechs Kulturen der dreijährigen Nachfruchtphase wurden durch Zeiternten, Gaswechselformen und Ertragserhebungen insgesamt 74 Einzel- und Zeitreihenuntersuchungen vorgenommen. Bei 40 davon trat eine signifikante Hauptwirkung des Faktors Vorfruchtart auf, wohingegen der Faktor Anbaudauer der Vorfrucht nur neun Untersuchungen in Hauptwirkung beeinflusste. Bei zehn Untersuchungen traten signifikante Wechselwirkungen zwischen den Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht auf (Tab. 32).

Tab. 32: Anzahl bzw. Anteil von Ergebnissen, die von den Versuchsfaktoren in Haupt- bzw. Wechselwirkung beeinflusst wurden. Bei gleichzeitiger Beeinflussung einer Untersuchung durch beide Versuchsfaktoren in Hauptwirkung wurde diese für beide Kategorien gezählt. Wenn bei Zeitreihenuntersuchungen die Daten in Abhängigkeit des Termins teils in Haupt-, teils in Wechselwirkung von den Versuchsfaktoren beeinflusst wurden, wurde die Untersuchung ebenfalls für beide Kategorien gezählt. NF: Nachfrucht, SW: Sommerweizen, FM: Futtermalve, WG: Wintergerste, Ra 11: Winterraps 2011, WR: Winterroggen, Ra 12: Winterraps 2012.

	Anzahl bzw. Anteil von signifikant beeinflussten Ergebnissen						
	1. NF 2010		2. NF 2011		3. NF 2012		Σ
	SW	FM	WG	Ra 11	WR	Ra 12	
Anzahl erhobener Parameter	16	10	17	8	9	14	74
davon beeinflusst durch Vorfrucht (abs.)	8	8	6	4	1	11	38
davon beeinflusst durch Vorfrucht (rel.) [%]	50,0	80,0	35,3	50,0	11,1	78,6	51,4
davon beeinflusst durch Anbaudauer (abs.)	5	2	0	1	0	1	9
davon beeinflusst durch Anbaudauer (rel.) [%]	31,3	20,0	0,0	12,5	0,0	7,1	12,2
davon mit Wechselwirkungen (abs.)	7	1	0	0	0	2	10
davon mit Wechselwirkungen (rel.) [%]	43,8	10,0	0,0	0,0	0,0	14,3	13,5

Die 38 signifikant durch den Faktor Vorfruchtart beeinflussten Untersuchungen umfassten mehrere Zeitreihenuntersuchungen, bei denen die Daten zu mindestens zwei Terminen durch den Faktor Vorfrucht beeinflusst waren. Aufgrund dessen belief sich die Zahl der signifikanten Hauptwirkungen des Faktors Vorfruchtart auf 53 (bei mehrfacher identischer Beeinflussung von Zeitreihenparametern nur einfache Zählung). Signifikante Hauptwirkungen des Faktors Vorfruchtart wurden in allen drei Nachfruchtjahren festgestellt. Auffällig ist, dass in jedem Nachfruchtjahr der relative Anteil der durch die Vorfrucht beeinflussten Untersuchungsergebnisse der allorhizen Kultur verglichen mit denen der homorhizen Kultur höher war. Dieser Umstand unterstützt Hypothese 4.

Der Faktor Anbaudauer der Vorfrucht hatte einen deutlich geringeren Einfluss auf die Kulturen der Nachfruchtphase. Bei allen Zeitreihenuntersuchungen, die jeweils drei bis sechs Messreihen umfassten, wurden die Messwerte zu maximal einem Termin von der Anbaudauer der Vorfrucht beeinflusst. Aus diesem Grund waren die Anzahl der beeinflussten Untersuchungen und die Anzahl der Hauptwirkungen gleich. Die Wirkung des Faktors Anbaudauer konzentrierte sich sowohl in Form der Hauptwirkung als auch in Wechselwirkung mit dem Faktor Vorfruchtart auf das erste Nachfruchtjahr. Von den neun (Anbaudauer als Hauptwirkung) bzw. zehn (Anbaudauer in Wechselwirkung mit Vorfruchtart) beeinflussten Datensätzen stammten sieben bzw. acht aus Untersuchungen an den Kulturen des ersten Nachfruchtjahres.

An Beständen der allorhizen Nachfrüchte Futtermalve, Raps 2011 und Raps 2012 wurden insgesamt 32 Parameter, und an den homorhizen Nachfrüchten Sommerweizen, Wintergerste und Winterroggen zusammen 42 Parameter erhoben. Die Ergebnisüberschau (Tab. 32) zeigt, dass dennoch bei den allorhizen Nachfrüchten häufiger (27) eine signifikante Hauptwirkung eines Versuchsfaktors festgestellt wurde als bei den homorhizen Nachfrüchten (20). Der Faktor Vorfruchtart beeinflusste insgesamt 23 Parameter der allorhizen Nachfrüchte und 15 der homorhizen. Die Anbaudauer der Vorfrucht beeinflusste Parameter aller allorhizen Nachfrüchte, wohingegen von den homorhizen Nachfrüchten nur Parameter der ersten Nachfrucht Sommerweizens zeichneten. Die stärkere Reaktion der allorhizen Nachfrüchte auf den Faktor Anbaudauer der Vorfrucht unterstützt ebenfalls Hypothese 4.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Vorfruchteffekte die ersten Nachfrüchte Sommerweizen und Futtermalve markant beeinflussten. An den zweiten Nachfrüchten Wintergerste und Winterraps sowie an den dritten Nachfrüchten Winterroggen und Winterraps wurden jeweils geringe Effekte von Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht festgestellt. Die Vorfruchteffekte zeigten sich bis ins dritte Nachfruchtjahr deutlicher an den allorhizen Nachfrüchten als an den homorhizen Nachfrüchten.

Die 62 Hauptwirkungen der Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht wiesen insgesamt zwölf unterschiedliche Signifikanzabstufungen auf. Davon wurden in 21 Fällen nach Luzerne signifikant höhere Messwerte als nach Wegwarte und Rohrschwengel erhoben. In jeweils neun weiteren Fällen wurden nach Luzerne intensivere Merkmalsausprägungen

festgestellt als nach Wegwarte oder als nach Rohrschwengel. Zusätzlich wurden bei drei Nachfruchtparametern nach Luzerne und einer weiteren Vorfrucht stärkere Merkmalsausprägungen als nach der jeweils verbleibenden Nachfrucht gemessen. Im Gegensatz dazu wurden in den verbleibenden elf signifikant von der Vorfruchtart beeinflussten Untersuchungen nicht nach Luzerne die höchsten Messwerte festgestellt, sondern teilweise nach Wegwarte, teilweise nach Rohrschwengel (Tab. 33). Es ist von besonderer Bedeutung, dass nur in einem einzigen Fall nach Wegwarte ein Hinweis auf einen verglichen mit Rohrschwengel vitaleren Nachfruchtbestand erfasst wurde (1. Termin Bestandesphotosyntheserate von Wintergerste; Abb. 16, S. 53). Vielmehr wurden sogar mehr Anhaltspunkte dafür festgestellt, dass nach Rohrschwengel verglichen mit Wegwarte vitalere Nachfruchtbestände etabliert wurden (3. Termin Kaliumaufnahme von Malve, Tab. 18, S. 50; 4. Termin Gaswechselfmessungen an Malve, Abb. 9, S. 46; Abb. 11, S. 47; Abb. 13, S. 49). Angesichts der wenigen und nicht systematischen Unterschiede zwischen Nachfruchtbeständen in Abhängigkeit der nicht-legumen Vorfrucht ist davon auszugehen, dass Wegwarte keine günstigere Vorfrucht war als Rohrschwengel. In der Übersicht wird deutlich, dass wenige Hauptwirkungen Hypothese 1 unterstützen. Im Vergleich dazu wurden deutlich mehr Übereinstimmungen mit Hypothese 2 festgestellt.

In vier Untersuchungen wurden nach mehrjährigem Anbau der Vorfrucht höhere Messwerte erfasst als nach einjährigem. In weiteren drei Nachfruchtuntersuchungen wurden nach zweijähriger Vorfrucht höhere Werte gemessen als nach ein- und dreijähriger Kultur. In den Varianten mit zwei- bzw. dreijährig kultivierter Vorfrucht wurden in je einer Untersuchung eine stärkere Merkmalsausprägung als nach einjähriger Anbaudauer festgestellt (Tab. 33). Der Faktor Anbaudauer der Vorfrucht beeinflusste somit zwar nur vereinzelt die Nachfrüchte, aber in diesen Fällen trat zumeist eine Abstufung gemäß Hypothese 3 auf.

Die folgende Tabelle zeigt die drei häufigsten Signifikanzabstufungen der Hauptwirkung des Faktors Vorfruchtart sowie alle festgestellten Signifikanzabstufungen des Faktors Anbaudauer der Vorfrucht. Die dargestellten Signifikanzabstufungen des Faktors Vorfruchtart entsprechen 74 % aller gefundenen signifikanten Hauptwirkungen, die verbleibenden 26 % der signifikanten Hauptwirkungen entfielen auf weitere fünf Signifikanzabstufungen. Die Signifikanzabstufung Lu (a) Ww (a) Rs (b), die laut Hypothese 1 erwartet wurde, wurde nur in einer einzigen Messung festgestellt. Im Unterschied dazu war die Signifikanzabstufung Lu (a) Ww (b) Rs (b), die Hypothese 2 unterstützt, die häufigste Signifikanzabstufung. Die Signifikanzabstufung Lu (a) Ww (ab) Rs (b), die eine gleichzeitige Gültigkeit der Hypothesen 1 und 2 andeuten könnte, wurde nicht häufiger festgestellt als die der Hypothese 2 tendenziell widersprechende Signifikanzabstufung Lu (a) Ww (b) Rs (ab).

Tab. 33: Signifikanzabstufungen der Ergebnisse von Untersuchungen zur Sprossentwicklung, zum Gaswechself und zur Ertragsbildung der Nachfrüchte im Versuch A. Die Parameter sind Sprosstrockenmasse (TM), Blattflächenindex (BFI), Sprosslänge (L), SPAD-Value (SPAD), Blattphotosynthese- (BPR) und Bestandes-Blattphotosyntheserate (BBPR), Blatttranspirations- (BTR) und Bestandes-Blatttranspirationsrate (BBTR), Anzahl Ähren/m² (AÄ), Tausendkornmasse (TKM), Anzahl Körner/Ähre (AKÄ,) Anzahl Körner/m² (AKM), Korn- (KTM) und Strohertrag (STM), Harvest-Index (HI), sowie Stickstoff- (NA), Phosphor- (PA) und Kalium-Aufnahme (KA) in den Spross der Nachfruchtbestände. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Stufe des jeweiligen Versuchsfaktors. Die Abkürzung einer Kultur (SW: Sommerweizen, FM: Futtermalve, WG: Wintergerste, Ra 11: Winterraps 2011, WR: Winterroggen und Ra 12: Winterraps 2012) in der Tabelle zeigt an, dass die Werte des Parameters (bei Zeitreihenparametern die Werte zu mindestens einem Termin) der in der Spaltenüberschrift genannten Signifikanzabstufung folgen.

Par.	Signifikanzabstufungen Vorfruchtart						Signifikanzabstufungen Anbaudauer											
	Lu Ww Rs			Lu Ww Rs			Lu Ww Rs			3	2	1	3	2	1	3	2	1
	a	b	b	a	ab	b	a	b	ab	a	a	b	b	a	b	a	ab	b
TM	SW, Ra12			FM, WG, Ra12						FM								
BFI	SW, Ra12						SW											
L	Ra12																	
SPAD													Ra12					
BPR	WG									FM, Ra11			SW					
BBPR	Ra12						FM						SW					
BTR													(3 ab 2 a 1 b)					
BBTR	Ra12						FM						SW					
AÄ																		
TKM	Ra11						Ra12			SW								
AKÄ							SW											
AKM							Ra12											
KTM	Ra12			Ra11														
STM	SW																	
HI																SW		
NA	SW, FM, WG, Ra11, WR, Ra12			SW			Ra12											
PA	WG, Ra12			SW			Ra12											
KA	SW, Ra12			SW, FM, Ra11			Ra12											

4.3 Düngungssteigerungsversuch

Bei der überwiegenden Mehrheit der Parameter, die im Rahmen des Düngungssteigerungsversuchs erhoben wurden, trat eine Wechselwirkung zwischen den Faktoren Vorfruchtvariante und Düngungsstufe auf. Zum Zwecke der einheitlichen Darstellung und leichteren Erfassbarkeit der Daten wurden alle Parameter, auch diejenigen ohne statistische Wechselwirkung, einfaktoriell ausgewertet und dargestellt.

Die erste Zeiternte im Düngungssteigerungsversuch wurde in zeitlicher Nähe zur zweiten Zeiternte an Sommerweizen im Hauptversuch durchgeführt.

Zur ersten Zeiternte nahmen die Werte der Parameter **Trockenmasse**, **BFI** und **SPAD-Value** nach Ww 1 und Ww 3 mit erhöhter Stickstoffdüngung signifikant zu. Während eine steigende Stickstoffdüngung den BFI nach Lu 1 erhöhte, hatte das Düngungsniveau auf die Parameterwerte des Weizens nach Lu 3 keinen Einfluss.

In ungedüngten Beständen zeigten sich bei den Parametern **Trockenmasse**, **Sprosslänge** und **SPAD-Value** Unterschiede in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante. Nach Lu 3 wurden dabei stets höhere Werte festgestellt als nach Ww 1. Teilweise traten zusätzlich Unterschiede zwischen weiteren Vorfruchtvarianten auf. Die genannten Unterschiede wurden vereinzelt auch bei einer Düngung von 40 kg N ha⁻¹ oder 80 kg N ha⁻¹ nachgewiesen, höhere Stickstoffgaben überdeckten aber stets den Einfluss der Vorfrucht (Tab. 34).

Im Mittel der Varianten bildete der Sommerweizen eine **Sprosstrockenmasse** von durchschnittlich 6,0 t TM ha⁻¹ und wies einen mittleren **BFI** von 4,2 auf. Die durchschnittliche **Sprosslänge** betrug 82,0 cm und die Fahnenblätter hatten einen mittleren **SPAD-Value** von 51,3 (Tab. 34).

Die im Rahmen der ersten Zeiternte erhobenen Parameter zur Charakterisierung des Sprosses stehen im Einklang mit Hypothese 5.

Tab. 34: Sprosstrockenmasse, Blattflächenindex, Sprosslänge und *SPAD-Value* von Sommerweizen zur ersten Zeiternte (16. - 17.06.2010) in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante und der Düngungsstufe im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Beständen nach einer Vorfruchtvariante in Abhängigkeit von der Düngungsstufe. Unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Beständen auf gleicher Düngungsstufe in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

	N-Düngung [kg N ha ⁻¹]	Sprossparameter zur ersten Zeiternte							
		Lu 1		Lu 3		Ww 1		Ww 3	
Sprossmasse [t TM ha ⁻¹]	0	5,64	AB	6,43	A	3,65	c B	4,23	b AB
	40	6,23		6,57		4,75	bc	5,82	a
	80	6,36		7,23		5,45	ab	5,52	ab
	120	6,88		6,48		5,10	abc	5,65	ab
	160	6,76		6,64		6,60	a	6,34	a
	∅	6,37		6,67		5,19		5,58	
Blattflächen- index	0	3,79	b	4,42		2,02	b	2,51	b
	40	4,78	ab	5,09		3,12	ab	3,62	ab
	80	4,73	ab	4,96		3,77	ab	3,80	ab
	120	5,12	ab	4,89		3,47	ab	4,30	a
	160	5,86	a	4,98		4,09	a	4,62	a
	∅	4,85		4,89		3,33		3,78	
Sprosslänge [cm]	0	83	AB	87	A	75	B	76	B
	40	86		86		77		78	
	80	84	AB	85	A	78	B	80	B
	120	84		89		78		78	
	160	87		87		80		82	
	∅	85		87		78		79	
<i>SPAD-Value</i>	0	51,7	A	52,2	A	40,3	c B	41,7	c B
	40	52,9	A	53,1	A	46,5	b B	47,8	b B
	80	53,5		53,8		50,5	a	51,8	a
	120	54,8		53,5		53,0	a	52,9	a
	160	53,8		54,0		53,5	a	54,4	a
	∅	53,3		53,3		48,7		49,7	

Zur ersten Zeiternte steigerte die Höhe der Stickstoffdüngung die **Stickstoffaufnahme** in den Spross des Weizens nach allen Vorfruchtvarianten mit Ausnahme von Lu 3. In den Düngungsstufen 0, 80 und 120 kg N ha⁻¹ hatte die Vorfruchtvariante einen Einfluss auf die Stickstoffaufnahme. In allen Fällen wurden in mindestens einer Luzernevariante höhere Stickstoffaufnahmen festgestellt als nach Ww 1.

Die Aufnahme der Nährelemente **Phosphor** und **Kalium** wurde durch gesteigerte Stickstoffdüngung nur nach Ww 1 erhöht (Tab. 35). Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Nährstoffaufnahme zur ersten Zeiternte unterstützen Hypothese 5.

Tab. 35: Nährstoffaufnahme in den Spross von Sommerweizen zur ersten Zeiternte (16. - 17.06.2010) in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante und der Düngungsstufe im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Beständen nach einer Vorfruchtvariante in Abhängigkeit von der Düngungsstufe. Unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Beständen auf gleicher Düngungsstufe in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

	N-Düngung [kg N ha ⁻¹]	Nährstoffaufnahme [kg N/P/K ha ⁻¹] zur ersten Zeiternte									
		Lu 1		Lu 3		Ww 1		Ww 3			
Stickstoff	0	119,8	b AB	160,7	A	56,7	c C	65,1	b B		
	40	152,9	ab	173,4		100,0	b	121,1	ab		
	80	177,2	a AB	203,0	A	112,1	b B	125,3	a B		
	120	193,4	a A	182,0	AB	107,3	b B	146,2	a AB		
	160	202,3	a	203,5		176,5	a	169,3	a		
	∅	169,1		185,8		116,5		128,5			
Phosphor	0	19,1		23,2		9,9	b	13,2			
	40	19,9		21,7		15,2	ab	20,2			
	80	20,7		23,4		18,0	ab	19,1			
	120	23,3		22,0		16,9	ab	20,7			
	160	19,9		21,8		21,6	a	21,5			
	∅	20,6		22,4		17,1		19,2			
Kalium	0	187,4		207,6		76,2	b	107,4			
	40	182,2		217,5		122,8	ab	161,0			
	80	185,0		231,2		156,0	ab	150,1			
	120	224,3		226,9		147,2	ab	152,9			
	160	230,7		185,1		188,7	a	183,7			
	∅	201,1		215,2		145,0		155,9			

Die zweite Zeiternte im Düngungssteigerungsversuch erfolgte kurz nach der vierten Zeiternte an Sommerweizen im Hauptversuch.

Zur zweiten Zeiternte zeigte die **Trockenmasse** des Weizens nur nach Ww 1 eine Reaktion auf steigende Stickstoffgaben. Der **BFI** wurde dagegen nur nach Lu 3 von der Düngungsstufe beeinflusst. Dabei ergab sich aber ebenso kein klarer Trend wie bei der **Sprosslänge** des Weizens, die nur nach Ww 1 von der Stickstoffdüngung beeinflusst wurde. Im Unterschied

dazu stieg der **SPAD-Value** des Weizens mit zunehmender Stickstoffgabe nach Ww 1 und Ww 3.

Alle Parameter zeigten unter ausbleibender Stickstoffdüngung Unterschiede in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante. Der **BFI** wurde in allen Stufen der Stickstoffdüngung von der Vorfruchtvariante beeinflusst. Im Unterschied dazu hatte die Vorfruchtvariante nur bis zu einer Düngung von 80 kg N ha⁻¹ einen Einfluss auf den **SPAD-Value**. In allen Fällen, in denen die Vorfruchtvariante die Parameter beeinflusste, wurden in einer Luzernevariante höhere Werte festgestellt als nach Ww 1 (Tab. 36). Die Ergebnisse unterstützen Hypothese 5.

Tab. 36: Sprosstrockenmasse, Blattflächenindex, Sprosslänge und **SPAD-Value** von Sommerweizen zur zweiten Zeiternte (15. - 16.07.2010) in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante und der Düngungsstufe im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Beständen nach einer Vorfruchtvariante in Abhängigkeit von der Düngungsstufe. Unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Beständen auf gleicher Düngungsstufe in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

	N-Düngung [kg N ha ⁻¹]	Sprossparameter zur zweiten Zeiternte									
		Lu 1		Lu 3		Ww 1		Ww 3			
Sprossmasse [t TM ha ⁻¹]	0	12,84	AB	16,39	A	10,44	c B	10,47	B		
	40	13,72		13,22		11,62	bc	13,17			
	80	14,10		16,05		12,91	abc	14,05			
	120	14,45		13,80		14,32	ab	13,47			
	160	14,01		13,27		15,50	a	13,68			
	∅	13,82		14,55		12,96		13,06			
Blattflächen- index	0	0,04	B	0,13	a A	0,01	B	0,02	B		
	40	0,06	AB	0,09	b A	0,01	B	0,01	B		
	80	0,05	AB	0,10	ab A	0,02	B	0,03	AB		
	120	0,04	AB	0,10	ab A	0,02	B	0,05	AB		
	160	0,05	AB	0,11	ab A	0,04	B	0,06	AB		
	∅	0,05		0,11		0,02		0,03			
Sprosslänge [cm]	0	94	A	90	AB	83	b B	83	B		
	40	90		92		89	ab	88			
	80	91		91		92	a	89			
	120	93		91		87	ab	88			
	160	92		93		88	ab	89			
	∅	92		91		88		87			
SPAD-Value	0	31,4	AB	40,8	A	20,2	c B	22,5	c B		
	40	35,7	AB	39,7	A	20,3	c B	24,5	bc AB		
	80	32,5	AB	41,3	A	24,6	bc B	32,4	ab AB		
	120	35,0		40,4		31,3	ab	36,3	a		
	160	37,4		40,4		34,8	a	38,8	a		
	∅	34,4		40,5		26,2		30,9			

Zur zweiten Zeiternte führte eine steigende Stickstoffdüngung nach Ww 1 und Ww 3 zu einer erhöhten **Stickstoffaufnahme** des Weizens. Die **Phosphoraufnahme** nach Lu 3 war unter

ausbleibender Düngung höher als bei einer Düngung ab 120 kg N ha⁻¹. Im Unterschied dazu wurden nach Ww 1 steigende **Phosphor-** und **Kaliumaufnahmen** mit steigender Stickstoffgabe festgestellt. In den ungedüngten sowie in den mit 80 kg N ha⁻¹ gedüngten Varianten hatte die Vorfrucht einen Einfluss auf die **Stickstoffaufnahme** des Weizens. Nach Lu 3 wurden höhere Aufnahmen festgestellt als nach mindestens einer Wegwartevariante (Tab. 37). Die Nährstoffaufnahme des Sommerweizens zur zweiten Zeiternte steht im Einklang mit Hypothese 5.

Tab. 37: Nährstoffaufnahme in den Spross von Sommerweizen zur zweiten Zeiternte (15. - 16.07.2010) in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante und der Düngungsstufe im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Beständen nach einer Vorfruchtvariante in Abhängigkeit von der Düngungsstufe. Unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Beständen auf gleicher Düngungsstufe in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

	N-Düngung [kg N ha ⁻¹]	Nährstoffaufnahme [kg N/P/K ha ⁻¹] zur zweiten Zeiternte							
		Lu 1		Lu 3		Ww 1		Ww 3	
Stickstoff	0	179,1	AB	265,1	A	90,3	c C	104,0	b B
	40	198,7		212,3		132,6	bc	148,3	ab
	80	226,4	AB	258,9	A	170,7	b B	186,9	a AB
	120	244,9		228,1		206,1	ab	204,6	a
	160	244,3		238,0		240,3	a	206,3	a
	∅	217,3		240,5		166,0		173,0	
Phosphor	0	28,1		35,9	a	22,4	b	24,6	
	40	31,0		28,3	ab	27,2	ab	31,3	
	80	30,9		28,5	ab	28,6	ab	33,7	
	120	32,4		22,5	b	31,6	ab	30,1	
	160	31,1		22,9	b	33,9	a	28,9	
	∅	30,7		27,6		28,6		30,0	
Kalium	0	150,3		188,0		83,3	b	122,9	
	40	174,4		156,9		95,0	ab	109,2	
	80	175,3		221,5		127,0	ab	135,5	
	120	203,3		207,0		173,6	ab	146,8	
	160	189,9		200,3		166,9	a	160,4	
	∅	178,1		194,7		126,8		137,4	

Der **Kornertrag** des Weizens war nach Ww 3 bei einer Düngung von 120 kg N ha⁻¹ höher als ohne Stickstoffdüngung. Im Mittel wurde ein Ertrag von 4,54 t TM ha⁻¹ erreicht (Tab. 38).

Die **Tausendkornmasse** des Sommerweizens war unter ausbleibender Düngung nach Ww 3 höher als nach Lu 1. Mit zunehmender Stickstoffdüngung nahm die TKM ab. Dieser Befund war nach Lu 3 sowie nach Ww 1 und Ww 3 signifikant. Im Durchschnitt aller Varianten betrug die TKM 34,4 g.

Die Versuchsfaktoren beeinflussten nicht die **Anzahl Körner/Ähre**. Eine Ähre enthielt im Mittel aller Varianten 18,5 Körner.

Die **Ährendichte** wurde nur nach Ww 3 von der Stickstoffdüngung beeinflusst. Bei 120 kg N ha⁻¹ war die finale Anzahl Ähren/m² höher als unter ausbleibender Düngung. Im Durchschnitt wurden 699 Ähren/m² gebildet.

Der **Strohertrag** des Weizens betrug im Mittel 5,46 t TM ha⁻¹. Die Versuchsfaktoren hatten keinen Einfluss auf den Strohertrag (Tab. 38). Die Werte der Ertragsstrukturparameter unterstützen nur vereinzelt Hypothese 5.

Tab. 38: Ertragsstruktur von Sommerweizen (2010) in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante und der Düngungsstufe im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Beständen nach einer Vorfruchtvariante in Abhängigkeit von der Düngungsstufe. Unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Beständen auf gleicher Düngungsstufe in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

	N-Düngung [kg N ha ⁻¹]	Ertragsstruktur			
		Lu 1	Lu 3	Ww 1	Ww 3
Kornertrag [t TM ha ⁻¹]	0	4,09	4,62	3,80	4,82 b
	40	4,49	4,46	4,66	5,41 ab
	80	4,35	3,97	4,01	5,62 ab
	120	4,15	4,29	4,06	6,23 a
	160	3,85	3,94	4,36	5,47 ab
	∅	4,18	4,26	4,19	5,51
TKM [g]	0	34,1 B	36,1 a AB	38,1 a AB	41,5 a A
	40	35,7	33,8 ab	37,8 ab	36,4 ab
	80	32,0	33,7 ab	33,9 ab	36,6 ab
	120	31,9	30,7 ab	35,5 ab	32,7 b
	160	30,6	30,1 b	32,1 b	33,7 b
	∅	32,8	32,9	35,5	36,2
Anzahl Körner/Ähre	0	18,2	17,1	20,2	18,0
	40	20,2	20,5	18,9	19,8
	80	21,5	17,2	17,0	15,8
	120	18,8	20,3	15,3	19,3
	160	19,8	15,3	20,0	15,0
	∅	19,7	18,1	18,3	17,9
Anzahl Ähren/m ²	0	720,8	808,3	520,8	504,2 b
	40	660,4	652,1	662,5	652,1 ab
	80	635,4	735,4	720,8	752,1 ab
	120	708,3	727,1	750,0	779,2 a
	160	689,6	879,2	689,6	722,9 ab
	∅	682,9	760,4	668,8	682,1
Strohertrag [t TM ha ⁻¹]	0	5,50	6,20	4,40	3,70
	40	6,41	6,23	6,00	4,65
	80	5,93	5,64	5,81	4,27
	120	6,47	5,94	5,50	4,88
	160	5,81	5,46	6,13	4,27
	∅	6,02	5,90	5,57	4,36

Nach Ww 1 und Ww 3 führten steigende Stickstoffgaben zu erhöhten **Stickstoffaufnahmen ins Korn**, während die Aufnahme der Nährstoffe **Phosphor** und **Kalium** generell nicht von der Stickstoffdüngung beeinflusst wurde (Tab. 39).

Die **Stickstoffaufnahme** ins Korn war im Trend nach Luzerne höher als nach Wegwarte. Signifikante Unterschiede wurden nur zwischen Varianten ohne Stickstoffdüngung festgestellt. Die Stickstoffmenge im Korn war nach Lu 3 höher als nach beiden Wegwartevarianten, und nach Lu 1 höher als nach Ww 1. Die Vorfruchtvariante hatte keinen Einfluss auf die **Phosphor-** und **Kaliumaufnahme**. Die festgestellten Unterschiede der Nährstoffaufnahme ins Korn des Sommerweizens unterstützen Hypothese 5.

Tab. 39: Nährstoffaufnahme in das Korn von Sommerweizen (2010) in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante und der Düngungsstufe im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Beständen nach einer Vorfruchtvariante in Abhängigkeit von der Düngungsstufe. Unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Beständen auf gleicher Düngungsstufe in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

	N-Düngung [kg N ha ⁻¹]	Nährstoffaufnahme [kg N/P/K ha ⁻¹] in das Korn							
		Lu 1		Lu 3		Ww 1		Ww 3	
Stickstoff	0	110,7	AB	137,0	A	68,5	b C	73,1	c B
	40	134,6		134,9		99,9	ab	101,1	bc
	80	128,9		124,9		96,1	ab	106,3	abc
	120	132,3		136,5		113,9	a	137,5	a
	160	124,6		127,1		129,2	a	125,5	ab
	∅	126,2		132,1		101,8		107,8	
Phosphor	0	14,7		16,6		12,1		12,3	
	40	15,7		15,6		15,9		16,3	
	80	14,8		13,6		15,7		14,4	
	120	16,1		14,3		13,9		17,3	
	160	13,2		13,1		16,7		16,0	
	∅	14,8		14,7		14,9		15,2	
Kalium	0	22,2		25,2		21,5		20,8	
	40	24,6		24,2		25,6		26,9	
	80	23,6		22,6		22,5		24,1	
	120	23,8		23,8		22,1		27,6	
	160	21,6		21,9		23,2		24,4	
	∅	23,1		23,5		23,1		25,0	

Sowohl nach Lu 1 als auch nach Ww 1 nahm die **Stickstoffaufnahme ins Stroh** mit erhöhter Stickstoffdüngung zu. Eine Beeinflussung der **Phosphor-** und **Kaliumaufnahme** durch die Stickstoffdüngung wurde nicht festgestellt (Tab. 40).

Die **Stickstoffaufnahme** wurde unter ausbleibender Düngung sowie bei einer Stickstoffgabe von 40 kg N ha⁻¹ von der Vorfruchtvariante beeinflusst. Nach Lu 3 wurde eine höhere Aufnahme festgestellt als nach jeweils einer Wegwartevariante (Tab. 40). Die Nährstoffaufnahme ins Stroh des Sommerweizens bestätigt ebenfalls Hypothese 5.

Tab. 40: Nährstoffaufnahme in das Stroh von Sommerweizen (2010) in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante und der Düngungsstufe im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Beständen nach einer Vorfruchtvariante in Abhängigkeit von der Düngungsstufe. Unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Beständen auf gleicher Düngungsstufe in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

	N-Düngung [kg N ha ⁻¹]	Nährstoffaufnahme [kg N/P/K ha ⁻¹] in das Stroh									
		Lu 1		Lu 3		Ww 1		Ww 3			
Stickstoff	0	22,6	b AB	31,7	A	10,1	b B	13,0	AB		
	40	32,8	ab AB	34,3	A	18,2	ab AB	16,2	B		
	80	29,6	ab	35,6		20,7	ab	20,3			
	120	40,6	a	36,5		24,1	ab	28,5			
	160	37,2	a	37,7		29,1	a	28,6			
	∅	32,7		35,3		20,5		20,9			
Phosphor	0	3,6		4,4		2,8		4,0			
	40	4,9		4,5		3,9		4,2			
	80	3,8		4,3		3,9		4,9			
	120	5,0		4,4		4,0		5,1			
	160	4,8		3,8		4,0		4,5			
	∅	4,4		4,3		3,7		4,5			
Kalium	0	113,7		118,2		60,3		58,9			
	40	124,0		128,5		85,3		83,5			
	80	122,4		119,5		99,5		86,6			
	120	119,1		106,7		117,7		73,5			
	160	100,9		105,4		116,8		85,8			
	∅	115,6		116,3		95,9		77,4			

4.4 ¹⁵N-tracer-Versuch: Stickstoff-Deposition und -Wiederaufnahme

4.4.1 ¹⁵N-Eintrag aus Luzernemulch in verschiedene Bodenkompimente

Die Beaufschlagung der Unterteilstücke mit ¹⁵N-markiertem Luzernemulch führte im *bulk*-Boden und in der Drilosphäre aller drei Tiefenstufen zu einem zum Teil signifikanten Anstieg des ¹⁵N-Anteils des Gesamt-Stickstoffs im Vergleich zur Kontrolle (Abb. 26). In den Unterteilstücken unterschied sich der ¹⁵N-Anteil des Gesamt-Stickstoffs in Drilosphäre und *bulk*-Boden in den oberen beiden Tiefenstufen jeweils signifikant voneinander. In der dritten Tiefenstufe war dieser Effekt zwar ebenfalls deutlich, aber statistisch nicht signifikant (Abb. 26, Signifikanz-Kleinbuchstaben).

In den markierten Unterteilstücken nahm der ¹⁵N-Anteil des Gesamt-Stickstoffs mit zunehmender Tiefe ab. So wurde in Bioporenwandungsmaterial aus der Tiefenstufe 0 - 45 cm ein mittlerer Anteil von 2,210 atom% ¹⁵N gemessen, in der Tiefenstufe 45 – 75 cm ein mittlerer Anteil von 1,408 atom% ¹⁵N und in der Tiefenstufe 75 – 105 cm ein mittlerer Anteil von 1,074 atom% ¹⁵N. Die Streuung der Werte nahm mit zunehmender Tiefe zu, so betrug der Variationskoeffizient für die Tiefenstufe 0 – 45 cm 0,10, für die Tiefenstufe 45 – 75 cm 0,26 und für die Tiefenstufe 75 – 105 cm 0,53. In den Kontrollproben wurde ein Gehalt von 0,375 atom% ¹⁵N (Variationskoeffizient < 0,01) gemessen. Die starken

Streuungen zwischen den Werten des ^{15}N -Anteils des Gesamt-Stickstoffs in Proben aus den markierten Unterteilstücken führten dazu, dass nur die Porenwandung aus den oberen beiden Tiefenstufen einen gegenüber der Kontrolle signifikant erhöhten ^{15}N -Anteil des Gesamt-Stickstoffs aufwies. Der deutliche Unterschied hinsichtlich des ^{15}N -Anteils des Gesamt-Stickstoffs zwischen den Proben der dritten Tiefenstufe und der Kontrolle war somit nur tendenziell (Abb. 26, Signifikanz-Großbuchstaben). Im *bulk*-Boden der Unterteilstücke wurde ein im Vergleich zu den Bioporenwandungen deutlich geringerer ^{15}N -Anteil des Gesamt-Stickstoffs gefunden (0,409 – 0,672 atom% ^{15}N in Abhängigkeit von der untersuchten Tiefenstufe, Variationskoeffizient 0,06 – 0,13). Der ^{15}N -Anteil des Gesamt-Stickstoffs der Kontrollproben aus dem *bulk*-Boden betrug 0,373 atom% ^{15}N (Variationskoeffizient < 0,01). Aufgrund der Streuung der Werte lag nur für den ^{15}N -Anteil des Gesamt-Stickstoffs der obersten Tiefenstufe ein signifikanter Unterschied zwischen den Proben aus den Unterteilstücken verglichen mit denen der Kontrolle vor (Abb. 26, Signifikanz-Großbuchstaben).

Die vorgestellten Ergebnisse der Bodenuntersuchungen bestätigen die Hypothesen 6 und 7.

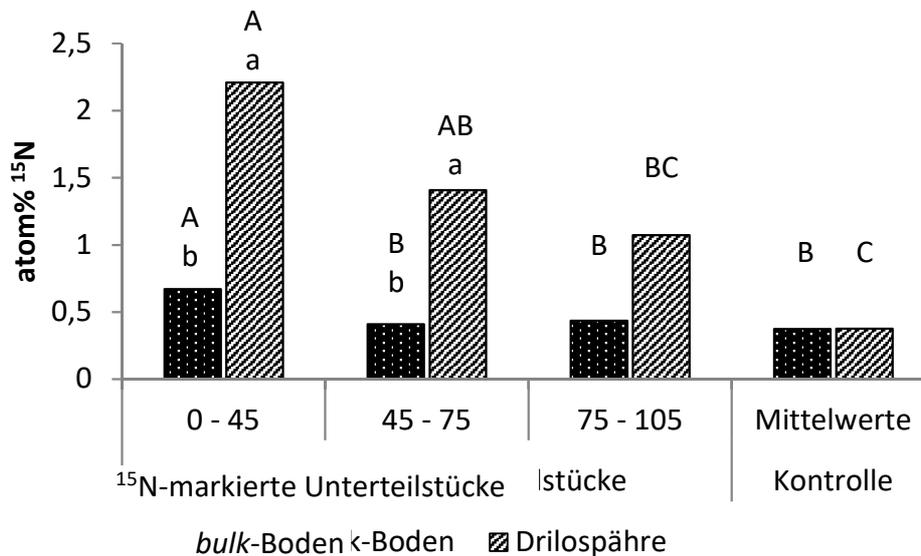


Abb. 26: ^{15}N -Anteil des Gesamt-Stickstoffs im *bulk*-Boden und in der Drilosphäre aus markierten Unterteilstücken in Abhängigkeit von der Bodentiefe sowie aus nicht-markierten Kontrollflächen nach Ende der Depositionsphase im Herbst 2011 im Versuch B. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Werten des ^{15}N -Anteils des Gesamt-Stickstoffs in einer Tiefenstufe in Abhängigkeit vom Bodenkompartiment. Unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Werten des ^{15}N -Anteils des Gesamt-Stickstoffs in einem Bodenkompartiment in Abhängigkeit von der Tiefenstufe bzw. gegenüber der Kontrolle. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

4.4.2 ^{15}N -Aufnahme aus dem Unterboden

Sowohl die Sprossproben von Malve als auch Weizenkorn und -stroh aus den markierten Unterteilstücken enthielten jeweils einen signifikant höheren ^{15}N -Anteil des Gesamt-Stickstoffs als die zugehörigen Kontrollen (Abb. 27). In den Malvensprossproben aus den markierten Teilflächen wurden 1,125 atom% ^{15}N gemessen (Variationskoeffizient 0,24). Das Weizenkorn enthielt 1,098 atom% ^{15}N (Variationskoeffizient 0,18) und das Weizenstroh 0,841 atom% ^{15}N (Variationskoeffizient 0,13). Die Kontroll-Sprossproben wiesen einen

^{15}N -Anteil von $0,370 - 0,373$ atom% ^{15}N des Gesamt-Stickstoffs auf (Variationskoeffizient $0,01$), der damit etwas geringer war als der mittlere ^{15}N -Anteil des Gesamt-Stickstoffs in den Bodenproben aus Kontrollflächen. Der ^{15}N -Anteil des Gesamt-Stickstoffs der verschiedenen Pflanzen(-teile) aus den Unterteilstücken unterschied sich nicht voneinander, ebenso wurde zwischen den Kontrollproben kein Unterschied festgestellt (Abb. 27). Die Ergebnisse stehen im Einklang mit Hypothese 8, da sie auf eine Wiederaufnahme des eingetragenen *tracers* durch die Nachfrüchte hindeuten.

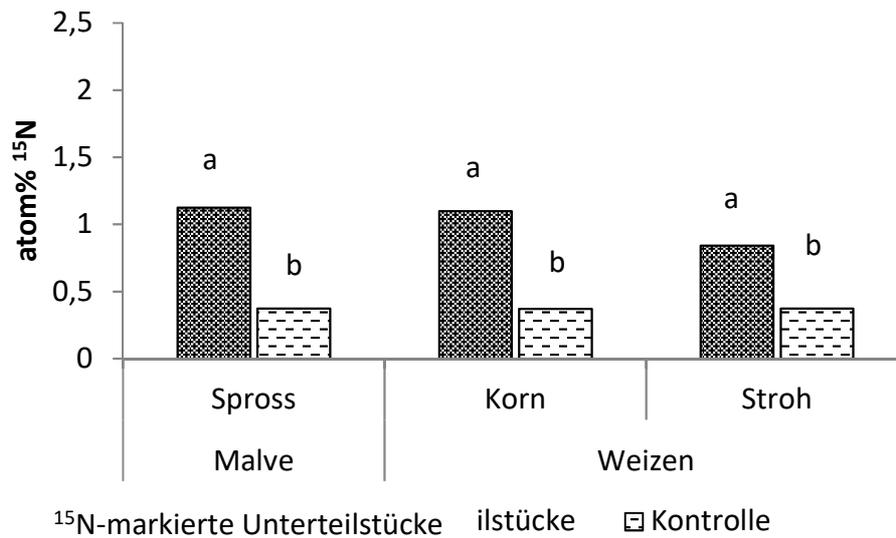


Abb. 27: ^{15}N -Anteil des Gesamt-Stickstoffs im Malvenspross sowie in Korn und Stroh von Sommerweizen aus markierten Unterteilstücken im Vergleich zu entsprechenden Proben aus nicht-markierten Kontrollflächen im Versuch B. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Werten des ^{15}N -Anteils des Gesamt-Stickstoffs eines Pflanzenteils in Abhängigkeit von der Probenherkunft (markierte Unterteilstücke verglichen mit Kontrolle). ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

In den Unterteilstück-Bodenproben, die nach dem Anbau von Malve und Weizen im Jahr 2012 genommen wurden, wurde im Trend ein geringerer ^{15}N -Anteil des Gesamt-Stickstoffs gemessen als in denen, die aus der Zeit unmittelbar nach abgeschlossenem *tracer*-Eintrag im Herbst 2011 stammten. Sowohl die Proben aus der Drilosphäre (Mittelwert 0,782 atom% ^{15}N) als auch die aus dem *bulk*-Boden (Mittelwert 0,410 atom% ^{15}N) der Unterteilstücke wiesen einen nur tendenziell höheren ^{15}N -Anteil des Gesamt-Stickstoffs auf als Proben aus Kontrollflächen (Mittelwert 0,375 atom% ^{15}N bzw. 0,373 atom% ^{15}N). Der im Herbst 2011 in den Unterteilstücken festgestellte signifikante Unterschied zwischen den Werten des ^{15}N -Anteils des Gesamt-Stickstoffs in der Porenwandung der mittleren Tiefenstufe und der Kontrolle trat ebenfalls nicht mehr auf. Im Trend wurden nach beiden Kulturen in der mittleren Tiefenstufe größere Unterschiede der Werte des ^{15}N -Anteils des Gesamt-Stickstoffs vor verglichen mit nach der Kultur der Nachfrüchte festgestellt als in der unteren Tiefenstufe. Die Unterschiede der Werte des ^{15}N -Anteils des Gesamt-Stickstoffs vor verglichen mit nach der Kultur von Weizen bzw. Malve waren bei Malve für die Drilosphäre signifikant größer als für den *bulk*-Boden, wohingegen bei Weizen nur eine entsprechende Tendenz vorlag (Abb. 28).

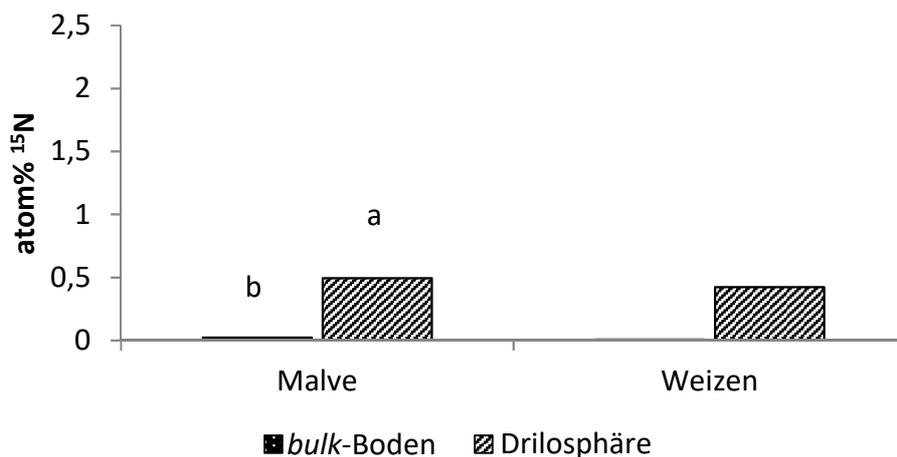


Abb. 28: Verminderung des ^{15}N -Anteils des Gesamt-Stickstoffs von *bulk*-Boden und Drilosphäre aus markierten Unterteilstücken vor gegenüber nach der Nachfrucht in der Tiefenstufe 45 cm - 75 cm in Abhängigkeit von der Nachfruchtart im Versuch B. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Werten des ^{15}N -Anteils des Gesamt-Stickstoffs in Abhängigkeit vom Bodenkompartment. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

In der untersten Tiefenstufe der mit Weizen kultivierten Unterteilstücke war der ^{15}N -Anteil des Gesamt-Stickstoffs in der Porenwandung signifikant höher als im *bulk*-Boden (Abb. 29). Wie bei den Untersuchungen im Jahr 2011 wurden jedoch auch im Jahr 2012 hohe Streuungen zwischen den Proben in Abhängigkeit von der Feldwiederholung festgestellt. So wiesen die Proben aus der Porenwandung einen Variationskoeffizienten von 0,14 – 0,60 auf, die Proben aus dem *bulk*-Boden einen geringeren Variationskoeffizienten von 0,01 – 0,15. Die Werte der Kontrollproben streuten deutlich weniger und wiesen einen Variationskoeffizienten von < 0,01 auf.

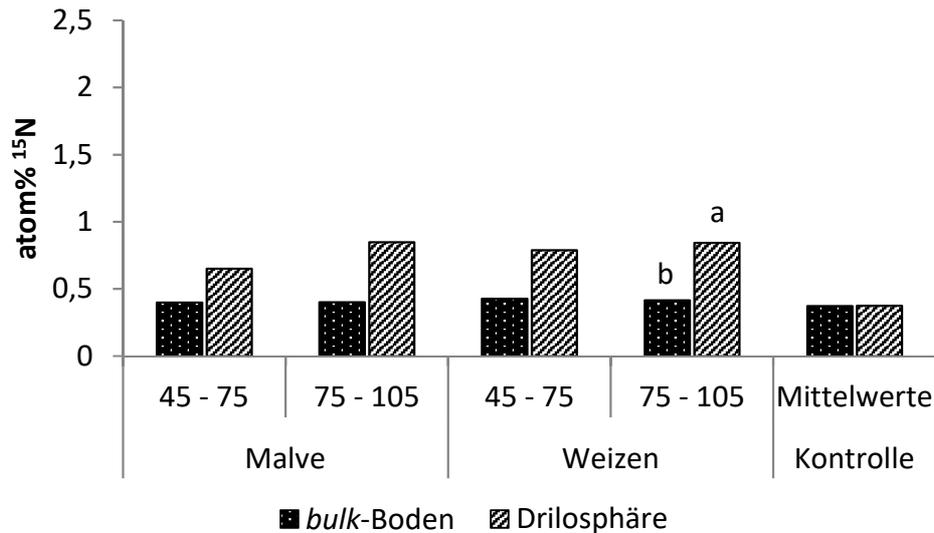


Abb. 29: ¹⁵N-Anteil des Gesamt-Stickstoffs von *bulk*-Boden und Drilosphäre aus markierten Unterteilstücken in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der Nachfrucht sowie aus nicht-markierten Kontrollflächen nach Ende der Wiederaufnahmephase im Herbst 2012 im Versuch B. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen für eine Kultur signifikante Unterschiede zwischen den Werten des ¹⁵N-Anteils des Gesamt-Stickstoffs in Proben aus einer Tiefenstufe in Abhängigkeit vom Bodenkompartiment. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

Der ¹⁵N-Anteil der unterbodenbürtigen Stickstoffaufnahme ist bei gegebenem ¹⁵N-Anteil des Spross-Stickstoffs der Nachfrüchte umgekehrt proportional zur Stickstoffaufnahme aus dem Unterboden (Kap 3.6). Als Grenzwertbetrachtung ergibt sich bei Annahme des maximal möglichen ¹⁵N-Anteils des aus dem Unterboden in den Spross aufgenommenen Stickstoffs daher die minimale unterbodenbürtige Stickstoffaufnahme („Stickstoffaufnahme aus dem UB: minimal“). Als Näherungsschätzung wurde für den ¹⁵N-Anteil des aus dem Unterboden aufgenommenen Gesamt-Stickstoffs der höchste im Jahr 2011 gemessene Wert aller Proben des Unterbodens der markierten Unterteilstücke in das lineare Gleichungssystem eingesetzt („Stickstoffaufnahme aus dem UB: Näherung“). Als minimaler Anteil der Stickstoffaufnahme aus dem Unterboden wurden in Abhängigkeit von Pflanzenart bzw. -teil Werte von 3,4 - 5,4 % ermittelt. Die Näherungsschätzung ergab für Weizenstroh eine Stickstoffaufnahme aus dem Unterboden von 34,9 %, für Weizenkorn von 53,3 % und für Malvenspross von 55,4 % (Tab. 41).

Tab. 41: Anteilige Stickstoffaufnahme aus dem Unterboden in Korn und Stroh von Sommerweizen (2010) bzw. in den Spross von Malve (2010) in Abhängigkeit vom angenommenen mittleren ¹⁵N-Anteil des aus dem Unterboden aufgenommenen Stickstoffs im Versuch B.

Anteilige Stickstoffaufnahme [%] aus dem Unterboden			
	¹⁵ N-Anteil des Gesamt-Stickstoffs	14,50	1,7377
	Stickstoffaufnahme aus dem UB	<i>minimal</i>	<i>Näherung</i>
Weizen	Stroh	3,37	34,91
	Korn	5,15	53,33
Malve	Spross	5,35	55,37

Falls der ^{15}N -Gehalt des aus dem Unterboden aufgenommenen Stickstoffs gleich dem ^{15}N -Gehalt im Stickstoff der Sprossmasse gewesen wäre (0,8 – 1,1 atom%), wäre der Stickstoff vollständig aus dem Unterboden aufgenommen worden. Diese nur theoretisch denkbare Möglichkeit stellt damit die rechnerisch höchstmögliche Stickstoffaufnahme aus dem Unterboden dar.

Die vorgenannten Betrachtungen unterstützen Hypothese 8 grundsätzlich hinsichtlich der bodenkompartimentbezogenen Nährstoffaufnahmeschätzung, auch wenn eine präzise Quantifizierung nicht möglich war.

4.5 Infiltrationsraten des Unterbodens

Die feldgesättigte Wasserleitfähigkeit des Unterbodens betrug im Jahr 2011 im Mittel der Varianten 1.812 cm d^{-1} . Der geringste Varianten-Mittelwert wurde nach Ww 3 mit 1.443 cm d^{-1} ermittelt, der höchste Varianten-Mittelwert nach Rs 1 mit 2.062 cm d^{-1} . Aufgrund der sehr starken Streuung der Werte wurde jedoch kein signifikanter Varianteneinfluss auf die feldgesättigte Wasserleitfähigkeit festgestellt (Abb. 30). Die Ergebnisse der Infiltrationsmessungen im Jahr 2011 stehen nicht im Einklang mit Hypothese 9.

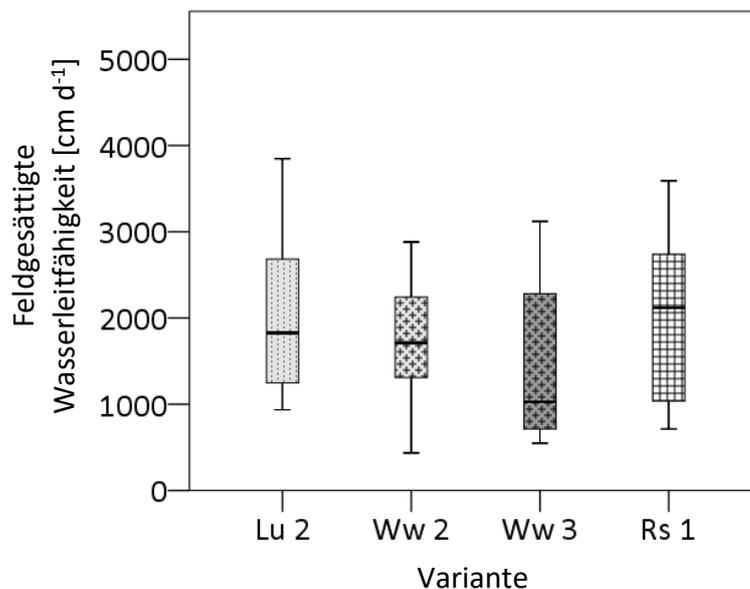


Abb. 30: Feldgesättigte Wasserleitfähigkeit des Bodens im Jahr 2011 in 45 cm Tiefe in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante im Versuch B. Lu 2: zweijährig kultivierte Luzerne; Ww 2: zweijährig kultivierte Wegwarte; Ww 3: dreijährig kultivierte Wegwarte; Rs 1: einjährig kultivierter Rohrschwengel. Messungen im Zeitraum 17.08. - 02.10.2011.

Im Jahr 2012 wurde eine mittlere feldgesättigte Wasserleitfähigkeit von 2.793 cm d^{-1} gemessen. Mit 2.537 cm d^{-1} wurde nach Lu 1 der geringste Mittelwert erfasst, während nach Lu 2 mit 3.119 cm d^{-1} der höchste Varianten-Mittelwert beobachtet wurde. Zwischen den Wiederholungen lag wiederum eine starke Streuung vor, dass ein Einfluss der Faktoren auf die Wasserleitfähigkeit nicht erkennbar war (Abb. 31). Die Ergebnisse der

Infiltrationsmessungen im Jahr 2012 können, analog zu denen im Jahr 2011, Hypothese 9 nicht bestätigen.

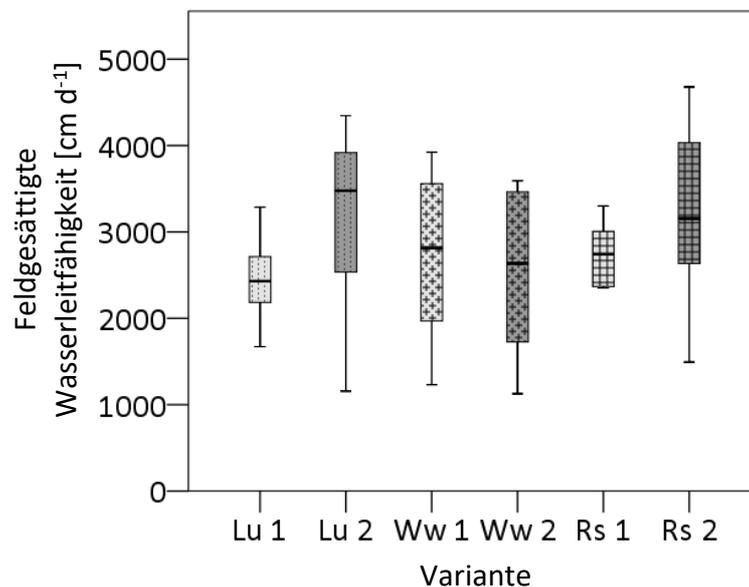


Abb. 31: Feldgesättigte Wasserleitfähigkeit des Bodens im Jahr 2012 in 45 cm Tiefe in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante im Versuch B. Lu 1: einjährig kultivierte Luzerne; Lu 2: zweijährig kultivierte Luzerne; Ww 1: einjährig kultivierte Wegwarte; Ww 2: zweijährig kultivierte Wegwarte; Rs 1: einjährig kultivierter Rohrschwengel; Rs 2: zweijährig kultivierter Rohrschwengel. Messungen im Zeitraum 16.04. - 22.06.2012.

Im Jahr 2011 wurde eine mittlere Infiltration durch die Poren mit einem Äquivalenzdurchmesser > 5 mm von 297 cm d^{-1} gemessen. Es bestand kein Zusammenhang zwischen der erfassten Anzahl der Poren mit einem Äquivalenzdurchmesser von > 5 mm und der gemessenen Infiltration in diese Poren. Die Wertepaare bilden eine Punktwolke, in der auch die einzelnen Varianten nicht gruppiert sind (Abb. 32).

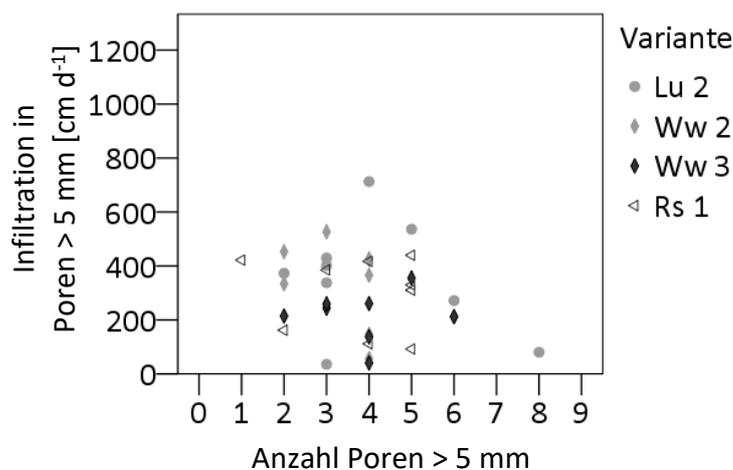


Abb. 32: Infiltration in Poren mit einem Äquivalenzdurchmesser von > 5 mm im Jahr 2011 in 45 cm Tiefe in Abhängigkeit von der Anzahl der Poren > 5 mm im Versuch B. Bezugsfläche: 483 cm^2 . Lu 2: zweijährig kultivierte Luzerne; Ww 2: zweijährig kultivierte Wegwarte; Ww 3: dreijährig kultivierte Wegwarte; Rs 1: einjährig kultivierter Rohrschwengel. Messungen im Zeitraum 17.08. - 02.10.2011.

Die über die Porendichte gemittelte Infiltration in Poren mit einem Durchmesser > 5 mm im Jahr 2012 betrug 460 cm d^{-1} . Analog zum Datensatz aus dem Jahr 2011 wurde kein Zusammenhang zwischen der Infiltration in die Poren mit einem Äquivalenzdurchmesser von > 5 mm und der Anzahl dieser Poren festgestellt (Abb. 33).

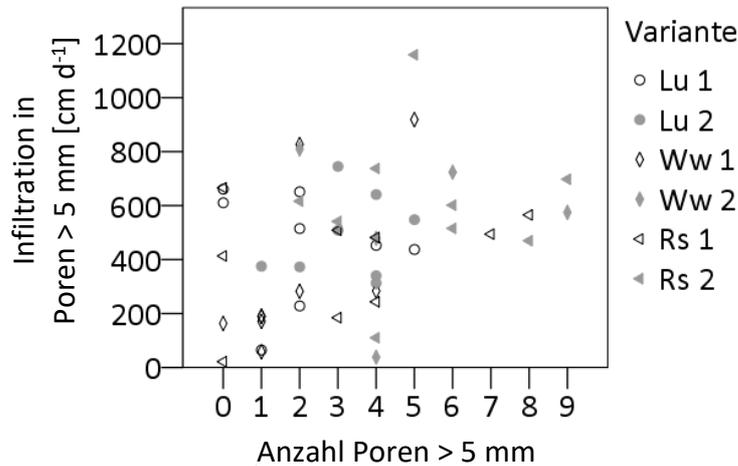


Abb. 33: Infiltration in Poren mit einem Äquivalenzdurchmesser von > 5 mm im Jahr 2012 in 45 cm Tiefe in Abhängigkeit von der Anzahl der Poren > 5 mm im Versuch B. Bezugsfläche: 483 cm^2 . Lu 1: einjährig kultivierte Luzerne; Lu 2: zweijährig kultivierte Luzerne; Ww 1: einjährig kultivierte Wegwarte; Ww 2: zweijährig kultivierte Wegwarte; Rs 1: einjährig kultivierter Rohrschwengel; Rs 2: zweijährig kultivierter Rohrschwengel. Messungen im Zeitraum 16.04. - 22.06.2012.

Im Durchschnitt aller Porendichten infiltrierten im Jahr 2011 in Poren mit einem Äquivalenzdurchmesser von 2 – 5 mm 161 cm d^{-1} Wasser. Auch für die Infiltration in Poren 2 – 5 mm ließ sich kein Zusammenhang zwischen der erfassten Anzahl der Poren und der zugehörigen Infiltration feststellen (Abb. 34).

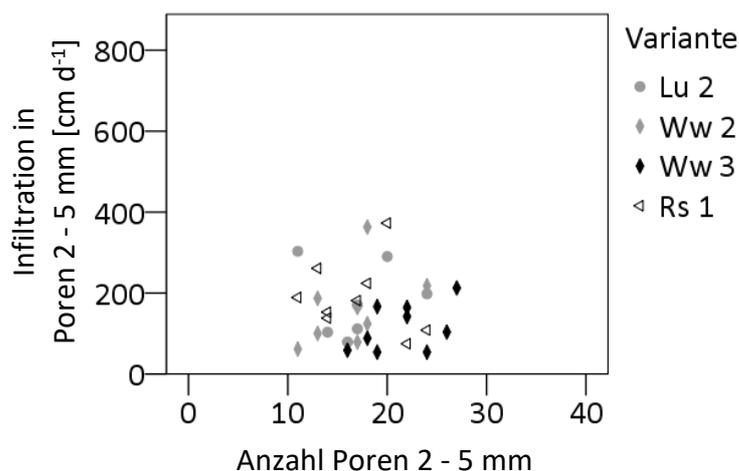


Abb. 34: Infiltration in Poren mit einem Äquivalenzdurchmesser von 2–5 mm im Jahr 2011 in 45 cm Tiefe in Abhängigkeit von der Anzahl der Poren 2–5 mm im Versuch B. Bezugsfläche: 483 cm^2 . Lu 2: zweijährig kultivierte Luzerne; Ww 2: zweijährig kultivierte Wegwarte; Ww 3: dreijährig kultivierte Wegwarte; Rs 1: einjährig kultivierter Rohrschwengel. Messungen im Zeitraum 17.08. - 02.10.2011.

Die mittlere Infiltration in die Poren mit einem Äquivalenzdurchmesser von 2 – 5 mm im Jahr 2012 betrug 302 cm d^{-1} . Mit zunehmender Porenanzahl wurden tendenziell höhere Werte der Infiltration in die zugehörigen Poren gemessen, doch ist auch in diesem Fall die Streuung der Werte zu groß, um einen kausalen Zusammenhang signifikant belegen zu können (Abb. 35).

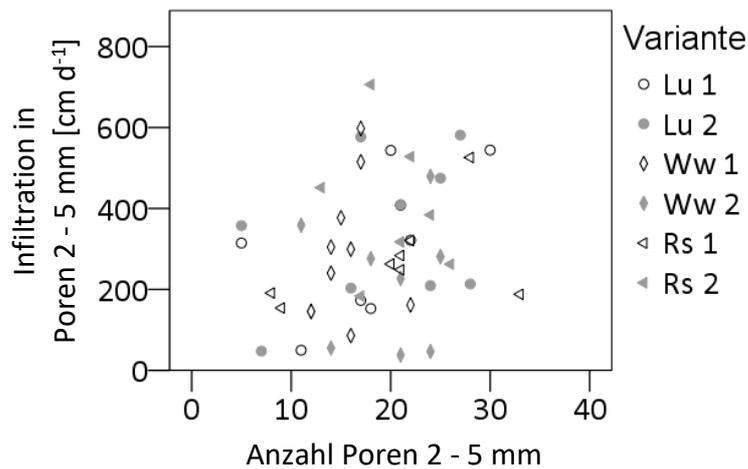


Abb. 35: Infiltration in Poren mit einem Äquivalenzdurchmesser von 2–5 mm im Jahr 2012 in 45 cm Tiefe in Abhängigkeit von der Anzahl der Poren 2 – 5 mm im Versuch B. Bezugsfläche: 483 cm^2 . Lu 1: einjährig kultivierte Luzerne; Lu 2: zweijährig kultivierte Luzerne; Ww 1: einjährig kultivierte Wegwarte; Ww 2: zweijährig kultivierte Wegwarte; Rs 1: einjährig kultivierter Rohrschwengel; Rs 2: zweijährig kultivierter Rohrschwengel. Messungen im Zeitraum 16.04. - 22.06.2012.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass mit dem *Hood*-Infiltrometer keine Unterschiede zwischen Werten der feldgesättigten Wasserleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Variante gemessen wurden. Darüber hinaus wurde kein Zusammenhang zwischen der Anzahl der Poren einer Größenklasse und der Infiltration in diese Poren beobachtet. Beispielsweise deuteten die Messungen im Jahr 2012 teils auf erhebliche Infiltrationsraten in die Poren $> 5 \text{ mm}$ hin, obwohl keine Poren dieser Größenklasse erfasst wurden. Die Auswertung der Infiltrationsratenmessungen in den Jahren 2011 und 2012 steht hinsichtlich beider untersuchten Bioporen-Größenklassen nicht im Einklang mit Hypothese 9.

5 Diskussion

Die Versuchsfaktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht beeinflussten wiederholt, aber nicht durchgängig, Wachstum und Ertragsbildung der Nachfrüchte. Der Faktor Vorfruchtart hatte dabei einen stärkeren Einfluss auf die Nachfrüchte als der Faktor Anbaudauer der Vorfrucht, wobei zumeist festgestellt wurde, dass Luzerne eine günstigere Vorfrucht war als Wegwarte und Rohrschwingel. Eine Quantifizierung der luzerneinduzierten Effekte der Biopörung und Steigerung des Stickstoffangebots war allerdings nicht möglich.

In den Jahren 2010 und 2011 wurden abgestufte Stickstoff-Mengen als Ausgleichsdüngungen mit dem Ziel appliziert, zu Beginn der Vegetationszeit eine ähnliche Stickstoffversorgung in allen Varianten zu erreichen, so dass Parzellen nach Wegwarte und Rohrschwingel höhere Stickstoffdüngergaben erhielten als nach Luzerne. Dennoch wurde nach Luzerne in allen drei untersuchten Nachfruchtjahren eine zumindest zeitweilig höhere N_{\min} -Menge im Boden festgestellt als nach Wegwarte und Rohrschwingel (Anhang-Tab. 12, S. 159; Anhang-Tab. 29, S. 167; Anhang-Tab. 45, S. 174). Zudem wurde für alle sechs Nachfrüchte eine signifikant höhere Stickstoffaufnahme nach Luzerne festgestellt als nach Wegwarte und Rohrschwingel. Diese Sachverhalte deuten darauf hin, dass die Stickstoffwirkung der Luzerne eine dominante Rolle unter den Vorfruchteffekten hatte. Diese Schlussfolgerung wird von Ergebnissen des Düngungssteigerungsversuchs unterstützt. Die günstigen Vorfruchtwirkungen der (insbesondere dreijährig angebauten) Luzerne verglichen mit Wegwarte wurden unter steigenden Stickstoffgaben zunehmend überdeckt (Kap. 4.3). Diese und weitere Effekte der Vorfruchtkulturen im *CeFiT* werden im Folgenden einzeln diskutiert.

5.1 Nährstoffvermittelte Vorfruchteffekte aufgrund von biologischer Stickstofffixierung und infolge von Mulchschnitten

5.1.1 Stickstoff

Bei der ersten Nachfrucht Sommerweizen wurden nach Luzerne höhere Werte der Sprossmasse (Abb. 1, S. 32), des Blattflächenindex (Abb. 2, S. 33) und des Strohertrags (Tab. 13, S. 39) festgestellt als nach mindestens einer der beiden nicht-legumen Vorfrüchte. Entsprechende Unterschiede zwischen Werten des Kornertrags traten ebenfalls auf, waren allerdings nur im Vergleich der dreijährig angebauten Vorfrüchte signifikant (Tab. 14, S. 39). Der Einfluss der hohen Anzahl Körner/Ähre nach Luzerne auf den Kornertrag wurde durch eine geringere TKM teilweise kompensiert (Tab. 13, S. 39). Eine entsprechende, gegenläufige Beeinflussung der genannten Ertragsstrukturparameter ist aus der Literatur bekannt (z. B. VAN HERWAARDEN et al. 1998). In Übereinstimmung mit den Ergebnissen verschiedener Autoren kann daher die Beeinflussung des vegetativen Sprosswachstums und der Ertragsbildung des Sommerweizens auf ein erhöhtes Stickstoffangebot nach Luzerne verglichen mit Wegwarte und Rohrschwingel zurückgeführt werden (KRISTENSEN et al. 2008; SALVAGIOTTI & MIRALLES 2008; KULIG et al. 2010). Andere Forscher untersuchten im *CeFiT* außerdem mögliche Einflüsse der Versuchsfaktoren auf die Wurzellängendichte des Sommerweizens (GAISER et al. 2012). Sie stellten fest, dass die Wurzellängendichte des

Sommerweizens im Unterboden nicht dem Trend der höheren Bioporendichte nach Wegwarte verglichen mit Luzerne (Kap. 5.2) folgte. Stattdessen bildete Sommerweizen nach Lu 2 unterhalb von 60 cm Bodentiefe eine teils signifikant höhere Wurzellängendichte als nach Ww 2 aus. In einem andernorts durchgeführten Feldversuch mit Winterweizen wurde festgestellt, dass die Bestände mit steigendem Stickstoffangebot eine gesteigerte Wurzellängendichte am deutlichsten in einer Bodentiefe unterhalb von 50 cm ausbildeten (RASMUSSEN et al. 2015). Analog zur Sprossmasse könnte die Wurzellängendichte demnach durch die erhöhte Stickstoffversorgung nach Luzerne gefördert worden sein, wie von anderen Autoren berichtet wurde (BELFORD et al. 1987; RASMUSSEN et al. 2015). Die unterschiedlich große Wurzellängendichte führte im *CeFIT* zwischen Ende Juni und Ende Juli 2010 nicht zu einer unterschiedlich hohen Gesamt-Wasseraufnahme. Die Wassergehalte des Bodens wiesen jedoch darauf hin, dass der Weizen vor der genannten Messperiode mehr Wasser nach Lu 2 entzogen hatte als nach Ww 2 (GAISER et al. 2012).

Die Wintergerste als zweite Nachfrucht wies zeitweilig nach Luzerne verglichen mit Wegwarte und Rohrschwengel eine höhere Sprossmasse (Abb. 14, S. 51) und Photosyntheserate (Abb. 15, S. 52) auf. Zudem wurde bei den Ertragsstrukturparametern eine dem Weizen tendenziell entsprechende Beeinflussung in Abhängigkeit von den Versuchsfaktoren festgestellt (Tab. 19, S. 54). Die unterschiedliche Anzahl Körner/Ähre war jedoch nicht signifikant. Der Kornertrag der Gerste wurde von den Versuchsfaktoren ebenfalls nicht beeinflusst. Diese Sachverhalte deuten darauf hin, dass die Gerste von dem Stickstoffeffekt der Luzerne in geringerem Maße beeinflusst wurde als der Weizen. Andernorts durchgeführte Versuche belegen eine stickstoffinduzierte Erhöhung des Kornertrags von Gerste, wenn diese unmittelbar nach Steigerung des Stickstoffangebots in der Fruchtfolge steht (SHAFI et al. 2011). Daher weisen die Ergebnisse der Untersuchungen im *CeFIT* darauf hin, dass der geringere Einfluss der Versuchsfaktoren auf Gerste verglichen mit Weizen zumindest teilweise auf der Fruchtfolgestellung beruht.

Analog zum Ertrag der zweiten Nachfrucht Wintergerste wurde der Kornertrag der dritten Nachfrucht Winterroggen von den Versuchsfaktoren nicht beeinflusst (Tab. 24, S. 60). Die erhöhte Stickstoffversorgung nach Luzerne bewirkte somit nicht eine andernorts festgestellte Steigerung des Ertrags von Roggen, die allerdings bei Roggen als erster Nachfrucht nach Luzerne festgestellt wurde (FOWLER et al. 1989). Die Ergebnisse der Untersuchungen an Gerste und Roggen im *CeFIT* bestätigen die oftmals dokumentierte Beobachtung, dass direkte Vorfruchtwirkungen das Wachstum von Nachfrüchten stärker beeinflussen als indirekte Vorfruchtwirkungen.

Die Untersuchungen an der allorhizen ersten Nachfrucht Futtermalve gaben Hinweise auf zumindest zeitweise erhöhte Werte von Sprossmasse (Abb. 7, S. 44) und Bestandesphotosyntheserate (Abb. 11, S. 47) nach Luzerne verglichen mit nicht-legumer Vorfrucht. Diese Beobachtungen deuten auf eine Stickstoffwirkung der Luzerne auf die Malve hin.

Im Unterschied zu den Getreiden war sowohl für Raps 2011 als auch für Raps 2012 die Hauptwirkung der Vorfrucht auf den Kornertrag signifikant. In beiden Jahren wurde nach Luzerne ein höherer Ertrag erzielt als nach mindestens einer nicht-legumenen Vorfrucht (Tab. 21, S. 58; Tab. 28, S. 69).

Eine mögliche Erklärung für die verglichen mit den Getreiden starke Reaktion der Rapsbestände im *CeFIT* ist, dass Dikotyle hinsichtlich des Wachstums der Blattspreite wesentlich stärker auf ein erhöhtes Stickstoffangebot reagieren als verschiedene Getreidearten (RADIN 1983; RATHKE et al. 2006). Die deutliche Erhöhung des BFI von Raps 2012 im *CeFIT* nach Luzerne verglichen mit Raps nach Wegwarte oder Rohrschwingel (Abb. 19, S. 62) ist somit entsprechend den Ergebnissen von andernorts durchgeführten Untersuchungen wahrscheinlich auf eine höhere Stickstoffversorgung zurückzuführen (SCOTT et al. 1973; ROOD & MAJOR 1984; RATHKE et al. 2006). An der dritten Nachfrucht Winterraps wurde nach Luzerne verglichen mit Wegwarte und Rohrschwingel in den Gaswechsellmessungen ein verzögerter Blattfall der Pflanzen festgestellt (nicht quantitativ erfasst). Andernorts erhobene Daten belegen, dass der nach der Blüte des Rapses üblicherweise schnell zurückgehende BFI einer der wichtigsten limitierenden Faktoren in der Ertragsbildung ist (DIEPENBROCK 2000). Die im *CeFIT* festgestellte Erhöhung der Sprossmasse zum Ende des Wachstums (Abb. 18, S. 61) und des Kornertrags (Tab. 28, S. 69) nach Luzerne verglichen mit Wegwarte und Rohrschwingel wurde daher vermutlich von einem erhöhten Stickstoffangebot verursacht. Entsprechende Zusammenhänge wurden auch in der Literatur beschrieben (ALLEN & MORGAN 1972). Für diese Schlussfolgerung spricht auch, dass der Raps 2012 nach Luzerne verglichen mit Raps nach Wegwarte und Rohrschwingel zum Ende der Entwicklung höhere Bestandesgaswechselraten aufwies (Abb. 22 - Abb. 25, S. 65 - 68). Damit übereinstimmend war die TKM von Raps als diejenige Ertragskomponente, die zuletzt in der Entwicklung determiniert wird (DIEPENBROCK 2000), nach Luzerne signifikant höher als nach beiden (2011) bzw. einer der beiden (2012) weiteren Vorfrüchte (Tab. 21, S. 58; Tab. 28, S. 69). Die vorgestellten Ergebnisse unterstützen nachdrücklich Hypothese 2.

Im Düngungssteigerungsversuch (DSV) wurden im Vergleich der nicht oder nur gering gedüngten Unterteilstücke nach Lu 3 die zumindest zeitweise höchste Sprossmasse und -länge, der höchste BFI, der höchste *SPAD-Value* sowie die höchste Stickstoffaufnahme gemessen (Tab. 34 - Tab. 37, S. 77 - 80). Zumeist wurden an Weizen nach Lu 1 geringere Unterschiede gegenüber Weizen nach Ww 1 und Ww 3 festgestellt. Diese Reihung entspricht der der Stickstoffmengen, die im Zuge der wiederholten Mulchschnitte in der Vorfrucht-Sprossmasse auf den Oberboden aufgebracht wurden (Tab. 4, S. 29). Damit übereinstimmend war die Reaktion auf zunehmende Stickstoffgaben nach Ww 1 am stärksten, nach Lu 3 am geringsten ausgeprägt. Bei mittlerer bis hoher Stickstoffdüngung traten keine Unterschiede zwischen den Weizenbeständen in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante auf. Dieser Sachverhalt weist darauf hin, dass die Hauptunterschiede zwischen den im DSV berücksichtigten Vorfruchtvarianten auf verschieden hohe residuale

Stickstoffmengen zurückzuführen sind. Die Ergebnisse des Düngungssteigerungsversuchs stehen somit im Einklang mit Hypothese 5.

In ähnlicher Weise wurden unterschiedliche Vorfruchteffekte in Abhängigkeit von der Vorfruchtart auch in Untersuchungen anderer Autoren durch gestaffelte Stickstoffdüngung zur Nachfrucht ausgeglichen (KÖPKE 1987; NEVENS & REHEUL 2002). Zur zweiten Zeiternte (Tab. 36, S. 79) und zur Endernte (Tab. 38, S. 81) wurden geringere Effekte der Düngergabe festgestellt als zur ersten Zeiternte (Tab. 34, S. 77). Dieser Umstand deutet auf einen im Zeitablauf abnehmenden Einfluss der einmalig applizierten Stickstoffdüngung unterschiedlicher Höhe hin.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass zahlreiche im *CeFIT* erhobene Versuchsergebnisse darauf hinweisen, dass ein Großteil der Vorfruchteffekte mit der Stickstoffwirkung der legumen Luzerne zu erklären ist.

Möglicherweise trat neben dem Stickstoffeffekt der Luzerne auch ein unterschiedlicher Einfluss der nicht-legumen Vorfrüchte Wegwarte und Rohrschwingel auf den Stickstoffhaushalt des Bodens auf. Potentielle Ursache für einen solchen Effekt könnte der Umstand sein, dass die Vorfrüchte am Versuchsstandort entgegen andernorts gemachter Beobachtungen (KUTSCHERA & LICHTENEGGER 1982; KUTSCHERA et al. 2009) keine ähnliche Durchwurzelungstiefe erreichten. Untersuchungen im Versuch B des *CeFIT* ergaben, dass 95 % der Gesamt-Wurzellänge von Ww 2 bis in eine Tiefe von 180 cm entfielen, während der gleiche Anteil an der Gesamt-Wurzellänge von Rs 1 bereits in den oberen 80 cm des Profils erreicht wurde (PERKONS et al. 2014b). Zudem war die Gesamt-Wurzellänge von Ww 2 (11,7 km m⁻²) größer als von Rs 1 (10,4 km m⁻²). Diese Ergebnisse lassen sich nur unter Vorbehalt dazu nutzen, allgemeine Aussagen über die Nährstoffaufnahme der Vorfrüchte im Versuch A abzuleiten. Es ist nicht sicher, ob die im Versuch B erhobenen Daten auch die Gegebenheiten der Vorfruchtphase im Versuch A zutreffend charakterisieren. In diesem Zusammenhang muss beachtet werden, dass sich beispielsweise die Dichte von Bioporen der Größenklasse 2 – 5 mm in den Versuchen A und B trotz gleicher Versuchsanlage signifikant unterschied. Dieser Sachverhalt ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass in den Versuchen die Bestandesdichte verschieden hoch war (HAN et al. 2015a). Zudem ist offen, ob die festgestellten Unterschiede zwischen den Vorfruchtvarianten vornehmlich von der Vorfruchtart oder von der Anbaudauer abhängen. Für eine dominante Rolle der Vorfruchtart spricht allerdings insbesondere, dass die vor allem durch Pflanzenwurzeln bestimmte Bioporendichte (KAUTZ et al. 2014a; PERKONS et al. 2014b) nicht von der Anbaudauer beeinflusst wurde (HAN et al. 2015a). Im Versuch A wurden keine Untersuchungen zur Wurzelentwicklung der Vorfrüchte durchgeführt. Falls den Annahmen entsprechend die Anbaudauer gegenüber der Vorfruchtart eine untergeordnete Rolle spielte und Wegwarte verglichen mit Rohrschwingel auch im Versuch A tiefer wurzelte sowie eine größere Gesamt-Wurzellänge ausbildete, war die Stickstoffaufnahme von Wegwarte im Unterboden wahrscheinlich höher als die des Rohrschwingels. Für diese Schlussfolgerung sprechen auch

die Ergebnisse einer andernorts vorgenommenen Untersuchung zur Nährstoffaufnahme u. a. von Luzerne, Wegwarte und Deutschem Weidelgras (WITTER & JOHANSSON 2001). Durch die wiederholten Mulchschnitte könnte der von Wegwarte im Unterboden aufgenommene Stickstoff dem Oberboden zugeführt und somit dort angereichert worden sein. Dieser Vorgang wurde ebenfalls im erwähnten andernorts durchgeführten Versuch festgestellt (WITTER & JOHANSSON 2001). Im Unterschied dazu könnte im Falle von Rohrschwengel bei insgesamt geringeren zugänglichen Stickstoffmengen der Anteil des zyklierten Stickstoffs aus dem Oberboden größer gewesen sein. In eine ähnliche Richtung deutet die Beobachtung, dass die Sprossmasseerträge des Rohrschwengels im jeweiligen Ansaatjahr tendenziell von 2007 über 2008 bis 2009 zurückgingen, während die Sprossmasseerträge von Wegwarte im jeweiligen Ansaatjahr diesen Trend nicht aufwiesen (Tab. 3, S. 28). Dieser Sachverhalt könnte dadurch bedingt sein, dass Wegwarte im Vergleich zu Rohrschwengel ein größeres Bodenvolumen und infolge dessen höhere Nährstoffmengen erschließen konnte.

Die Vor-Vorfrüchte Sommerroggen (2007) bzw. Sommerroggen (2007) und Hafer (2008), die vor den zwei- bzw. einjährig angebauten Vorfrüchten kultiviert wurden, blieben ungedüngt. Den Nährstoffentzügen stand lediglich eine Düngung von 50 kg N ha^{-1} im Jahr 2009 zu den einjährig kultivierten nicht-legumen Vorfrüchten Wegwarte und Rohrschwengel gegenüber, so dass vermutlich ein Netto-Stickstoffexport aus den entsprechenden Parzellen vorlag. Dieser Sachverhalt könnte den vermuteten Einfluss der unterschiedlichen Durchwurzelungstiefe der Vorfrüchte auf die Stickstoffversorgung der Futterpflanzenbestände verstärkt haben. Eine entsprechende Abstufung der N_{min} -Menge im Boden nach Wegwarte verglichen mit Rohrschwengel wurde nach Ende der Vorfruchtphase Anfang 2010 jedoch nicht festgestellt (Anhang-Tab. 12, S. 159). Zusätzlich muss in diesem Zusammenhang beachtet werden, dass die potentiell unterschiedliche Stickstoffverfügbarkeit nach Wegwarte verglichen mit Rohrschwengel unter gleich hohen Stickstoffgaben zu den Nachfrüchten in keiner Untersuchung zu signifikanten Unterschieden in deren Wachstum führte (Kap. 4.2.9, S. 72). Aufgrund der ähnlichen Wurzelmorphologie von Wegwarte und Luzerne könnte auch Luzerne verglichen mit Rohrschwengel eine bessere Zugänglichkeit zu Stickstoff im Unterboden gehabt haben. Analog zu Wegwarte könnte daher auch Luzerne im Zuge der Mulchschnitte eine Anreicherung von aus dem Unterboden aufgenommenen Stickstoff im Oberboden verursacht haben. Bei der legumen Luzerne überwog aber gewiss die Bedeutung der biologischen Stickstofffixierung gegenüber der Stickstoffaufnahme aus dem Unterboden.

Mit zunehmender Anbaudauer der Vorfrucht nahm die über die gesamte Kultur kumulierte Nährstoffaufnahme der Futterpflanzen, und damit die durch die Mulchschnitte bedingte Nährstoffzufuhr in den Oberboden, deutlich zu (Tab. 4 - Tab. 6, S. 29 - 30). Dennoch beeinflusste die Anbaudauer der Vorfrucht in keinem Fall als Hauptwirkung die Stickstoffaufnahme der Nachfrüchte (Tab. 15, S. 41; Tab. 18, S. 50; Tab. 20, S. 56; Tab. 22, S. 59; Tab. 25, S. 61; Tab. 29, S. 70). Allerdings war der Effekt teilweise in Wechselwirkung mit dem Faktor Vorfruchtart oder als entsprechender Trend erkennbar. Die insgesamt

geringe Wirkung des Faktors Anbaudauer der Vorfrucht entspricht den Ergebnissen einer Untersuchung in Kanada, in der die Anbaudauer von Luzerne (zwei bis sechs Jahre) keinen Einfluss auf die Erträge der fünf folgenden Nachfrüchte hatte (HOYT & HENNIG 1971). Dieser Sachverhalt wurde vermutlich dadurch begründet, dass die biologische Stickstofffixierung der Luzerne bei hoher bodenbürtiger Stickstoffverfügbarkeit reduziert wird (KELNER et al. 1997). Unter trockenen Bedingungen mit verzögertem Mulchabbau oder auf mindergünstigen Standorten wurde wiederholt keine Reduzierung der biologischen Stickstofffixierung von Futterleguminosen festgestellt (PIETSCH et al. 2007; DAHLIN & STENBERG 2009). Unter den Bedingungen des *CeFiT* waren zu den Zeitpunkten der Mulchschnitte jedoch nur noch vereinzelt Mulchrückstände der vorhergehenden Mulchschnitte sichtbar. Es ist daher davon auszugehen, dass der zügige Mulchabbau zu Nährstofffreisetzung sowie Rezyklierung von Stickstoff und infolgedessen zu verminderter biologischer Stickstofffixierung führte, worauf auch andernorts durchgeführte Versuche mit Klee-Gras-Mulch hindeuten (HATCH et al. 2007). Daher hatte die Anbaudauer vermutlich nur einen geringen Einfluss auf die Menge an residualem Stickstoff im Boden nach Luzerne. Diese Vermutung wird durch die festgestellten Unterschiede der N_{\min} -Menge im Boden zu Beginn der Nachfruchtphase unterstützt (Anhang-Tab. 12, S. 159).

Die diskutierten Untersuchungsergebnisse sprechen in ihrer Gesamtheit dafür, dass nach Luzerne verglichen mit Wegwarte und Rohrschwingel ein über mindestens drei Jahre andauerndes, relevant höheres Stickstoffangebot gegeben war. Die Ausgleichsdüngungen in den Jahren 2010 und 2011 zu den ersten und zweiten Nachfrüchten nach den nicht-legumen Vorfrüchten Wegwarte und Rohrschwingel kompensierten die höhere Stickstoffnachlieferung nach Luzerne demnach nicht vollumfänglich. Bezogen auf den Faktor Vorfruchtart deutet die Auswertung der Häufigkeiten der einzelnen Signifikanzabstufungen darauf hin, dass die Stickstoffnachlieferung die wichtigste Vorfruchtwirkung war und in allen drei untersuchten Nachfruchtjahren die Pflanzenbestände beeinflusste. Diese Schlussfolgerung wird von Ergebnissen anderer Untersuchungen unterstützt, in denen nach Luzerne gegenüber Brache eine bis zur fünften Nachfrucht höhere Stickstoffaufnahme und Ertragssteigerungen der Nachfrüchte festgestellt wurden (BOAWN et al. 1963; HOYT & HENNIG 1971).

5.1.2 Phosphor und Kalium

Bei Sommerweizen, Wintergerste und Raps 2012 wurde nach Luzerne zumindest zeitweilig eine höhere Phosphoraufnahme als nach Wegwarte und/oder Rohrschwingel festgestellt (Tab. 15, S. 41; Tab. 20, S. 56; Tab. 29, S. 70). Sommerweizen, Futtermalve sowie Raps 2011 und Raps 2012 wiesen nach Luzerne mindestens vorübergehend eine höhere Kaliumaufnahme auf als nach Wegwarte und/oder Rohrschwingel (Tab. 15, S. 41; Tab. 18, S. 50; Tab. 22, S. 59; Tab. 29, S. 70). Alle vorgenannten Kulturen bildeten nach Luzerne vermutlich infolge erhöhter Stickstoffversorgung eine höhere Spross- bzw. Korntrockenmasse als nach zumindest einer nicht-legumen Vorfrucht (Kap. 5.1.1). Daher ist

anzunehmen, dass die bei diesen Kulturen festgestellte erhöhte Aufnahme von Phosphor und Kalium zumindest teilweise eine indirekte Folge der Stickstoffwirkung von Luzerne war. Zudem sind Leguminosen durch Exsudation in hohem Maße in der Lage, direkt oder indirekt über Förderung von Mikroorganismen verschiedene Phosphorverbindungen im Boden pflanzenverfügbar zu machen (HALLAMA et al. 2018). Daher ist auch eine erhöhte Phosphorverfügbarkeit als Vorfruchteffekt der Luzerne wahrscheinlich (Kap. 5.2.1, Abschnitt ii), S. 101f.). Vereinzelt wurde zudem nach Luzerne und/oder Wegwarte verglichen mit Rohrschwengel ein höherer Phosphor- oder Kaliumgehalt in der Sprosstrockenmasse der Nachfrüchte festgestellt (Anhang-Tab. 11, S. 158; Anhang-Tab. 19, S. 162; Anhang-Tab. 28, S. 166; Anhang-Tab. 32, S. 168; Anhang-Tab. 33, S. 169; Anhang-Tab. 44, S. 173). Dieser Umstand deutet darauf hin, dass die allorhizen Vorfrüchte verglichen mit dem homorhizen Rohrschwengel auch einen wurzelmorphologisch bedingt günstigen Einfluss auf die Verfügbarkeit von Phosphor und Kalium gehabt haben könnten. Dieser Effekt könnte analog zu Stickstoff (Kap. 5.1.1) durch Erschließung unterbodenbürtiger Nährstoffe durch die verglichen mit Rohrschwengel tiefwurzelnden Vorfrüchte Luzerne und Wegwarte bewirkt worden sein. Es war im Feldversuch jedoch nicht quantifizierbar, in welchem Umfang die allorhizen Vorfrüchte Nährstoffe aus dem Unterboden aufnahmen. Eine eventuelle Nährstoffanreicherung im Oberboden durch die allorhizen Vorfrüchte verursachte keine messbaren Unterschiede zwischen Werten der Phosphor- und Kaliumgehalte im Boden nach Ende der Vorfruchtphase in Abhängigkeit von ausgewählten Vorfruchtvarianten (Tab. 7 - Tab. 8, S. 31). Analog zu diesem Befund traten keine signifikanten Unterschiede im Wachstum der Nachfrüchte in Abhängigkeit von der nicht-legumen Vorfrucht (Wegwarte verglichen mit Rohrschwengel) auf (Kap. 4.2.9).

In gleicher Weise wie bei Stickstoff hatte die Anbaudauer zwar einen Einfluss auf die im Zuge der Mulchschnitte auf den Oberboden aufgebrachte Menge an Phosphor und Kalium (Tab. 5 - Tab. 6, S. 30), doch wurden keine Unterschiede zwischen Werten der Phosphor- und Kaliumaufnahme der Nachfrüchte in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht festgestellt (Tab. 15, S. 41; Tab. 18, S. 50; Tab. 20, S. 56; Tab. 22, S. 59; Tab. 25, S. 61; Tab. 29, S. 70). Im Unterschied dazu wurden, teilweise nur tendenziell oder in Wechselwirkung mit dem Faktor Vorfruchtart, vereinzelt nach mehrjähriger verglichen mit einjähriger Vorfrucht höhere Nährstoffgehalte in der Sprosstrockenmasse der Nachfrüchte festgestellt (Anhang-Tab. 11, S. 158; Anhang-Tab. 19, S. 162; Anhang-Tab. 28, S. 166; Anhang-Tab. 32, S. 168; Anhang-Tab. 33, S. 169; Anhang-Tab. 44, S. 173). Dieser Sachverhalt deutet darauf hin, dass die Anbaudauer der Vorfrucht einen, wenn auch nur geringen, Einfluss auf die Nährstoffverfügbarkeit hatte.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass nährstoffbezogene Vorfruchteffekte mit Ausnahme der Stickstoffwirkung der Luzerne nur schwach ausgeprägt waren. In diesem Zusammenhang muss jedoch auch berücksichtigt werden, dass der Standort eine hohe Nährstoffversorgung aufwies. Sowohl für Phosphor als auch für Kalium wurde die Gehaltsklasse E „sehr hoch“ festgestellt (Tab. 7 - Tab. 8, S. 31). Daher ist es wahrscheinlich, dass die Erschließung von Phosphor und Kalium aus der Festphase des Unterbodens durch ohnehin günstige Nährstoffverfügbarkeit am Standort überdeckt wurde. Die Relevanz der Effekte war in der vergleichsweise kurzen Versuchsdauer methodisch nicht abzubilden. Längerfristige Untersuchungen könnten dagegen die kumulierte Wirkung von Effekten aufzeigen, die die Erschließung jährlich geringer Mengen von Phosphor und/oder Kalium aus der Festphase des Bodens verursachen würde.

5.2 Bioporenassoziierte Vorfruchteffekte und Relevanz des Unterbodens für das Pflanzenwachstum

5.2.1 Nährstoffe: Bildung und Nutzung von *hot spots* in der Drilosphäre

Mithilfe des Versuchs zu Deposition und Wiederaufnahme von Stickstoff sollten Rückschlüsse auf eine mögliche Nährstoffaufnahme der ersten Nachfrüchte Sommerweizen und Malve aus dem Unterboden gezogen werden. In diesem Versuch wurde festgestellt, dass der ^{15}N -Anteil des Spross-Stickstoffs beider Nachfrüchte aus den markierten Unterteilstücken höher war als der ^{15}N -Anteil des Spross-Stickstoffs der jeweiligen Kultur aus den Kontrollflächen (Abb. 27, S. 85). Der in der Depositionsphase ^{15}N -markierte Boden der Tiefenstufe 0–45 cm wurde vor der Kultur der Nachfrüchte gegen unmarkierten ausgetauscht. Daher wies der Oberboden der Unterteilstücke wie die Kontrollflächen den standorttypischen ^{15}N -Anteil des Gesamt-Stickstoffs auf. Aus diesem Grund ist der erhöhte ^{15}N -Anteil des Spross-Stickstoffs der Pflanzen aus Unterteilstücken vermutlich auf Nährstoffaufnahme aus einer Tiefe unterhalb von 45 cm zurückzuführen. Dabei muss beachtet werden, dass das Isotop ^{15}N gegenüber dem Isotop ^{14}N in verschiedenen Prozessen, u. a. bei der Stickstoffmineralisierung, diskriminiert wird (SHEARER & KOHL 1986). Der ^{15}N -Anteil der Stickstoffaufnahme von Pflanzen ist daher stets geringer als der ^{15}N -Anteil des Boden-Stickstoffs. Dieser Effekt wurde auch im *CeFIT* festgestellt. In der nicht markierten Kontrollfläche war der ^{15}N -Anteil des Boden-Stickstoffs (Abb. 26, S. 84) höher als der des Spross-Stickstoffs der Nachfrüchte (Abb. 27, S. 85).

Der ^{15}N -Anteil im Spross-Stickstoff der Nachfrüchte aus den markierten Unterteilstücken (Abb. 26, S. 84) war zudem höher als im *bulk*-Boden der markierten Unterteilstücke (Abb. 27, S. 85). Dieser Sachverhalt weist darauf hin, dass in den Unterteilstücken eine Stickstoffaufnahme aus der im Vergleich zum *bulk*-Boden ^{15}N -reichen Drilosphäre stattfand. Der exakte Anteil des aus der Drilosphäre aufgenommenen Stickstoffs war allerdings nicht zu bestimmen, ebenso ließ sich der Anteil unterbodenbürtiger Stickstoffaufnahme rechnerisch nur in einem sehr weiten Bereich (ca. 3 – 100 %) angeben (Kap. 4.4.2, S. 84, insbesondere

Tab. 41, S. 87). Die Ursache für beide Sachverhalte liegt darin, dass der ^{15}N -Anteil des aus der Drilosphäre aufgenommenen Stickstoffs nicht bestimmbar war. Unter der Annahme, dass die unterbodenbürtige Stickstoffaufnahme hauptsächlich aus der Drilosphäre realisiert wurde und in der Drilosphäre die Stickstoffaufnahme aus dem Boden mit einer Mächtigkeit von ca. 2 mm um die Wurzel herum erfolgte, würde der in der abgelösten Porenwandung gemessene ^{15}N -Anteil in etwa dem ^{15}N -Anteil des aus dem Unterboden aufgenommenen Stickstoffs entsprechen. Auf Grundlage dieser Schätzung wurde ein unterbodenbürtiger Anteil an der gesamten Stickstoffaufnahme der Nachfrüchte in Abhängigkeit von Nachfruchtart und Pflanzenteil von ca. 35 – 55 % berechnet (Tab. 41, S. 87). Sowohl die Stickstoffaufnahme aus dem *bulk*-Boden unterhalb von 45 cm Bodentiefe als auch ein geringerer Anteil von ^{15}N der Stickstoffaufnahme aus der Drilosphäre würden im linearen Gleichungssystem (Kap. 3.6) rechnerisch zu höheren Werten der unterbodenbürtigen Stickstoffaufnahme führen, so dass die Schätzung zunächst als konservativ anzusehen ist. Dennoch wäre ein Anteil der Stickstoffaufnahme aus dem Unterboden an der gesamten Stickstoffaufnahme im Bereich von einem Drittel bis zur Hälfte unter den Bedingungen des *CeFIT* untypisch hoch und daher kritisch zu hinterfragen. Trotz dieses Vorbehalts unterstützen die Ergebnisse insgesamt Hypothese 8.

Ein hoher Anteil an unterbodenbürtiger Stickstoffaufnahme von Sommerweizen und Malve könnte im Versuch durch eine geringe Verfügbarkeit des Stickstoffs im Oberboden begünstigt worden sein. Eine mögliche Ursache dafür könnte die durch unterdurchschnittlich geringe Niederschläge im ersten Halbjahr 2010 ausgelöste geringe Bodenfeuchte im Oberboden sein (Tab. 2, S. 12). Ein solcher Effekt wurde bereits andernorts beobachtet (KUHLMANN et al. 1989) und weist darauf hin, dass die Bedeutung der Drilosphäre als potentieller *hot spot* der Nährstoffaufnahme von weiteren Bedingungen, u. a. der Wasserverfügbarkeit im Oberboden, abhängig ist. Dieser *hot spot* kann in Verbindung mit dem oder teilweise als Kompensation für den Oberboden ein relevanter Ort der Nährstoffaufnahme sein.

Die Ergebnisse des Versuchs zu Deposition und Wiederaufnahme von Stickstoff unterstützen die vielfach gemachte Beobachtung, dass der Unterboden und insbesondere die Drilosphäre von dort lokalisierten Bioporen erheblich zur Pflanzenernährung beitragen können. In diesem Zusammenhang sind mehrere mögliche Vorfruchteffekte von Bedeutung. Zum einen stellt die jeweils charakteristische Beeinflussung des Bodengefüges durch ein Wurzelsystem einen sehr wichtigen Vorfruchteffekt dar, insbesondere die Vorprägung von großlumigen Bioporen ist von Bedeutung (YUNUSA et al. 2002; McCALLUM et al. 2004). Zum anderen ist eine Deposition von Stickstoff und weiteren Nährstoffen im Unterboden relevant.

Die Höhe der Nährstoffaufnahme aus der Drilosphäre des Unterbodens durch Pflanzenbestände ist von mehreren Faktoren abhängig. Dazu zählen:

- i) Bioporendichte
- ii) Eintrag von Nährstoffen und organischer Substanz in die Drilosphäre
- iii) Wurzeln in Bioporen mit Kontakt zur Porenwandung

Eine systematische Steigerung der Bedeutung der Drilosphäre des Unterbodens ist nur dann möglich, wenn einzelne Faktoren gezielt beeinflusst werden können.

i) Bioporendichte

Untersuchungen anderer Forscher im *CeFiT* ergaben Hinweise darauf, dass die Futterpflanzen unterschiedliche Vorfruchteffekte hinsichtlich der Bioporengese im Unterboden hatten. So deuten Ergebnisse von Bioporenzählungen sowohl im Versuch A als auch im Versuch B darauf hin, dass in der Vorfruchtphase unterschiedliche Bioporendichten in Abhängigkeit von der Vorfruchtart generiert wurden (KAUTZ et al. 2014a; HAN et al. 2015a; HAN et al. 2017). Im Versuch A wurden nach Wegwarte mit 312 Bioporen m^{-2} mehr Poren in der Größenklasse 2 – 5 mm als nach Rohrschwengel mit 234 Bioporen m^{-2} festgestellt, während nach Luzerne (271 Bioporen m^{-2}) eine mittlere Dichte erfasst wurde. Die Anzahl der Bioporen mit einem Äquivalenzdurchmesser von > 5 mm wies tendenziell die gleiche Abstufung auf, so dass die Gesamtzahl der Bioporen mit einem Äquivalenzdurchmesser von ≥ 2 mm nach Wegwarte mit 465 Bioporen m^{-2} signifikant größer war als nach Luzerne mit 406 Bioporen m^{-2} und Rohrschwengel mit 356 Bioporen m^{-2} . Im Versuch B wurde dagegen sowohl für die Größenklasse 2 – 5 mm als auch für die Größenklasse > 5 mm die höchste Bioporendichte nach Luzerne festgestellt (HAN et al. 2015a). In beiden Versuchen hatte die Anbaudauer der Vorfrucht keinen Einfluss auf die Bioporendichte (KAUTZ et al. 2014a; HAN et al. 2015a).

Weitere Untersuchungen in beiden Versuchen des *CeFiT* gaben Hinweise darauf, dass die Vorfruchtbestände neben direkten gefügeverändernden Vorfruchtwirkungen durch Vorprägung von Bioporen auch durch Förderung der Regenwurmpopulation Einfluss auf die Makroporosität des Bodens hatten. Wiederholte Zählungen deuteten darauf hin, dass nach mehrjährigem verglichen mit einjährigem Anbau der Vorfrüchte eine erhöhte Regenwurmpopulation vorhanden war (KAUTZ et al. 2011; KAUTZ et al. 2014a; HAN et al. 2015a). Im Unterschied dazu hatte die Vorfruchtart keinen konsistenten Einfluss auf die Regenwurmabundanz. Die Zunahme der Regenwurmpopulation ist somit unter der Voraussetzung eines in allen Varianten reichen Futterangebots durch wiederholte Mulchschnitte insbesondere als Folge der Bodenruhe zu interpretieren. Auch in andernorts vorgenommenen Untersuchungen wurden die Faktoren Bodenruhe (ERNST & EMMERLING 2009; KUNTZ et al. 2013) und Futtermittelverfügbarkeit (GRAFF 1970; SHIPITALO et al. 1988) als wichtigste Determinanten für die Regenwurmpopulation identifiziert. Diese Einschätzung wurde auch durch die Beobachtung bestätigt, dass die Regenwurmpopulation im *CeFiT* nach

wiederholtem Einsatz von Grubber und Pflug sowie Wegfall der Mulchschnitte bis zum Ende des ersten Nachfruchtjahres wieder deutlich zurückging (KAUTZ et al. 2014a).

Der Anteil der von Regenwürmern bewohnten Poren an der Gesamtzahl der Poren ≥ 2 mm betrug in Abhängigkeit von der Variante 2–9 %. Der Beitrag der Regenwürmer zur Bioporengese im Vergleich mit Pflanzenwurzeln war im *CeFIT* nicht signifikant und wurde als klein angesehen (KAUTZ et al. 2014a; PERKONS et al. 2014b).

Für die Nutzung von Ressourcen der Drilosphäre war neben der vorfruchtbedingten Porengese entscheidend, dass Nährstoffe in die Drilosphäre eingelagert wurden. Weiterhin war es notwendig, dass Wurzeln in der Biopore wuchsen und Kontakt zur Porenwandung hatten.

ii) Eintrag von Nährstoffen und organischer Substanz in die Drilosphäre

Im Versuch zu Deposition und Wiederaufnahme von Stickstoff wurde in der Drilosphäre ein höherer Stickstoff-*tracer*-Gehalt gefunden als im umgebenden *bulk*-Boden (Abb. 26, S. 84). Die untersuchten großlumigen Bioporen waren wahrscheinlich Wohnröhren von tiefgrabenden Regenwürmern. Daher wird angenommen, dass *L. terrestris* als einzige im *CeFIT* vorkommende tiefgrabende Regenwurmart durch Einzug von Mulch in Regenwurmröhren sowie durch Auskleidung der Röhren mit Kot den Großteil des *tracer*-Eintrags in die Drilosphäre verursachte. Zusätzlich ist davon auszugehen, dass der auf der Bodenoberfläche aufliegende Mulch bereits Abbauprozessen unterworfen war. Unter dieser Voraussetzung ist es möglich, dass *tracer* auch durch Einwaschung infolge von Niederschlag in unterschiedliche Bodenkompimente eingetragen wurde, wie auch andernorts festgestellt wurde (BINET & TREHEN 1992).

Die Stickstoffdeposition nahm mit zunehmender Bodentiefe ab (Abb. 26, S. 84). Aufgrund der festgestellten Werte kann angenommen werden, dass der Eintrag mindestens bis in die Tiefenstufe von 75 - 105 cm erfolgte, möglicherweise auch darunter (Kap. 5.3). Dieser Sachverhalt bestätigt die Hypothesen 6 und 7.

Die Ergebnisse stimmen mit Befunden anderer Versuche überein, in denen mit zunehmender Tiefe abnehmende Nährstoffgehalte in der Regenwurmröhrenwandung festgestellt wurden (LUNT & JACOBSON 1944; GRAFF 1970). Darüber hinaus entsprechen sie Ergebnissen von anderen Autoren, die in der Wandung von Regenwurmröhren höhere Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte nachwiesen als im *bulk*-Boden (GRAFF 1970; ATHMANN et al. 2014).

Andere Forscher verglichen im *CeFIT* die Eigenschaften der Porenwandung von Regenwurmröhren mit regenwurmfreien Wurzelkanälen unter Wegwartebeständen. Dabei wurde festgestellt, dass in Regenwurmröhren ein höherer Anteil von mikrobieller Biomasse am gesamten organisch gebundenen Kohlenstoff vorhanden war (HOANG et al. 2016). Darüber hinaus war die Aktivität von verschiedenen Enzymen erhöht, so dass die Drilosphäre von Regenwurmröhren als besonders aktiver *hot spot* für mikrobielle Aktivität bezüglich der

Umsetzung von Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor im Unterboden charakterisiert wurde (HOANG et al. 2016).

Der Nährstoffeintrag in die Drilosphäre durch tiefgrabende Regenwürmer weist darauf hin, dass eine höhere Individuendichte von Regenwürmern zu einem höheren flächenbezogenen Nährstoffeintrag in den Unterboden führen kann. Während deutschlandweit die mittlere Abundanz von *L. terrestris* mit 9,9 Individuen m^{-2} angegeben wird (DINTER et al. 2012), wurden im *CeFiT* zwischen 3 und 37 Regenwürmer m^{-2} gefunden (KAUTZ et al. 2014a). Im Unterschied dazu wurden auf einem langjährig pfluglos bewirtschafteten Feld bis zu 60 Individuen m^{-2} von *L. terrestris* gezählt (PELOSI et al. 2008), in Wiesen in Abhängigkeit von der Jahreszeit sogar ca. 120 bis 320 Individuen m^{-2} (DANIEL 1992). In Übereinstimmung mit Untersuchungen zur Beeinflussung von Regenwurmpopulationen (EHLERS 1975b; ERNST & EMMERLING 2009; KUNTZ et al. 2013) weisen die genannten Ergebnisse darauf hin, dass die Bodenbearbeitung von entscheidender Bedeutung für die Individuendichte von *L. terrestris* ist. Dieser Umstand spricht dafür, dass der mögliche Beitrag der Drilosphäre für die Pflanzenernährung, und damit die Bedeutung der Regenwurmröhrendichte auf Standorten mit ausbleibender oder regenwurmschonender Bodenbearbeitung, erheblich höher sein könnte als im *CeFiT*.

Im *CeFiT* wurde von anderen Forschern zudem untersucht, ob Unterschiede zwischen den von Pflanzenwurzeln generierten Bioporen in Abhängigkeit von der Vorfruchtart bestanden. Dabei wurde überprüft, ob die wurzelmorphologisch ähnlichen Vorfrüchte Luzerne und Wegwarte nur hinsichtlich der unterschiedlichen Stickstoffwirkung, oder auch in Bezug auf weitere Aspekte verschiedenen Einfluss auf die Drilosphäre und den Unterboden hatten. Untersuchungen zum Eintrag von Kohlenstoff in den Boden durch Luzerne und Wegwarte ergaben, dass während einer 150 Tage langen Untersuchungsdauer erhebliche Unterschiede auftraten. Der gesamte Kohlenstoffeintrag als Summe von Wurzelbiomasse und Netto-Rhizodeposition wurde im Falle von Luzerne auf $3.940 \text{ kg C ha}^{-1}$ in den Oberboden (0 - 30 cm) und $3.830 \text{ kg C ha}^{-1}$ in den Unterboden (30 – 105 cm) geschätzt (HAFNER & KUZYAKOV 2016). Im Unterschied dazu betrug der Kohlenstoffeintrag von Wegwarte $2.480 \text{ kg C ha}^{-1}$ in den Oberboden sowie nur 470 kg C ha^{-1} in den Unterboden. Insbesondere im substratarmen Unterboden kann der verglichen mit Wegwarte höhere Kohlenstoffeintrag der Luzerne zur Bildung von mikrobiellen *hot spots* führen, die die Nährstoffaufnahme erleichtern (HAFNER & KUZYAKOV 2016). Dieser Sachverhalt könnte das Wachstum der Nachfrüchte zusätzlich stimuliert haben. Die Relevanz des hohen Kohlenstoffeintrags der Luzerne für die Entwicklung der Nachfrüchte kann nicht von der Stickstoffwirkung der Vorfrucht abgegrenzt werden. Da ein Großteil der von der Vorfruchtart generierten Variantenunterschiede einen eindeutigen Bezug zu Stickstoff hat, wird die Stickstoffwirkung jedoch als dominierender Vorfruchteffekt der Luzerne im *CeFiT* angesehen.

Im *CeFiT* waren am Ende der Vorfruchtphase Bioporen mit unterschiedlichen Eigenschaften vorhanden. Von allen Bioporen wiesen Regenwurmgänge dabei die höchsten Nährstoffgehalte und -verfügbarkeiten in der Drilosphäre auf. Somit wurden potentiell besonders aktive *hot spots* für die Nährstoffaufnahme von Pflanzen generiert, die sich zudem durch hohe mikrobielle Aktivität und vergleichsweise leichte Zugänglichkeit für Nachfrüchte auszeichneten. Im *CeFiT* hatten Regenwürmer somit insbesondere einen Einfluss auf die Eigenschaften von Bioporen, während ihr Beitrag zur Bioporengese gering war. Die von Pflanzenwurzeln gebildeten, regenwurmfreien Bioporen wiesen hinsichtlich des Eintrags von organisch gebundenem Kohlenstoff und Nährstoffen verglichen mit dem *bulk*-Boden günstigere Bedingungen für Nachfrüchte auf, erreichten jedoch nicht die Eigenschaften von Regenwurmröhren. Die von Luzerne gebildeten Bioporen erfuhren verglichen mit Wegwarte höhere Zufuhren an organisch gebundenem Kohlenstoff und Stickstoff, so dass sie als günstiger für Nachfrüchte anzusehen sind.

iii) Wurzeln in Bioporen mit Kontakt zur Porenwandung

Bei der destruktiven Beprobung von Bioporen im Rahmen des Versuchs zu Deposition und Wiederaufnahme von Stickstoff wurden vielfach Wurzeln in Bioporen gefunden, die zum Großteil Kontakt zur Porenwandung hatten (es erfolgte keine quantitative Erfassung).

Eingehende Untersuchungen im Versuch A des *CeFiT* zum Anteil von Wurzeln innerhalb gegenüber außerhalb von Bioporen zeigten Unterschiede in Abhängigkeit von der Nachfruchtart. Für die ersten Nachfrüchte Sommerweizen und Malve nach allorhizen Vorfrüchten wurde festgestellt, dass maximal 18 % der Wurzeln in Bioporen wuchsen (PERKONS et al. 2014a). Allerdings war ein tiefenstufenabhängig teils signifikant höherer Anteil der Wurzellängendichte von Malve (2010) gegenüber Weizen (2010) in Bioporen lokalisiert. Untersuchungen an der zweiten Nachfrucht Gerste (2011) ergaben, dass in Abhängigkeit von der Tiefe maximal 25 % der Wurzeln im Unterboden in Bioporen wuchsen (KAUTZ et al. 2013a). Im Versuch B lieferten Untersuchungen zum Anteil der Wurzellänge innerhalb von Bioporen an der Gesamt-Wurzellänge Ergebnisse, die sich deutlich von denen im Versuch A unterschieden. So wurde im Versuch B bei der ersten Nachfrucht Sommerweizen ein maximaler Anteil von Wurzeln innerhalb von Bioporen an der Gesamt-Wurzellänge von < 10 % festgestellt. Im Unterschied dazu waren bei den zweiten Nachfrüchten Wintergerste (2013) und Winterraps (2013) im Versuch B ein deutlich höherer Anteil von > 40 % bzw. > 30 % der Gesamt-Wurzellänge innerhalb von Bioporen lokalisiert als in den erwähnten Ergebnissen aus dem Versuch A (KAUTZ et al. 2013a; HAN et al. 2017). Die Autoren schließen daher, dass die Bewurzelung von Bioporen in hohem Maße von Poreneigenschaften, Pflanzenart, Anbaudauer und Standort abhängt (HAN et al. 2015b). Die unterschiedlichen Anteile der Wurzellänge innerhalb von Bioporen an der Gesamt-Wurzellänge in Abhängigkeit von Versuch A verglichen mit Versuch B weisen darauf hin, dass zudem Jahreseinflüsse u. a. hinsichtlich der Wasserführung des Bodens und des damit zusammenhängenden Eindringwiderstandes einen erheblichen Einfluss haben.

Weitere Boden- und Wurzeluntersuchungen im *CeFit* unter Gerste zum Zusammenhang von Nährstoffgehalt der Porenwandung und Wurzellängendichte in der Pore gaben Hinweise auf eine nährstoffinduzierte Beeinflussung des Wurzelwachstums (KAUTZ et al. 2014b). Obwohl keine Korrelation zwischen Kohlenstoff- und Stickstoffgehalten in der Porenwandung und der Wurzellängendichte in der Pore bestand, wurden in Poren mit hohem Stickstoffgehalt in der Drilosphäre signifikant mehr Wurzeln gefunden als in solchen mit geringem Stickstoffgehalt (KAUTZ et al. 2014b). Diese Ergebnisse unterstützen eine in der Literatur geäußerte Annahme, nach der Wurzeln aufgrund von verglichen mit dem *bulk*-Boden geringerem Eindringwiderstand und höherer Nährstoffgehalte in Poren wachsen (STEWART et al. 1999).

Im Versuch A wurden trotz der günstigen Bedingungen in der Drilosphäre in keiner Untersuchung nach Wegwarte höhere Nährstoffaufnahmen als nach Rohrschwengel festgestellt (Tab. 15, S. 41; Tab. 18, S. 50; Tab. 20, S. 56; Tab. 22, S. 59; Tab. 25, S. 61; Tab. 29, S. 70). Auch hinsichtlich anderer Parameter wurde kein klarer Hinweis darauf festgestellt, dass die bezogen auf die Prägung mittel- und großlumiger Bioporen effektivste Vorfrucht Wegwarte günstiger war als die am wenigsten effektive Vorfrucht Rohrschwengel (Kap. 4.2.9, S. 72). Dieser Aspekt steht nicht im Einklang mit Hypothese 1.

Im Unterschied dazu zeigten Untersuchungen im Versuch B, dass Sommerweizen (2012) nach Ww 2 mehr Phosphor aufnahm als nach Rs 2 (HAN et al. 2015b). Die zweite Nachfrucht Wintergerste (2013) nahm in ähnlicher Weise im Versuch B nach Ww 2 bis zur Blüte mehr Kalium auf als nach Rs 2 (HAN et al. 2017). Die Autoren interpretieren diese Ergebnisse als Hinweise auf eine erhöhte Nutzbarkeit von Nährstoffen in der Drilosphäre. Es bleibt jedoch unklar, warum der Sommerweizen im Versuch B bei geringem Anteil von Wurzeln in Bioporen (< 10 %) auf erleichterte Nährstoffaufnahme aus der Drilosphäre reagierte, während im Versuch A bei höherem Anteil von Wurzeln in Bioporen (bis 18 % (PERKONS et al. 2014a)) keine entsprechenden signifikanten Unterschiede festgestellt wurden (Tab. 15, S. 41; Tab. 16, S. 42). Zudem ist auch bei der Interpretation der Ergebnisse des Versuchs B zu bedenken, dass analog zu Versuch A die Gesamtaufnahme von Stickstoff, Phosphor und Kalium von Ww 2 verglichen mit Rs 2 signifikant höher war (HAN et al. 2015b) und im Zuge der wiederholten Mulchschnitte zu einer verbesserten Nährstoffversorgung der Getreide beigetragen haben könnte. Im Unterschied zu Weizen und Gerste war die Phosphor-Aufnahme von der zweiten Nachfrucht Winterraps (2013) im Versuch B nach Rs 2 zur Kornentwicklung höher als nach Ww 2 (HAN et al. 2017). Die Autoren vermuten, dass bei Winterraps eine günstige Wurzelgeometrie mit geringen Durchmessern und hoher spezifischer Wurzellänge dazu beitrug, dass Nährstoffe des Unterbodens effizient aufgenommen werden konnten (HAN et al. 2017).

Im Versuch zu Deposition und Wiederaufnahme von Stickstoff wurde der ¹⁵N-Anteil des Gesamt-Stickstoffs im *bulk*-Boden und in der Drilosphäre unmittelbar nach Ende der Depositionsphase und nach den Nachfrüchten Malve und Sommerweizen analysiert. Dabei wurde nach Malve eine signifikant stärkere Verminderung des ¹⁵N-Anteils des Gesamt-

Stickstoffs in der Drilosphäre verglichen mit dem *bulk*-Boden festgestellt. Nach Weizen waren die Unterschiede der Verminderung des ^{15}N -Anteils des Gesamt-Stickstoffs zwischen Drilosphäre und *bulk*-Boden nur tendenziell ausgeprägt (Abb. 28, S. 86). In Übereinstimmung damit wurde in der Tiefenstufe 75 – 105 cm nach Weizen in der Drilosphäre ein signifikant höherer ^{15}N -Anteil des Gesamt-Stickstoffs in der Drilosphäre verglichen mit dem *bulk*-Boden festgestellt. Im Unterschied dazu war nach Malve in der Drilosphäre verglichen mit dem *bulk*-Boden ein nur tendenziell höherer ^{15}N -Anteil des Gesamt-Stickstoffs vorhanden (Abb. 29, S. 87). Diese Sachverhalte weisen darauf hin, dass die allorhize Malve die Nährstoffe der Drilosphäre effektiver nutzen konnte als der homorhize Weizen. Die Untersuchungen zur Sprossentwicklung der Malve zeigten jedoch keine konsistente pflanzenbauliche Vorzüglichkeit bioporenreicher Vorfruchtvarianten (Kap. 4.2.2). Im Unterschied dazu reagierten die allorhizen Nachfrüchte im zweiten und dritten Nachfruchtjahr im *CeFIT* stärker auf die Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht als die homorhizen (Kap. 4.2.9). Die dargestellten Ergebnisse unterstützen Hypothese 4.

Die Untersuchungsergebnisse des Rapses in den Jahren 2011 und 2012 bestätigen andernorts erhobene Ergebnisse, nach denen Raps stärker auf eine erhöhte Bioporendichte reagierte als Getreide (McCALLUM et al. 2004). Ursache dafür ist vermutlich, dass die allorhizen Kulturen von einer erhöhten Anzahl von regenwurminduzierten kontinuierlichen Makroporen mit nährstoffreicher Drilosphäre profitierten. Diese Annahme steht im Einklang mit Ergebnissen anderer Forscher, die im *CeFIT* mittels *in situ*-Endoskopie den Wurzel-Drilosphären-Kontakt der homorhizen Wintergerste und des allorhizen Winterrapses in Bioporen > 5 mm analysierten. Dabei wurde festgestellt, dass bei beiden Kulturen ca. 85 % aller in Bioporen wachsenden Wurzeln Kontakt zur Porenwandung hatten und somit potentiell in der Lage waren, die Drilosphäre und die darin enthaltenen Nährstoffe zu nutzen (ATHMANN et al. 2013). Die Kulturen unterschieden sich jedoch hinsichtlich der Art des Wurzel-Drilosphären-Kontaktes. Während bei Gerste die Hauptwurzeln Kontakt zur Porenwandung hatten und lange Wurzelhaare bildeten, befanden sich die Rapswurzeln im Lumen der Pore und stellten Porenwandungskontakt mit zahlreichen Seitenwurzeln und kurzen Wurzelhaaren her. Möglicherweise konnten die Seitenwurzeln der allorhizen Kulturen Nährstoffe der Drilosphäre über einen längeren Zeitraum und daher umfangreicher aufnehmen, da in anderen Untersuchungen festgestellt wurde, dass die Lebensdauer von Wurzeln grundsätzlich mit zunehmendem Durchmesser steigt (McCORMACK & GUO 2014). Die länger währende Nutzung der Porenwandung könnte die Nährstoffaufnahme aus der Drilosphäre begünstigt haben und die stärkere Reaktion von allorhizen Nachfrüchten erklären. Dieser Effekt wäre insbesondere im Falle der nach Luzerne stickstoffreichen Drilosphäre relevant und könnte zumindest teilweise begründen, warum kaum Unterschiede zwischen Nachfrucht-Beständen nach Wegwarte verglichen mit Rohrschwengel festgestellt wurden (Kap. 4.2.9).

5.2.2 Wasser und Nährstoffe: Bioporen als Ausbreitungswege für Wurzeln zur Erschließung des Unterbodens

Im *CeFIT* wurden mehrere Untersuchungen vorgenommen, um einen möglichen Einfluss der Versuchsfaktoren auf die Wasserversorgung der Nachfrüchte zu erfassen. Als direkt wasserbezogener Parameter kann die Transpirationsrate Hinweise auf unterschiedliche Wasserverfügbarkeit geben. Bei Sommerweizen wurden nach mehrjährigem verglichen mit einjährigem Anbau der allorhizen Vorfrüchte stets tendenziell höhere Werte der Transpirationsrate gemessen. Die Unterschiede nahmen bis zum fünften Messtermin zu. Zum Ende der Vegetation wurde nach zweijährig kultivierter Vorfrucht eine höhere Transpirationsrate gemessen als nach einjährig kultivierter (Abb. 5, S. 37). Die Durchwurzelungstiefe von Pflanzen gilt als entscheidender Einflussfaktor auf die Zugänglichkeit von Wasser im Unterboden (PASSIOURA 1983; KIRKEGAARD et al. 2007). Aus diesem Grund können Ergebnisse anderer Forscher, die im *CeFIT* Wurzeluntersuchungen durchführten, zur Diskussion der Ergebnisse der Transpirationsratenmessungen genutzt werden. Die Wurzeluntersuchungen ergaben, dass die Anbaudauer der allorhizen Vorfrüchte einen Einfluss auf die maximale Durchwurzelungstiefe des Sommerweizens hatte (KÜPPER et al. 2014). Diese betrug nach einjährigem Anbau 48 cm, nach zweijährigem 52 cm und nach dreijährigem Anbau 55 cm. Zudem wurde festgestellt, dass Sommerweizen nach Ww 2 im Vergleich zu Rs 1 bis zum Ende des Ährenschiebens eine höhere Gesamt-Wurzellänge ausbildete (PERKONS et al. 2014b). Zur Vollreife wurde nach Ww 2 eine höhere Wurzellängendichte im Unterboden gefunden, während der Weizen nach Rs 1 im Oberboden eine höhere Wurzellängendichte gebildet hatte. Die unterschiedliche Durchwurzelungstiefe und Wurzellänge in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante war im Falle des Weizens möglicherweise Grund für die festgestellten Unterschiede zwischen Werten der Transpirationsrate. Außerdem könnten sie Ursache dafür gewesen sein, dass nach mehrjährigem gegenüber einjährigem Anbau der Vorfrüchte auch TKM und *Harvest-Index* des Sommerweizens signifikant erhöht waren (Tab. 13, S. 39). Für diese Annahme spricht, dass beide Ertragsstrukturparameter erst spät in der Entwicklung determiniert werden und somit potentiell von länger andauernden oder spät auftretenden Unterschieden der Wasserverfügbarkeit beeinflusst werden. Auch in anderen Versuchen wurde ein starker Einfluss der Wasseraufnahme auf die genannten Ertragsstrukturparameter festgestellt (PASSIOURA 1983; KIRKEGAARD et al. 2007). Im *CeFIT* wurde jedoch nur nach Luzerne ein signifikant steigender Kornertrag des Weizens mit zunehmender Anbaudauer der Vorfrucht festgestellt, während dieser Effekt nach Wegwarte nur tendenziell und nach Rohrschwengel gar nicht auftrat (Tab. 13, S. 39).

Die unterschiedliche Durchwurzelungstiefe und Wurzellänge in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht wird durch die Untersuchung zur Bioporendichte im *CeFIT* (KAUTZ et al. 2014a) nicht erklärt. Zu beachten ist jedoch, dass die in nur einer Bodentiefe erfasste Bioporendichte nicht alle Eigenschaften der Durchporung des Bodens abbilden kann, beispielsweise wurden die Parameter Länge und Kontinuität der Poren nicht erhoben. Außerdem wurden im Versuch A weitere Faktoren, wie z. B. die Dichte von Bioporen mit

einem Äquivalenzdurchmesser von < 2 mm, nicht erfasst. In diesem Zusammenhang muss berücksichtigt werden, dass die erhöhte Regenwurmpopulation nach mehrjährig kultivierter Vorfrucht (KAUTZ et al. 2014a) die Qualität der Bioporen nicht nur chemisch und biologisch hinsichtlich des Nährstoffgehalts und der mikrobiellen Besiedlung der Drilosphäre verändert haben könnte. Vielmehr ist zusätzlich auch davon auszugehen, dass eine physikalische Beeinflussung hinsichtlich Kontinuität, Konnektivität und Länge der Poren stattfand, wie andernorts vorgenommene Untersuchungen zeigten (BUCZKO et al. 2006; PAGENKEMPER et al. 2015). Es ist wahrscheinlich, dass die wurzelgenerierten Bioporen insbesondere nach Wegwarte und Luzerne zu Beginn der Nachfruchtphase ähnlich wie in andernorts durchgeführten Versuchen größtenteils noch verblockt, d. h. mit Wurzelresten ausgefüllt waren (DEXTER 1991; ANGUS et al. 2006). Daher könnte bereits eine vergleichsweise geringe Anzahl von regenwurminduziert nur schwach oder nicht verblockten, kontinuierlichen Bioporen zu einer entscheidenden Erhöhung der „nutzbaren“ Bioporendichte geführt haben. Dieser Sachverhalt könnte eine Bedeutung für die Durchwurzelbarkeit des Unterbodens und damit für die Nutzung der dort vorhandenen Wasser- und Nährstoffvorräte gehabt haben. Diese Annahme steht im Einklang mit Ergebnissen von Simulationen zur Bedeutung steigender Bioporendichten, in denen eine erhöhte Bioporendichte auf niedrigem Ausgangsniveau zu einer verstärkten Durchwurzelung des Unterbodens, erhöhter Wasseraufnahme und erhöhten Transpirationsraten der Nachfrucht führte (JAKOBSEN & DEXTER 1988).

Bei der Wintergerste als zweiter homorhizer Nachfrucht war ebenfalls die maximale Durchwurzelungstiefe nach Ww 2 mit 148 cm gegenüber Rs 1 mit 142 cm geringfügig erhöht (KÜPPER et al. 2014). Analog zum Weizen wies auch Wintergerste zumindest zeitweise nach Rs 1 im Oberboden eine höhere Wurzellängendichte auf als nach Ww 2, während im Unterboden die Wurzellängendichte nach Ww 2 zumeist signifikant höher war. Auch in diesem Fall wurde demnach eine größere Durchwurzelungstiefe und Wurzellänge im Unterboden nach vormals erhöhter Regenwurmdichte (KAUTZ et al. 2014a) festgestellt. Die genannte Abstufung der Durchwurzelungstiefe entsprach der des Weizens, allerdings erreichte Gerste im Vergleich mit Weizen eine deutlich größere Durchwurzelungstiefe. Dieser Sachverhalt ist vermutlich die Ursache dafür, dass die erhöhte Durchwurzelungstiefe keinen Einfluss auf den Gaswechsel der Gerste hatte, da wahrscheinlich in allen Varianten ein hinreichend großes Bodenvolumen erschlossen werden konnte. Ergebnisse anderer Versuche belegten dagegen, dass auch Gerste auf verbesserte Zugänglichkeit des Unterbodens und des dort gespeicherten Wassers mit einem größeren BFI und erhöhter Sprosslänge reagieren kann (MCKENZIE et al. 2009). Zu beachten ist jedoch, dass im genannten Versuch Sommergerste Verwendung fand, und die Unterbodenzugänglichkeit bereits in einer Tiefe von 20 cm eingeschränkt wurde. Die geringe Reaktion der beiden Wintergetreide Gerste und Roggen im *CeFIT* auf die Versuchsfaktoren (Kap. 4.2.9) weist demgegenüber darauf hin, dass beide Kulturen im Feldversuch das Wasser ebenso wie die Nährstoffe des Unterbodens in allen Versuchsgliedern ausreichend umfänglich nutzen konnten. Diese Vermutung würde erklären, warum die vorfruchtbedingte Prägung des

Bodengefüges und die dadurch verursachte unterschiedliche Durchwurzelungstiefe für die Bestandesentwicklung nicht relevant wurden. Die wahrscheinlichste Ursache für die geringen indirekten Vorfruchtwirkungen auf Gerste und Roggen ist, dass die genannten Winterungen gegenüber Weizen als Sommerung einen Entwicklungsvorsprung zu Beginn der Vegetationsperiode hatten. Sommerungen werden stärker von austrocknendem Oberboden beeinflusst, da sie später als Winterungen in den Unterboden einwachsen und daher erst zu einem späteren Zeitpunkt dortige Wasservorräte nutzen können (HAAK 1981). Aus diesem Grunde profitieren die Winterungen potentiell weniger von einer erleichterten Durchwurzelbarkeit des Unterbodens und der damit verbundenen Zugänglichkeit der dort befindlichen Ressourcen. Die Getreidearten unterscheiden sich darüber hinaus generell in ihrer Fähigkeit, den Unterboden zu nutzen. So hat Gerste gegenüber Weizen ein besseres Vermögen, zu vergleichsweise frühen Entwicklungsstadien in den Unterboden einzuwachsen. Dieser Sachverhalt ermöglicht es der Gerste, stärker von Wasser ebenso wie von Nährstoffen aus dem Unterboden zu profitieren (HAAK 1981).

Die allorhizen Kulturen der ersten beiden Nachfruchtjahre wurden ebenfalls hinsichtlich mehrerer potentiell wasserbezogener Parameter der Sprossentwicklung untersucht. Bei der ersten Nachfrucht Futtermalve wurden signifikante Unterschiede bei den Zeitreihenparametern Sprossmasse (Tab. 17, S. 45) und Gaswechselrate (Abb. 9 – Abb. 13, S. 46 – 49) in Abhängigkeit von den Versuchsfaktoren festgestellt, jedoch wiesen diese in Abhängigkeit vom Messtermin sich widersprechende Signifikanzabstufungen auf. Dieser Sachverhalt wurde möglicherweise durch die verglichen mit Getreide und Raps heterogeneren Bestände als Folge einer geringeren Bestandesdichte verursacht. Aufgrund dessen ist eine weitergehende Interpretation der Ergebnisse nicht möglich. Bei der zweiten Nachfrucht Raps 2011 wurde zum Ende des Wachstums nach zweijährig kultivierter Vorfrucht eine höhere Photosyntheserate gemessen als nach einjährig kultivierter (Abb. 17, S. 57). Dieser Befund könnte auf einen besseren Zugang zu Wasser im Unterboden hindeuten. Zu Winterraps (2011) wurde keine Wurzelanalytik im Oberboden durchgeführt, jedoch wurde im oberen Bereich des Unterbodens (45 cm – 75 cm) im Trend nach Rs 1 eine höhere Wurzellängendichte festgestellt als nach Ww 2. Im Unterschied dazu wurde im unteren Bereich des Unterbodens (75 cm – 155 cm) z. T. eine signifikant höhere Wurzellängendichte nach Ww 2 verglichen mit Rs 1 erfasst. Dieser Sachverhalt könnte die Ursache für die gegen Ende der Vegetationsperiode festgestellten verschieden hohen Werte der Photosyntheserate in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht sein. Die eventuell erleichterte Wasseraufnahme führte jedoch nicht zu einer Beeinflussung des Kornertrags oder der Ertragsstruktur (Tab. 21, S. 58). Insgesamt ist festzustellen, dass einige der vorgestellten Untersuchungen Hypothese 3 bestätigen.

Im Versuch B wurde die Wurzellänge von Sommerweizen (2012), Wintergerste (2013) und Winterraps (2013) nur im Unterboden erfasst. Nach Ww 2 bildete der Sommerweizen (2012) bis zur Blüte eine höhere Wurzellänge aus als nach Rs 2 (HAN et al. 2015b). Dieser Befund steht im Einklang mit den erwähnten Untersuchungsergebnissen von Sommerweizen (2010)

im Versuch A. Die Wintergerste (2013) bildete im Versuch B nach Rs 2 zur Blüte eine höhere Wurzellänge aus als nach Ww 2. Im Versuch A wurde in ähnlicher Weise bei Wintergerste (2011) nach Ww 2 eine höhere Wurzellänge als nach Rs 1 festgestellt. Konsistent dazu wurde bei Winterraps in Versuch A (2011) und Versuch B (2013) nach Ww 2 eine höhere Wurzellänge im Unterboden erreicht als nach Rs 1 (Versuch A, 2011) bzw. nach Rs 2 (Versuch B, 2013) (PERKONS et al. 2014b; HAN et al. 2017).

Pedophysikalische Untersuchungen ergaben, dass die Luftkapazität des Bodens gegensätzlich zur Bioporendichte in den Tiefen 45 cm und 60 cm nach Rs 1 höher war als nach Ww 2 (PERKONS et al. 2014b). Dieser Sachverhalt deutet darauf hin, dass Rs 1 einen gut durchlüfteten Boden hinterließ, der zwar weniger Bioporen der Größenklasse ≥ 2 mm aufwies als im Boden nach Ww 2 festgestellt wurden, aber dennoch insbesondere in den oberen Tiefenstufen gut durchwurzelbar war. In diesem Zusammenhang ist von entscheidender Bedeutung, dass im Versuch A des *CeFIT* aus versuchstechnischen Gründen die Dichte von kleinlumigen Bioporen mit einem Äquivalenzdurchmesser von < 2 mm nicht erfasst wurde. Im Versuch B wurde dagegen auch die Dichte von Bioporen mit einem Äquivalenzdurchmesser von < 2 mm erhoben. Nach Rs 2 wurden in einer Tiefe von 45 cm signifikant mehr kleinlumige Bioporen gezählt als nach Ww 2 (HAN et al. 2017). Dieser Sachverhalt ist vermutlich auf die intensive Durchwurzelung des oberen Bodens durch den homorhizen Rohrschwengel zurückzuführen (HAN et al. 2017). Potentielle Nachteile einer geringeren Dichte von mittel- und großlumigen Bioporen könnten durch diesen Umstand zumindest teilweise kompensiert worden sein. Entsprechende Hinweise ergaben auch andernorts vorgenommene Untersuchungen. In Gefäßversuchen wurde unter nicht wasserlimitierten Bedingungen festgestellt, dass ein Bodengefüge mit zahlreichen klein- und mittellumigen Poren für nachfolgend kultiviertes Getreide hinsichtlich Sprossentwicklung bzw. Ertrag günstiger war als ein Bodengefüge mit wenigen, großlumigen Bioporen (STIRZAKER et al. 1996; NUTTALL et al. 2008).

Die im *CeFiT* beobachtete, insgesamt geringe Bedeutung einer unterschiedlich hohen Dichte von Bioporen mit einem Äquivalenzdurchmesser von ≥ 2 mm für Nachfrüchte wurde vermutlich auch durch eine hohe Dichte von Bioporen mit einem Äquivalenzdurchmesser von < 2 mm bedingt. Diese Kompensation war vermutlich insbesondere im Falle der bezüglich der Prägung mittel- und großlumiger Bioporen weniger effektiven Vorfrucht Rohrschwengel relevant. Zusätzlich könnte eine zumeist hohe Nährstoffverfügbarkeit im Oberboden zu einer geringeren Bedeutung von Bioporen als Ausbreitungsweg zu Nährstoffen im Unterboden geführt haben. In ähnlicher Weise könnte eine generell gute Durchwurzelbarkeit des Unterbodens die Bedeutung von zusätzlichen Bioporen begrenzt haben. Untersuchungen zur Wurzellängendichte im *CeFiT* wiesen darauf hin, dass die Wurzeln in die Poren ein- und aus den Poren auswachsen konnten (KAUTZ et al. 2013a). Diese Beobachtung weist darauf hin, dass der *bulk*-Boden auch von Bioporen ausgehend erschlossen werden konnte. Dafür spricht auch der vergleichsweise geringe Anteil der Wurzellängendichte in Bioporen an der Gesamt-Wurzellängendichte von Nachfrüchten, der nur in Einzelfällen > 40 % war (Kap. 5.2.1). In anderen Untersuchungen wurde festgestellt, dass Wurzeln in dichtgelagertem Unterboden nahezu vollständig in Bioporen aggregiert oder „gefangen“ waren (PASSIOURA 1991; STIRZAKER et al. 1996). Demgegenüber war die Durchwurzelung der Unterbodenmatrix insbesondere unter den Bedingungen des Versuchs A im *CeFiT* umfänglich möglich. Wahrscheinlich ist die nach Ww 2 mehrfach beobachtete Erhöhung der Wurzellänge im Unterboden darauf zurückzuführen, dass Bioporen von Wurzeln als Ausbreitungsweg mit geringem Eindringwiderstand genutzt wurden, von denen ausgehend der *bulk*-Boden und die dort vorhandenen Wasser- und Nährstoffvorräte erschlossen wurden.

Die Versuchsergebnisse weisen darauf hin, dass Regenwurmgänge, die verglichen mit z. T. verblockten pflanzengenerierten Bioporen vermutlich eine höhere Länge und Konnektivität aufwiesen, zu einer schnelleren, intensiveren und/oder tieferen Durchwurzelung des Unterbodens beitrugen. Bei gleichzeitigem Auftreten von mehreren ungünstigen Bedingungen, bspw. einer Frühsommertrockenheit und geringer Durchwurzelungstiefe wie beim Sommerweizen im Versuch A, könnte die erleichterte Erschließung des Unterbodens zu einer verbesserten Wasser- und Nährstoffversorgung beigetragen haben.

5.2.3 Bodenhydrologie

Im *CeFiT* wurde kein Einfluss der Bioporendichte auf die Infiltration des Unterbodens festgestellt, wohingegen in anderen Untersuchungen eine Steigerung der Bioporendichte zu einer erhöhten Infiltration führte (EHLERS 1975a; JOSCHKO et al. 1989; SHIPITALO & EDWARDS 1996). Die mittlere feldgesättigte Wasserleitfähigkeit des Unterbodens im *CeFiT* betrug 1.812 cm d^{-1} (2011) bzw. 2.793 cm d^{-1} (2012), wobei kein Zusammenhang zwischen Bioporendichte und Infiltration festgestellt wurde (Abb. 32 – Abb. 35, S. 89 – 91). Außerdem streuten die erhobenen Werte in beiden Messreihen (2011 und 2012) innerhalb der

Varianten stärker als zwischen den Varianten. Aufgrund dessen war die Erfassung von Variantenunterschieden nicht möglich, obwohl im *CeFIT* in der Vorfruchtphase unterschiedliche Bioporendichten generiert wurden (Kap. 5.2). Dieser Umstand steht nicht im Einklang mit Hypothese 9.

Im Gegensatz dazu wurden in vielen Untersuchungen die Makroporendichte sowie Poreneigenschaften wie Volumen, Durchmesser und Konnektivität als wichtigste Einflussgrößen auf Infiltrationsfähigkeit und hydraulische Leitfähigkeit von Böden identifiziert (EHLERS 1975b; LOGSDON & LINDEN 1992; SHIPITALO et al. 2000). Infolge dessen wurden in anderen Untersuchungen unterschiedlich hohe Werte der feldgesättigten Wasserleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Vorfrucht festgestellt (MEEK et al. 1989; MEEK et al. 1990; ANGERS & CARON 1998; MCCALLUM et al. 2004; BUCZKO et al. 2006).

Die im *CeFIT* erhobenen Daten zur Infiltration streuten stark (Abb. 32 – Abb. 35, S. 89 – 91). Zur Überprüfung der generellen Plausibilität des Wertebereichs erfolgte ein Vergleich mit Literaturwerten. An einem anderen Standort wurden bei Infiltrationsmessungen auf Flächen von jeweils 314 cm² mit je einer Pore mit einem Durchmesser von 6 mm eine mittlere Infiltrationsrate von 650 cm d⁻¹ erfasst (BOUMA et al. 1982). Für die vorliegende Arbeit wurden die Messungen jeweils auf Flächen von 483 cm² vorgenommen, die im Mittel der Messungen 3,86 Poren > 5 mm (2011) bzw. 3,52 Poren > 5 mm (2012) aufwiesen. Unter der Annahme, dass bei BOUMA (1982) die gesamte Infiltration durch die Pore stattgefunden hätte, wäre bei der im *CeFIT* erfassten Bioporendichte eine mittlere Infiltrationsrate von 1.631 cm d⁻¹ (2011) bzw. 1.487 cm d⁻¹ (2012) aufgetreten ($\text{Infiltrationsrate}_{\text{BOUMA}} / \text{Bioporendichte}_{\text{BOUMA}} \cdot \text{Bioporendichte}_{\text{CeFIT}}$). Diese theoretischen Werte liegen insbesondere für das Jahr 2012 deutlich unter den im *CeFit* gemessenen Werten (2011: 1.812 cm d⁻¹; 2012: 2.793 cm d⁻¹). Bei der Interpretation von Werten der Infiltrationsrate verschiedener Standorte müssen jedoch Faktoren wie Infiltration in Poren der Größenklasse ≤ 5 mm, Lagerungsdichte und Bodenart berücksichtigt werden. Die genannten Faktoren haben entscheidenden Einfluss auf die Infiltration, so dass diesbezügliche Unterschiede zwischen Standorten auch bei ähnlicher Porosität des Bodens zu verschiedenen Messergebnissen beitragen können. Deshalb kann zusammenfassend davon ausgegangen werden, dass die Größenordnung der im *CeFIT* gemessenen feldgesättigten Wasserleitfähigkeiten plausibel ist. Generell wurden bei den Messungen im zweiten Nachfruchtjahr trotz im Trend geringerer Dichte von Bioporen mit einem Äquivalenzdurchmesser von > 5 mm tendenziell höhere Werte der feldgesättigten Leitfähigkeit sowie der Infiltration in einzelne Porengrößenklassen festgestellt als im ersten Nachfruchtjahr. In Übereinstimmung mit Ergebnissen anderer Untersuchungen (MEEK et al. 1990; DEXTER 1991; RASSE & SMUCKER 1998; ANGUS et al. 2006) ist davon auszugehen, dass dieser Sachverhalt durch den fortschreitenden Abbau von Wurzeln der Vorfrüchte und die damit zurückgehende Verblockung der Bioporen verursacht wurde.

Weitere Untersuchungen an anderen Versuchsstandorten zum Zusammenhang zwischen Individuendichte sowie Biomasse von anözischen Regenwürmern und der Infiltrationsrate

von unterschiedlichen Bodentypen ergaben, dass keine enge Korrelation zwischen den Parametern gegeben war (EMMERLING et al. 2015). Dieses Ergebnis sollte unter Berücksichtigung andernorts durchgeführter einzelporenbasierter Untersuchungen zum Einfluss von Regenwurmröhren auf die Infiltration interpretiert werden. Auf einem Standort mit weitgehend homogener Textur wurden kleinräumig erhebliche Unterschiede hinsichtlich des Eintritts von Wasser aus Poren in die Matrix beobachtet (VAN SCHAİK et al. 2014). Dieser Sachverhalt wurde wahrscheinlich durch unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheit der Porenwandung verursacht (CAMMERAAT 1992), die ihrerseits vom Alter der Pore bzw. von der Art der organischen Substanz abhängt (LEUE et al. 2010). Zusammenfassend ist festzustellen, dass der Einfluss von Bioporen auf die Infiltration eines Bodens von vielen Faktoren abhängt. Eine signifikante Beeinflussung der Infiltration durch einen einzelnen Faktor wie beispielsweise die Bioporendichte ist somit nur dann feststellbar, wenn die übrigen Eigenschaften der Poren gleich sind. Diese Voraussetzung war im *CeFiT* offensichtlich nicht erfüllt, so dass kein Zusammenhang zwischen Makroporosität und Infiltration des Unterbodens festgestellt wurde.

5.2.4 Bedeutung von Bioporen für die Versorgung von Pflanzenbeständen

Zusammenfassend kann auf Grundlage der in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen aus dem Versuch A des *CeFiT* zunächst davon ausgegangen werden, dass die Dichte von Bioporen mit einem Äquivalenzdurchmesser von ≥ 2 mm nur einen untergeordneten Einfluss auf die Sprossentwicklung der Nachfrüchte hatte. Nur unter besonderen Konstellationen, etwa dem Zusammentreffen der vergleichsweise geringen Durchwurzelungstiefe von Sommerweizen und ausgeprägter Frühsommertrockenheit im Jahr 2010 (Tab. 2, S. 12), führte eine höhere nutzbare Bioporendichte zu gesteigerten Gaswechselraten. Weitere Unterschiede hinsichtlich Sprossmasse, Blattfläche und Ertrag der Nachfrüchte wurden jedoch im Vergleich von bioporenen Varianten nach Wegwarte gegenüber bioporenen Varianten nach Rohrschwengel (jeweils bezogen auf Poren ≥ 2 mm Durchmesser) im Versuch A kaum erfasst. Im Unterschied dazu gab es im Versuch B Hinweise darauf, dass die Nährstoffaufnahme der Nachfrüchte durch die Bioporendichte beeinflusst wurde. Die Untersuchungen zur Wurzellängendichte im Versuch A deuten jedoch darauf hin, dass das Wurzelwachstum von der Bioporendichte beeinflusst wurde. Dieser Umstand führte aber nicht zu einer unterschiedlichen Ausprägung von Sprosswachstum oder Ertragsbildung der Nachfrüchte nach Wegwarte verglichen mit Rohrschwengel. Der genannte Sachverhalt wurde möglicherweise dadurch bedingt, dass selbst in den – bezogen auf Poren ≥ 2 mm Durchmesser – vergleichsweise bioporenen Rohrschwengel-Varianten so hohe Makroporendichten vorhanden waren, dass eine weitere Steigerung keinen feststellbaren Einfluss auf die Sprossentwicklung hatte. Darüber hinaus ist insbesondere im Falle des homorhizen Rohrschwengels davon auszugehen, dass analog zum Versuch B auch im Versuch A in hohem Maße kleinlumige Bioporen mit einem Äquivalenzdurchmesser < 2 mm gebildet wurden. Diese Poren wurden durch die Bioporenkartierungen im Versuch A jedoch nicht erfasst. Möglicherweise konnten die Nachfrüchte auch die kleinlumigen Bioporen umfänglich nutzen. Daher ist es

möglich, dass der Einfluss unterschiedlicher Dichte von Bioporen mit einem Äquivalenzdurchmesser von ≥ 2 mm auf die Nachfrüchte durch kleinlumige Bioporen überdeckt wurde. Es wäre denkbar, dass die günstigen Effekte einer höheren Dichte von Bioporen ≥ 2 mm Durchmesser nach den allorhizen Vorfrüchten Luzerne und Wegwarte durch eine höhere Dichte kleinlumiger Bioporen mit einem Durchmesser < 2 mm nach Rohrschwengel kompensiert wurden. Dieser Umstand könnte dazu geführt haben, dass im Versuch A kein Einfluss der Dichte von Bioporen mit einem Äquivalenzdurchmesser ≥ 2 mm auf die Sprossentwicklung der Nachfrüchte erfasst wurde, weil deren Einfluss durch kleinlumige Bioporen überdeckt wurde.

Anhand von Teilaspekten wurde untersucht, inwieweit Voraussetzungen für eine hohe Bedeutung der Drilosphäre des Unterbodens für das Wachstum der Nachfrüchte erfüllt waren. Dabei wurde festgestellt, dass die Dichte von Bioporen durch die Fruchtfolge beeinflusst und die Drilosphäre von Bioporen u. a. durch Regenwurmaktivität mit Nährstoffen angereichert werden kann. Zudem waren Wurzeln von Nachfrüchten in der Lage, die Bioporen als Ort der Nährstoffaufnahme und als Ausbreitungsweg zur Erschließung des Unterbodens zu nutzen. Die Versuchsergebnisse stehen somit im Einklang mit Befunden zahlreicher Autoren (ELKINS et al. 1977; EHLERS et al. 1983; PASSIOURA 2002; LESTURGEZ et al. 2004), die Bioporen ebenfalls als Ort der Nährstoffaufnahme durch Pflanzenwurzeln sowie als Ausbreitungsweg identifizierten. Es ist zu erwarten, dass auf pflanzenbaulich weniger vorzüglichen Standorten die Bedeutung der Drilosphäre des (Unter-)Bodens für die Pflanzenernährung höher sein kann. In Übereinstimmung damit stellten zahlreiche Autoren fest, dass Bioporen bzw. die verbesserte Nutzbarkeit von Wasser und Nährstoffen des Unterbodens insbesondere bei trockenem Boden einen wachstumsfördernden Einfluss hatten (WANG et al. 1986; HENDERSON 1989; BOHNE 1991; CORNISH 1993; STIRZAKER et al. 1996; VOLKMAR 1996; LAMPURLANÉS et al. 2001; LILLEY & KIRKEGAARD 2007). Im Falle sandiger, schnell austrocknender Böden könnte eine nährstoffreiche Drilosphäre des Unterbodens von Pflanzen auch dann genutzt werden, wenn im trockenen Oberboden kein Wasser und damit keine Nährstoffe mehr aufgenommen werden können (RICHTER et al. 1977; KUHLMANN 1990; KUHLMANN & BAUMGÄRTEL 1991). Im Unterschied dazu wären Bioporen als Ausbreitungsweg insbesondere auf tonigen Böden mit dichtlagernden und schwer durchwurzelbaren Horizonten von hoher Bedeutung, um Nährstoffe und Wasser aus dem Unterboden erreichen zu können (ELKINS et al. 1977; ELKINS 1985; JAKOBSEN & DEXTER 1988; HENDERSON 1989). Der Anteil der Wurzellängendichte in Poren ist unter solchen Bedingungen höher, so dass Pflanzen Wasser und Nährstoffe des Unterbodens vorwiegend oder ausschließlich aus der Drilosphäre aufnehmen können.

In der konventionellen Landwirtschaft kann wasser- und nährstoffbezogenen Limitationen einerseits durch Anwendung von konservierender Bodenbearbeitung unter Einsatz von Herbiziden und andererseits durch Zufuhr von Nährstoffen vergleichsweise einfach begegnet werden. Da diese Eingriffsmöglichkeiten in agrarischen *low input*-Systemen wie dem Ökologischen Landbau nicht in vollem Umfang zur Verfügung stehen, kann die gezielte

Mehrung und Nutzung von Bioporen in der Fruchtfolge als Element des Nährstoffmanagements insbesondere in solchen Systemen erfolgversprechend sein (KÖPKE et al. 2015).

5.3 Methodenevaluierung

Versuchsdesign

Das im *CeFIT* umgesetzte Versuchsdesign ermöglichte es grundsätzlich, die Wirkung der Versuchsfaktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht auf verschiedene Nachfrüchte zu erfassen. Im Fokus der hier vorgestellten Untersuchungen standen nährstoff-, wasser- und bodengefügevermittelte Effekte. Es wurde deutlich, dass der Stickstoffeffekt der Luzerne trotz der Ausgleichsdüngungen in den Jahren 2010 und 2011 der prägendste Vorfruchteffekt war. Demgegenüber waren weitere Unterschiede zwischen den Vorfruchteffekten der einzelnen Futterpflanzen in Abhängigkeit von der jeweiligen Wurzelarchitektur (allorhiz verglichen mit homorhiz) von untergeordneter Bedeutung. Eine relevante Wirksamkeit der vorfruchtbedingten Genese von Bioporen mit einem Äquivalenzdurchmesser von ≥ 2 mm wurde nur vereinzelt erfasst. Bei der Interpretation der Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass der Standort hinsichtlich der Bioporendichte keine Null-Variante ermöglichte. Gründe dafür waren vor allem, dass in der vorausgegangenen Fruchtfolge in den Jahren 2000 und 2004 Zuckerrüben angebaut worden waren (Kap. 3.1), die mit ihren Pfahlwurzeln ebenfalls Bioporen vorprägen können (GLAB et al. 2013), sowie vermutlich eine, wenn auch geringe, Bioporenbildung durch *L. terrestris*. Im *CeFIT* wurde jedoch kein klarer Zusammenhang zwischen der Abundanz von *L. terrestris* und der Dichte großlumiger Bioporen festgestellt (HAN et al. 2015a), und der Anteil von durch Regenwürmer generierten Bioporen an der Gesamtheit von Bioporen mit einem Äquivalenzdurchmesser von ≥ 2 mm war gering (KAUTZ et al. 2014a; PERKONS et al. 2014b). Die fehlende Null-Kontrolle hinsichtlich der Bioporendichte hatte zur Folge, dass der Einfluss einer Änderung der Bioporendichte bei geringer Ausgangs-Bioporendichte nicht erfasst werden konnte. Ergebnisse von Simulationen und Feldversuchen zur Bedeutung der Bioporendichte auf das Wachstum von Weizen bzw. Gerste deuten jedoch darauf hin, dass der jeweils zusätzliche Nutzen einer höheren Bioporendichte bei steigenden Ausgangswerten deutlich abnimmt (JAKOBSEN & DEXTER 1988; MCKENZIE et al. 2009). Dieser Sachverhalt legt nahe, dass im *CeFIT* möglicherweise keine markante Förderung des Pflanzenwachstums durch eine erhöhte Bioporendichte auftrat, da die Ausgangs-Bioporendichte in allen Varianten bereits vergleichsweise hoch war. Die Vorfrucht Rohrschwinger hinterließ zwar verglichen mit den allorhizen Vorfrüchten eine geringe Dichte von Bioporen mit einem Äquivalenzdurchmesser von ≥ 2 mm, doch war im Gegenzug die Dichte von Bioporen mit einem Äquivalenzdurchmesser von < 2 mm erhöht. Die größere Anzahl kleinlumiger Bioporen könnte die geringere Anzahl an mittel- und großlumigen Bioporen kompensiert haben, so dass die Effekte einer gesteigerten Dichte von Bioporen mit einem Äquivalenzdurchmesser von ≥ 2 mm möglicherweise maskiert und daher unterschätzt wurden.

Die Vorfrüchte wiesen im Unterschied zu Angaben in der einschlägigen Literatur eine unterschiedliche Durchwurzelungstiefe auf. Dieser Sachverhalt hatte potentiell Einfluss auf zwei denkbare, unterschiedliche Nährstoff-Effekte der Vorfrüchte, einerseits Akkumulation im Oberboden infolge der Mulchschnitte und andererseits erleichterter Zugang zum Unterboden bedingt durch Gefügeänderungen. Diese Nährstoff-Effekte konnten in der Nachfruchtphase nicht voneinander unterschieden werden. Zum einen könnte eine größere Durchwurzelungstiefe zu einer erhöhten Nährstoffaufnahme der Vorfrüchte geführt haben, so dass durch die Mulchschnitte größere Nährstoffmengen im Oberboden angereichert worden sein könnten. Zum anderen könnte die größere Durchwurzelungstiefe zu einer umfänglicheren Bioporengenesse geführt haben, so dass die Nachfrüchte vereinfachten Zugang zu Wasser und Nährstoffen des Unterbodens erhielten. Beide Vorfruchteffekte wirken potenziell fördernd auf das Pflanzenwachstum, bewirkten auf dem nährstoffreichen Standort (Kap. 5.2.1) jedoch selbst im Zusammenspiel nur vereinzelt Unterschiede im Wachstum der Nachfrüchte.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Vorfruchteffekte unter für das Pflanzenwachstum weniger günstigen Bedingungen möglicherweise markanter hätten wirksam werden können (Kap. 5.2.4). Weitere Untersuchungen sollten daher auf anderen Standorten, z. B. mit sandigem Oberboden oder mit tonigem Verdichtungshorizont, durchgeführt werden, um diese Annahme zu überprüfen. Darüber hinaus sollte in einem weiteren Versuch wenn möglich eine echte Null-Kontrolle hinsichtlich der Bioporendichte berücksichtigt werden.

Zeiternten

Die wiederholten Zeiternteuntersuchungen in den Nachfruchtbeständen erlaubten grundsätzlich die Detektion auch von ggf. nur zeitweilig auftretenden Unterschieden in Wachstum und Ertragsbildung in Abhängigkeit von den Versuchsfaktoren (Beispiel Winterraps 2012: Kap. 4.2.7.1). Eine Ausnahme davon war Futtermalve, bei der nur drei Zeiternten durchgeführt wurden, so dass nur ein vergleichsweise kurzer Ausschnitt der Vegetation erfasst wurde. Die Ergebnisse der Sprossuntersuchung auf größerer Fläche (Tab. 17, S. 45) sicherten bis dahin erfasste tendenzielle Variantenunterschiede (Anhang-Tab. 13, S. 160) signifikant ab. Dieser Sachverhalt weist darauf hin, dass aufgrund der verglichen mit den Getreiden und dem Raps heterogeneren Bestände die Zeiternteflächen vergrößert werden sollten, um eine ausreichend hohe Pflanzenanzahl zu erfassen. Der höhere Flächenbedarf könnte akzeptiert werden, da keine Kernparzelle für eine Ernte vorgehalten werden muss. Für die anderen Kulturen war die angewandte Methodik gut geeignet.

Nährstoffaufnahme der Vorfrüchte

Im Rahmen der Zeiternten wurden für die Vorfrüchte kumulierte Spross-Nährstoffaufnahmen durch Addition der Nährstoffaufnahmen jedes einzelnen Aufwuchses der Bestände berechnet. Da alle Aufwüchse gemulcht wurden, ist von einer (mehrfachen) Rezyklierung zumindest eines Teils der genannten Mengen auszugehen. Der Umfang der

Rezyklierung wurde nicht quantifiziert. Eine Erfassung der Nährstoffflüsse könnte z. B. mit einem *tracer*-gestützten Ansatz vorgenommen werden.

Die Stickstofffixierungsleistung bzw. der Anteil des *Ndfa* (*Nitrogen derived from atmosphere*) an der Stickstoffaufnahme der Luzerne kann nicht (nachträglich) ermittelt werden. Das Mulchen der Luzernebestände verursachte einen Eintrag von vormals fixiertem luftbürtigen Stickstoff in den Boden. Da im luftbürtigen Stickstoff ein geringerer Anteil von ^{15}N im Vergleich zum Bodenstickstoff vorliegt, wurde das Stickstoffisotopenverhältnis $^{14}\text{N}:^{15}\text{N}$ im Boden unter Luzerne durch die Mulchschnitte im Vergleich zum Boden unter der potentiellen Referenzfrucht Wegwarte wiederholt verändert. Ein räumlich konstantes Isotopenverhältnis ist aber eine Voraussetzung für die Anwendung der $\delta^{15}\text{N}$ -Methode zur Bestimmung des *Ndfa*-Anteils (SHEARER & KOHL 1986). Zur Erfassung des *Ndfa* in wiederholt gemulchten Beständen müsste daher zu jedem Aufwuchs z. B. eine *tracer*-Applikation auf jeweils neue Teilflächen der Bestände und entsprechende Analytik des Sprosses von Luzerne und Wegwarte erfolgen.

Endernte

Mit dem Parzellendrusch wurden Ertragsunterschiede in Abhängigkeit von den Versuchsfaktoren erfasst, die im Falle von Sommerweizen in Form von Wechselwirkungen (Tab. 14, S. 39), bei Raps in beiden Anbaujahren dagegen als Hauptwirkungen signifikant waren (Tab. 21, S. 58; Tab. 28, S. 69). Daher können die Kernparzellengröße und die Erntetechnik als angemessen angesehen werden.

Im Düngungssteigerungsversuch (DSV) wurden keine Unterschiede zwischen Werten des Kornertrags in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante festgestellt (Tab. 38, S. 81). Im Gegensatz dazu wurde im Hauptversuch trotz der variantenabhängigen Ausgleichsdüngung nach Lu 3 ein verglichen mit Lu 1 signifikant höherer Kornertrag des Sommerweizens erzielt (Tab. 14, S. 39). Dieses Ergebnis wurde im Düngungssteigerungsversuch somit nicht reproduziert, obwohl in den ungedüngten Varianten verglichen mit dem Hauptversuch deutlichere Unterschiede in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante zu erwarten waren. Diese Diskrepanz beruht möglicherweise auf der unterschiedlichen Methodik der Ertragserhebung im DSV verglichen mit der im Hauptversuch. Im DSV wurde der Kornertrag auf einer Fläche von 1 m^2 /Unterteilstück bestimmt, während im Hauptversuch auf einer Fläche von durchschnittlich ca. 14 m^2 /Parzelle gedroschen wurde. Es ist möglich, dass die Beprobungsfläche im DSV zu klein war, um diese und evtl. weitere Unterschiede in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante feststellen zu können. Im Falle einer Wiederholung des DSV sollten daher größere Unterteilstücke gewählt werden, um einen Parzellendrusch auf einer Fläche von jeweils mehreren Quadratmetern zu ermöglichen.

Allerdings muss neben der unterschiedlichen Beerntungsmethodik beachtet werden, dass der Rückgang der Sprossmasse von der vierten zur fünften Zeiternte im Hauptversuch auf einen Vorernte-Kornausfall hindeutet. Für diese Vermutung spricht auch, dass im Vergleich mit der Literatur (KULIG et al. 2010) im *CeFiT* ein relativ geringer *Harvest-Index* von

durchschnittlich 0,43 festgestellt wurde (Tab. 13, S. 39). Daher ist es möglich, dass die erhobenen Ertragsdaten des Sommerweizens nicht den tatsächlich gebildeten Kornertrag widerspiegeln.

Ertragsstruktur

Die Ertragsstruktur der Getreide wurde grundsätzlich zufriedenstellend erfasst. Es fällt auf, dass die Unterschiede der Anzahl Ähren/m² in absoluten Zahlen im ersten Jahr höher, jedoch nicht signifikant, waren als im zweiten und dritten Jahr. Dieser Umstand könnte an der geänderten Zählmethode liegen, so dass für zukünftige Zählungen die flächenmäßige Erfassung der Ährendichte der reihenbezogenen vorgezogen werden sollte.

Bei Raps wäre die Erfassung der Anzahl Schoten/m² zur vollständigen Beschreibung der Ertragsstruktur wünschenswert, hier sind jedoch hoher Bestandesflächenverbrauch einerseits und großer Arbeitskraftbedarf andererseits zu berücksichtigen.

Gaswechsel

Die Messungen des Gaswechsels wurden unter einer einheitlichen, intensiven künstlichen Beleuchtung mit einer Photonenflussrate von 1.500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ vorgenommen. Dieser Sachverhalt bedingte witterungsunabhängig sehr hohe Gaswechselraten. Die Photonenflussdichte entsprach zwar den Gegebenheiten eines sonnigen Sommertages in Mitteleuropa (LANGENSIEPEN et al. 2012), doch ist in der Küvette ein senkrechtes Auftreffen der PAR auf die Blattoberfläche gewährleistet. Diese Bedingung trifft im Bestand unter natürlicher Einstrahlung aufgrund unterschiedlicher Blattoberexposition nur für einen kleinen Teil der Blattfläche zu. Zudem herrschten während der Messungen nur vereinzelt die Einstrahlungsbedingungen eines sonnigen Sommertags. Daher übertrafen die gemessenen Gaswechselraten gewiss diejenigen, die zeitgleich im Bestand unter natürlichen Bedingungen auftraten. Diese Vermutung wird durch die Beobachtung unterstützt, dass die Gaswechsel-Messwerte unmittelbar nach Einspannen eines Blattes in die Küvette zunahmten und erst nach einer bis drei Minuten konstant blieben, was auf eine notwendige Adaptation der Photosysteme an die hohe Einstrahlungsintensität hindeutet.

Die konstante Beleuchtung ermöglichte es aber, die Messwerte von unterschiedlichen Varianten unabhängig von den sich im Tageslauf ändernden Lichtverhältnissen und darüber hinaus im Zeitablauf über alle Messtermine zu vergleichen. Außerdem gaben sie Hinweise auf die physiologisch maximal möglichen Gaswechselraten bei gegebener Wasserverfügbarkeit. Die standardisierten Messungen haben jedoch den Nachteil, dass ein Rückschluss auf die tatsächlichen Gaswechselraten im Feld unter natürlichen Bedingungen nicht möglich ist.

In der Messreihe im ersten Nachfruchtjahr wurden bei Sommerweizen wiederholt gleichgerichtete tendenzielle Unterschiede in Abhängigkeit von den Versuchsfaktoren festgestellt, doch traten nur vereinzelt signifikante Unterschiede auf (z. B. Blatttranspirationsrate: Abb. 5, S. 37). Zur Verringerung der Varianz wurde die Anzahl der Messungen je Parzelle im darauf folgenden Jahr verdoppelt. Dennoch wurde auch im

zweiten und dritten Nachfruchtjahr teilweise eine erhebliche Varianz festgestellt. Dieser Sachverhalt deutet darauf hin, dass eine weitere Erhöhung der Anzahl der Messungen sinnvoll sein könnte. In diesem Fall müsste entweder eine Reduktion der Anzahl untersuchter Varianten erfolgen, oder es müsste eine Ausdehnung der Messreihe auf zwei Tage akzeptiert werden.

In der ersten Schätzung zur Hochskalierung der Gaswechselraten von der Einzelblatt-Ebene auf den Bestand wurde die Gaswechselrate des Fahnenblatts als repräsentativ für den grünen Blattapparat insgesamt angesehen. Dieses Vorgehen ließ die Tatsache unberücksichtigt, dass die Blätter der unteren Blattetagen durch Beschattung und fortschreitende Seneszenz eine geringere Leistungsfähigkeit aufwiesen als das Fahnenblatt. Insbesondere bei einem hohem BFI wurden die Bestandesgaswechselraten dadurch deutlich höher geschätzt, als sie bei Bestandesgaswechsellmessungen unter Anwendung eines *closed chamber*-Systems im *CeFIT* erfasst wurden (LANGENSIEPEN et al. 2012). Dennoch konnten mit der ersten Schätzung Unterschiede zwischen Werten der potentiellen Bestandesgaswechselrate in Abhängigkeit von den Vorfruchtvarianten erfasst werden. Die verbesserte Schätzung berücksichtigte das geringere Lichtangebot und die Alterung von Blättern unterer Etagen durch die zusätzlichen Messungen auf einer unteren Blattetage mit geringerer Beleuchtungsintensität. Erwartungsgemäß wurden im Vergleich der ersten Schätzung und der verbesserten Schätzung für die Bestandesgaswechselrate von Raps 2012 mit der verbesserten Schätzung geringere Werte ermittelt (Kap. 4.2.7.1). Auffällig war, dass die Unterschiede zwischen der ersten und der verbesserten Schätzung hinsichtlich der Bestandesphotosyntheserate größer waren als hinsichtlich der Bestandestranspirationsrate. Dieser Sachverhalt lässt sich durch Ergebnisse anderer Untersuchungen erklären, in denen mit zunehmender Seneszenz der Blätter nach der Blüte eine sinkende Wassernutzungseffizienz festgestellt wurde (ATKINSON et al. 1989; GROSSMAN-CLARKE et al. 1999). Grund dafür war, dass die Photosyntheserate im Zuge der fortschreitenden Seneszenz schneller abnahm als die Transpirationsrate. Die unterschiedlichen Stadien der Blattseneszenz in Abhängigkeit von der Blattetage wurden demnach durch die verbesserte Schätzung treffgenauer erfasst. Dennoch kann auch die verbesserte Schätzung aufgrund der konstanten, intensiven Beleuchtung nur eine Annäherung an die Feldbedingungen sein.

Insbesondere für Raps ist außerdem zu berücksichtigen, dass die berechneten Bestandesgaswechselraten nur den Gaswechsel der Blätter berücksichtigen. Photosynthese und Transpiration von Schoten und Stängeln des Rapses, und in ähnlicher Weise der Gaswechsel des Halms des Weizens sowie des Halms und der Grannen der Gerste, wurden nicht erfasst.

Hood-Infiltrometrie

Mithilfe des *Hood*-Infiltrometers sollten die Gesamt-Infiltration sowie die Anteile der Infiltration in Poren bestimmter Größenklassen gemessen werden. Dafür erschien das System besonders geeignet, da es durch Verzicht auf Kontaktsand im Vergleich zu traditionellen membranbasierten Tensionsinfiltrometern die Verblockung von

oberflächennahen Makroporen durch Einschwemmung von losen Partikeln vermeidet (BUCZKO et al. 2006). Mit dem *Hood*-Infiltrometer wurden Daten in einem prinzipiell plausiblen Wertebereich erhoben (Kap. 5.2.3). Allerdings war es nicht möglich, einen Zusammenhang zwischen der gemessenen hydraulischen Leitfähigkeit und der Vorfruchtvariante oder der visuell geschätzten Bioporendichte der Versuchsfläche herzustellen. Durch angelegte Tensionen sollten bestimmte Porengrößenklassen sukzessive von der Infiltration ausgeschlossen werden, um so ihren Anteil an der Gesamt-Infiltration des Bodenkörpers berechnen zu können. Ein ähnlicher Ansatz wurde auf dem Oberboden bereits in anderen Versuchen gewählt (BUCZKO et al. 2006). Unter den Bedingungen des Unterbodens im *CeFIT* konnte jedoch in beiden untersuchten Größenklassen kein Einfluss der vor Messung quantifizierten Anzahl der Poren auf die Infiltration in diese Poren festgestellt werden (Kap. 4.5). Auffällig ist insbesondere, dass in der Messreihe 2012 mehrfach eine erhebliche Infiltration in Poren der Größenklasse > 5 mm festgestellt wurde, obwohl keine Pore der entsprechenden Größe visuell zu erfassen war (Abb. 33, S. 90). Im Unterschied zu andernorts durchgeführten Untersuchungen auf Oberboden (BUCZKO et al. 2006) war es somit im *CeFIT* nicht möglich, durch gestaffelte Verminderung des hydraulischen Potentials Rückschlüsse auf die Makroporosität des Unterbodens zu ziehen. Die Gründe dafür lassen sich nicht eindeutig identifizieren. Eine mögliche Fehlerquelle ist die ungenaue Abschätzung des Äquivalenzdurchmessers der Pore anhand eines vertikalen Anschnitts. Ein im Verlauf der Pore nicht konstanter Durchmesser beeinflusst deren Äquivalenzdurchmesser entscheidend. Entsprechende Beobachtungen waren an der Anschnittstelle nicht möglich, da nur ein kurzer Abschnitt der Poren einsehbar war. Zusätzlich weisen mehrere Autoren darauf hin, dass nicht nur der Durchmesser, sondern auch weitere Eigenschaften von Poren einen Einfluss auf deren Infiltrationsleistungen haben. Beispielsweise wurde die unterschiedliche Entwässerung der Einzelpore als entscheidender Faktor identifiziert, da eine blind endende Pore nur in die Matrix entwässern kann, eine andere Pore aber beispielsweise in Mäusegänge, was zu einer entsprechend größeren Perkolation führt (BOUMA et al. 1982). Außerdem muss eine möglicherweise auftretende Verblockung der Pore durch Bodenmaterial, Wurzeln (MITCHELL et al. 1995; RASSE & SMUCKER 1998) oder einen Regenwurm (LEE & FOSTER 1991) in Betracht gezogen werden. Zu beachten ist auch die mit zunehmender Länge der Pore steigende Porenoberfläche, durch die Wasser aus der Pore in die umgebende Bodenmatrix eindringen kann, und der in langen Röhren auftretende, relevant hohe hydraulische Druck der einstehenden Wassersäule (SMETTEM 1986). Außerdem wird auf unterschiedliche Stabilität von Makroporen in Abhängigkeit von deren Genese hingewiesen (MITCHELL et al. 1995). Offen bleibt insgesamt die Frage, ob das *Hood*-Infiltrometer aufgrund der unterschiedlichen Charakteristik von Makroporosität des Ober- und Unterbodens generell für Untersuchungen des Unterbodens eingesetzt werden kann, da bisher keine entsprechenden Erfahrungen vorliegen.

Ein Ansatz zur Lösung dieser Probleme könnte sein, den Einfluss der kleinräumigen Heterogenität der Bioporosität durch eine erhöhte Anzahl von Messwiederholungen oder durch den Einsatz einer, derzeit allerdings nicht verfügbaren, größeren Messhaube zu

begrenzen. Möglicherweise könnte unter diesen Bedingungen eine Variantenunterscheidung erfolgen. Zur Klärung der Gründe für den fehlenden Zusammenhang von hydraulischer Leitfähigkeit und visuell erfasster Bioporendichte könnte die *Hood*-Infiltrometrie auf Bodenkörpern mit bekannter Porosität eingesetzt werden. Nach Ergebnissen von Untersuchungen an ungestört entnommenen Bodensäulen aus dem *CeFIT* kann deren Porosität nicht-invasiv mittels Computertomographie bestimmt werden (PAGENKEMPER et al. 2015). Falls beim Einsatz des *Hood*-Infiltrometers auf derartigen Bodensäulen keine Randeffekte auftreten sollten, könnte ein Abgleich der exakten Daten zur Porosität mit den Ergebnissen der Bioporendichtezählung und der Messung der hydraulischen Leitfähigkeit erfolgen. Auf diese Weise könnte überprüft werden, ob die visuelle Zählung der Bioporendichte einen Rückschluss auf die Bioporosität trotz fehlender Kenntnis von Porenparametern wie Länge, Kontinuität und Entwässerung erlaubt. Darüber hinaus wäre es möglich, eventuell andere Parameter zu identifizieren, die eine enge Korrelation zur hydraulischen Leitfähigkeit aufweisen.

Deposition und Wiederaufnahme von Stickstoff

Der Versuch zu Deposition und Wiederaufnahme von Stickstoff durch nachfolgende Kulturen hatte zum Ziel, Prozesse der Drilosphären-Nährstoffdynamik zu erfassen. Unter Feldbedingungen war es möglich, den Eintrag von Stickstoff aus Mulch in die Drilosphäre bis in den Unterboden nachzuweisen (Abb. 26, S. 84). Außerdem wurde die Nährstoffaufnahme aus dem Unterboden und insbesondere aus der Drilosphäre der Tiefe > 45 cm belegt (Kap. 4.4.2). Die verwendete Versuchsmethodik ist somit geeignet, neue Einsichten in drilosphärenbezogene Prozesse der Nährstoffdynamik in vorab wählbarer Tiefe zu gewinnen. Unter Feldbedingungen wurde der *tracer* allerdings nicht nur in die Drilosphäre, sondern auch in den *bulk*-Boden der Unterteilstücke eingetragen. Vermutlich gelangte zwar ein Großteil des *tracers* durch Regenwurmaktivität in die Drilosphäre, einerseits durch Einzug von Mulch in Wohnröhren, andererseits auch durch Ablagerung von Regenwurmausscheidungen an die Porenwandung. Zusätzlich ist es wahrscheinlich, dass auch präferenzierter Fluss durch die Bioporen sowie Matrixfluss zu einer ergänzenden Einwaschung des Stickstoffs führten, wie auch in einem anderen Versuch festgestellt wurde (BINET & TREHEN 1992).

Die festgestellten Werte des ^{15}N -Anteils des Gesamt-Stickstoffs in der Drilosphäre streuten erheblich. So wurde für die unterste Tiefenstufe (75 – 105 cm) kein signifikanter Unterschied zwischen dem ^{15}N -Anteil in der Porenwandung verglichen mit dem im *bulk*-Boden festgestellt, obwohl sich die absoluten Werte des ^{15}N -Anteils um den Faktor 2 unterschieden (Abb. 26, S. 84). Dieser Sachverhalt erklärt sich vermutlich durch die Tatsache, dass im Feld Bioporen mit Auskleidung aus dem Jahr der Mulchapplikation nicht eindeutig identifiziert werden konnten. Eine gegenüber dem *bulk*-Boden dunkler erscheinende Drilosphäre wurde als Hinweis auf eine durch einen Regenwurm bewohnte Röhre aufgefasst. Das Alter der Röhre bzw. der Zeitpunkt der (letzten) Auskleidung war jedoch im Feld nicht zu bestimmen. Daher ist davon auszugehen, dass auch Röhren beprobt wurden, die schon in den Vorjahren

ausgekleidet worden waren. Diese Poren wiesen demnach keinen *tracer*-Eintrag und damit keinen erhöhten ^{15}N -Anteil des Gesamt-Stickstoffs auf. Aufgrund der geringeren Bioporendichte in größerer Bodentiefe hatten einzelne fälschlich beprobte Röhren einen hohen Einfluss auf die Drilosphären-Mischprobe einer Parzelle, womit die große Streuung zwischen den Feldwiederholungen erklärt werden kann. Außerdem bereitete die trennscharfe Ablösung der Drilosphäre Schwierigkeiten, da trockenes Substrat zum Bröckeln neigte und daher eine exakte Separierung nicht immer möglich war. Auch dieser Umstand könnte dazu beigetragen haben, dass nicht-repräsentatives Probenmaterial genommen wurde und Streuungen verursachte. Zusammenfassend muss darauf hingewiesen werden, dass die Mischproben aus der Drilosphäre durch Heterogenität sowohl zwischen den Poren als auch innerhalb der Einzelpore gekennzeichnet waren. Die nicht signifikant mögliche Unterscheidung des ^{15}N -Anteils des Gesamt-Stickstoffs von Proben aus der Porenwandung verglichen mit solchen des *bulk*-Bodens deutet somit eher auf Probleme bei der Probengewinnung als auf geringe Unterschiede zwischen Werten des ^{15}N -Anteils des Gesamt-Stickstoffs in den Bodenkompartmenten in dieser Tiefenstufe hin.

Um diesen Problemkomplex zu umgehen, wäre ein Versuch nach Vorbild des in dieser Arbeit beschriebenen Ansatzes auf einem unstrukturierten, regenwurmfreien Boden möglich. Parallel zur Mulchapplikation müssten Regenwürmer in den Boden eingebracht werden. Da keine Altröhren vorhanden wären, wäre jede Biopore mit *tracer*-haltigen Ausscheidungen markiert, so dass nur noch geringe Unterschiede zwischen einzelnen Poren aufgrund von Aktivitätsunterschieden der Regenwürmer auftreten würden.

Die exakte Quantifizierung der Stickstoffaufnahme aus den oberen 45 cm Bodentiefe und der Bodentiefe > 45 cm war mit der angewandten Methodik nicht möglich, da der mittlere ^{15}N -Anteil des von den Nachfrüchten aus dem Unterboden aufgenommenen Stickstoffs nicht ermittelt werden konnte. Durch Grenzwertbetrachtung wurde jedoch für jede Variante die anteilige Minimal-Stickstoffaufnahme aus dem Unterboden bestimmt (Kap. 4.4.2). Darüber hinaus wurde auf Basis der gemessenen Werte des ^{15}N -Anteils des Gesamt-Stickstoffs der Drilosphäre eine konservative Schätzung zur unterbodenbürtigen Stickstoffaufnahme der Nachfrüchte vorgenommen. Zur Verbesserung dieser Schätzung sollte eine herkömmliche Abschätzung der Aufnahme von ober- und unterbodenbürtigem Stickstoff durch N_{min} -Bilanzierung erfolgen. Die genaue Bestimmung der jeweiligen Anteile der Stickstoffaufnahme aus der Drilosphäre gegenüber dem *bulk*-Boden bleibt methodisch eine Herausforderung, da dafür der spezifische von Wurzeln genutzte Bereich der Drilosphäre identifiziert und analysiert werden müsste.

Für eine genauere Untersuchung der räumlichen Verteilung des Nährstoffeintrags könnte in einem ersten Schritt ein feiner auflösendes Analyseverfahren angewendet werden. Möglich wäre z. B. die Entnahme von ungestörten Bodenproben, die Regenwurmröhren enthalten. Die Porenwandung könnte nach Tieffrieren einem Dünnschnittverfahren unterzogen werden (KUCHENBUCH & JUNGK 1982; GAHOONIA et al. 1994). Daran anschließen würde sich eine Massenspektroskopie, wie sie in anderen naturwissenschaftlichen Disziplinen an

Dünnschnitten angewendet wird (LISITSA et al. 2009; VERCAMMEN et al. 2010). Mithilfe einer solchen Analytik könnten einzelporenbasierte Untersuchungen für frei wählbare Bodentiefen vorgenommen werden. Dies würde eine exakte Bestimmung des *tracer*-Eintrags hinsichtlich Porenanzahl sowie Markierungsintensität und -tiefe ermöglichen.

5.4 Schlussfolgerungen

Anhand der Versuchsergebnisse werden die im Kap. 2 aufgestellten Hypothesen überprüft.

Hypothese 1: *Hinsichtlich Nährstoffakkumulation im Oberboden und Bioporengese sind Luzerne und Wegwarte (allorhiz) günstigere Vorfrüchte als Rohrschwingel (homorhiz), so dass die Nachfrüchte eine höhere Sprossmasse, einen intensiveren Gaswechsel und einen höheren Ertrag bilden bzw. aufweisen.*

Die in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen gaben Hinweise darauf, dass der Faktor Vorfruchtart die Bioporendichte signifikant beeinflusste; im Versuch A wurden nach Wegwarte mehr Bioporen mit einem Äquivalenzdurchmesser von ≥ 2 mm gefunden als nach Rohrschwingel. Im Trend war ebenfalls die Anzahl von Bioporen (≥ 2 mm) nach Luzerne höher als nach Rohrschwingel. Zudem wurde festgestellt, dass Nachfruchtwurzeln in Bioporen einwuchsen, in Kontakt mit der Drilosphäre traten und Stickstoff aus der Drilosphäre aufnahmen. Diese Sachverhalte deuten darauf hin, dass die allorhizen Vorfrüchte durch die Generierung von Bioporen für die Nachfrüchte potentiell *hot spots* für die Nährstoffaufnahme schufen. Darüber hinaus traten weitere nährstoffbezogene Effekte der Vorfrüchte auf. Zum einen konnte der Biomasseeintrag im Zuge der Mulchschnitte potentiell eine verschieden umfangreiche Nährstoffakkumulation im Oberboden bedingen, da unterschiedlich hohe, teilweise aus dem Unterboden gespeiste Nährstoffmengen enthalten waren. Zum anderen ist anzunehmen, dass die artspezifische Ausprägung des Wurzelsystems der Vorfrüchte durch Bildung von Bioporen einen Einfluss auf die Zugänglichkeit des Unterbodens hatte. Anhand der erfassten Nährstoffparameter konnten die genannten Vorfruchteffekte nicht unterschieden werden. Die Untersuchungen zur Zufuhr von Nährstoffen im Mulch in den Oberboden und zur Genese von mittel- und großlumigen Bioporen mit einem Äquivalenzdurchmesser ≥ 2 mm weisen darauf hin, dass beide Prozesse in Wegwarte-Varianten stärker ausgeprägt waren als in den entsprechenden Rohrschwingel-Varianten. Daher wären sowohl eine höhere Nährstoffakkumulation im Oberboden als auch eine erleichterte Zugänglichkeit des Unterbodens nach Wegwarte verglichen mit Rohrschwingel zu erwarten gewesen. Beide Effekte wären potentiell förderlich für Wachstum und Entwicklung von Nachfrüchten. Dennoch wurden keine konsistenten Hinweise auf eine pflanzenbauliche Vorzüglichkeit der Vorfrucht Wegwarte verglichen mit Rohrschwingel festgestellt. Es muss aber beachtet werden, dass die nach Rohrschwingel festgestellte geringere Dichte mittel- und großlumiger Bioporen möglicherweise durch eine höhere Dichte kleinlumiger Bioporen kompensiert wurde. Untersuchungen zu kleinlumigen Bioporen wurden im Versuch A jedoch nicht vorgenommen. Zudem ist festzustellen, dass aufgrund der Standortgegebenheiten eine Null-Kontrolle hinsichtlich der Bioporen mit einem Äquivalenzdurchmesser ≥ 2 mm nicht verfügbar war. Dieser Sachverhalt könnte dazu geführt haben, dass der Einfluss der höheren Bioporendichte nach Wegwarte auf das Sprosswachstum der Nachfrüchte nicht sichtbar wurde, da mögliche Schwellenwerte der Bioporendichte evtl. in allen Varianten erreicht oder überschritten waren.

Aus den genannten Gründen wird Hypothese 1 unter Vorbehalt abgelehnt.

Hypothese 2: *Nach der legumen Luzerne verbleibt im Boden eine höhere Menge an Residualstickstoff als nach Wegwarte und Rohrschwingel, so dass die Nachfrüchte eine höhere Sprossmasse, einen intensiveren Gaswechsel und einen höheren Ertrag bilden bzw. aufweisen.*

In allen drei untersuchten Nachfruchtjahren wurden Unterschiede der Sprossentwicklung in Abhängigkeit von der Vorfruchtart festgestellt. Zumeist wurde Luzerne als günstigste Vorfrucht im Vergleich zu Wegwarte und Rohrschwingel identifiziert. Die Ergebnisse der Sprossuntersuchungen an Kulturen des Hauptversuchs, des Düngungssteigerungsversuches und der Analysen des mineralischen Bodenstickstoffs deuten darauf hin, dass die Stickstoffwirkung der Luzerne dabei die größte Bedeutung hatte.

Die Hypothese 2 wird daher bestätigt.

Hypothese 3: *Mit zunehmender Anbaudauer der Vorfrucht (ein-, zwei- und dreijährig) verstärken sich deren Effekte auf die Nachfrüchte.*

Die Anbaudauer der Vorfrucht beeinflusste die Sprossparameter der Nachfrüchte im Unterschied zum Faktor Vorfruchtart nur in wenigen Fällen. Bei den Untersuchungen, die Hinweise auf einen Einfluss der Anbaudauer der Vorfrucht auf die Nachfrüchte ergaben, wurden jedoch stets nach zwei- und/oder dreijährigem Vorfruchtanbau stärkere Vorfruchteffekte festgestellt als nach einjährigem Vorfruchtanbau.

Aus den genannten Gründen wird Hypothese 3 unter Vorbehalt angenommen.

Hypothese 4: *Allorhize Nachfrüchte (Malve und Raps) werden stärker von nährstoff- und gefügevermittelten Vorfruchteffekten beeinflusst als homorhize Nachfrüchte (Getreide).*

In jedem Nachfruchtjahr war der Anteil der Untersuchungen, die durch die Versuchsfaktoren signifikant beeinflusst wurden, bei der allorhizen Nachfrucht größer als bei der homorhizen Nachfrucht. Die Versuchsergebnisse sprechen einerseits dafür, dass allorhize Nachfrüchte die Nährstoffe der Drilosphäre effizienter aufnehmen konnten. Andererseits war der phänotypische Effekt u. a. des zusätzlich zur Verfügung stehenden Stickstoffs bei den dikotylen, allorhizen Nachfrüchten größer.

Die Hypothese 4 wird bestätigt.

Hypothese 5: *Gestaffelte Stickstoffdüngung zur Nachfrucht Sommerweizen gibt Hinweise auf eine höhere Residualstickstoffmenge im Boden nach Luzerne verglichen mit Wegwarte sowie nach dreijährigem verglichen mit einjährigem Anbau der Vorfrüchte.*

Die Ergebnisse des Düngungssteigerungsversuchs weisen darauf hin, dass die unterschiedlich ausgeprägten Vorfruchtwirkungen von Luzerne und Wegwarte insbesondere bei ausbleibender oder geringer Düngung Nachfrucht-Sprossparameter beeinflussten. Die Anbaudauer der Vorfrucht hatte dagegen nur in wenigen Fällen einen Einfluss auf die Nachfrucht. Bei höheren Stickstoff-Gaben zur Nachfrucht wurden keine Unterschiede in Abhängigkeit von der Vorfruchtvariante festgestellt. Die Kompensierbarkeit der günstigen Vorfruchteffekte von Luzerne durch Stickstoffdünger weist darauf hin, dass ein Großteil der Unterschiede der Vorfruchtwirkung zwischen Luzerne und Wegwarte auf verschiedene Mengen von Residualstickstoff zurückzuführen ist.

Aus den genannten Gründen wird die Hypothese 5 bestätigt.

Hypothese 6: *Auf die Bodenoberfläche aufgebracht^{er} ¹⁵N-markierter Luzerne-Mulch wird von Destruenten in den Boden eingezogen und/oder gefressen. Direkt oder indirekt nach Verstoffwechslung wird so ein Teil der im Mulch enthaltenen Nährstoffe in die Drilosphäre des Unterbodens eingetragen.*

Der Versuch zur Deposition von Stickstoff lieferte Hinweise auf den Eintrag von ¹⁵N in den Boden bis in die Tiefenstufe von 75 - 105 cm. Dabei wurde ein markant höherer Eintrag in die Drilosphäre großlumiger Bioporen verglichen mit dem umgebenden *bulk*-Boden festgestellt, so dass der *tracer* vermutlich hauptsächlich durch Regenwurmaktivität in die Porenwandung gelangte.

Daher wird die Hypothese 6 bestätigt.

Hypothese 7: *Der ¹⁵N-tracer-Eintrag in die Drilosphäre kann tiefenstufendifferenziert nachgewiesen werden.*

Im Versuch zu Deposition und Wiederaufnahme von Stickstoff wurden verschiedene Tiefenstufen des Bodens beprobt. Dabei wurde festgestellt, dass mit zunehmender Tiefe die *tracer*-Einträge geringer waren.

Aus diesem Grund kann Hypothese 7 bestätigt werden.

Hypothese 8: *Der in die Drilosphäre eingetragene tracer ^{15}N ermöglicht es, den Beitrag der Drilosphäre des Unterbodens sowie des gesamten Unterbodens an der Stickstoffaufnahme der Nachfrüchte Sommerweizen und Futtermalve abzuschätzen.*

Der Versuch zur Wiederaufnahme von Stickstoff belegte die Aufnahme des tracers ^{15}N durch nachfolgende Kulturen aus der Drilosphäre des Unterbodens. Mithilfe der Versuchsdaten wurden die minimal mögliche und die maximal mögliche Stickstoffaufnahme berechnet sowie eine Schätzung für die Stickstoffaufnahme von Sommerweizen und Futtermalve aus dem Unterboden vorgenommen.

Die Hypothese 8 kann bestätigt werden, auch wenn die quantitative Abschätzung des aus dem Unterboden aufgenommenen Stickstoffs im Falle weiterer Versuche noch optimiert werden sollte.

Hypothese 9: *Analog zur Bioporendichte ist die Infiltrationsrate des Unterbodens nach den allorhizen Vorfrüchten Luzerne und Wegwarte höher als nach dem homorhizen Rohrschwengel, ebenso nach mehrjährigem verglichen mit einjährigem Vorfruchtanbau.*

Die Hood-Infiltrometrie lieferte keine Hinweise darauf, dass in der Vorfruchtphase unterschiedliche Infiltrationsraten des Unterbodens induziert wurden. Offen bleibt, ob mit anderen Infiltrometer-Systemen, die evtl. auf einer größeren Fläche messen und von kleinräumiger Heterogenität weniger beeinflusst werden, entsprechende Variantenunterschiede festgestellt werden könnten.

Aus den genannten Gründen wird Hypothese 9 unter Vorbehalt verworfen.

6 Zusammenfassung

Grundlage der vorliegenden Arbeit sind Untersuchungen zu Früchtefolgen mit ein- bis dreijährig kultivierten Futterpflanzen, die sich u. a. hinsichtlich ihrer Wurzelmorphologie unterscheiden. Die Sprossmasse der Vorfrüchte wurde nicht geerntet, sondern verblieb nach Mulchschnitten auf dem Feld. Ziel dieser Arbeit ist es, die Vorfruchtwirkung der ein- bis dreijährig kultivierten Feldfutterbestände auf verschiedene Nachfrüchte der anschließenden drei Jahre darzustellen.

Die Untersuchungen erfolgten in einem mehrfaktoriellen Feldversuch auf dem Campus Klein-Altendorf der Universität Bonn. Der Feldversuch diente als *Central Field Trial (CeFIT)* zur Bearbeitung von Fragestellungen, denen sich die DFG-Forschergruppe FOR 1320 *Crop Sequence and the Nutrient Acquisition from the Subsoil* widmete. Im Versuch A wurden ab dem Jahr 2007 die wurzelmorphologisch unterschiedlichen Futterpflanzen Luzerne (allorhiz), Wegwarte (allorhiz) und Rohrschwengel (homorhiz) für jeweils ein bis drei Jahre angebaut und wiederkehrend bei Erreichen der Nutzungsreife gemulcht (erster Versuchsfaktor: Vorfruchtart; zweiter Versuchsfaktor: Anbaudauer der Vorfrucht). Im Jahr 2009 wurde mit identischem Design Versuch B angelegt. Durch jährlich gestaffelte Ansaat waren nach der jeweils dritten Vegetationsperiode parallel ein-, zwei- und dreijährige Vorfruchtbestände vorhanden. In den folgenden drei Jahren wurden je eine homorhize Nachfrucht (Getreide) und eine allorhize Nachfrucht (Futtermalve bzw. Raps) kultiviert (dritter Versuchsfaktor: Nachfrucht-Früchtefolge). Der Großteil der pflanzenbaulichen Untersuchungen wurde an den Nachfruchtbeständen Sommerweizen und Futtermalve (2010), Wintergerste und Winterraps (2011) sowie Winterroggen und Winterraps (2012) im Versuch A durchgeführt. Ergänzende Versuche zum Einfluss der Versuchsfaktoren auf die Infiltrationsrate des Unterbodens sowie auf die Nährstoffdynamik der Drilosphäre fanden im Versuch B statt. Durch Erhebung von Sprossparametern wie Sprossmasse, Blattfläche, Gaswechsel und Ertragsstruktur der Nachfrüchte sollten mögliche Einflüsse der Faktoren Vorfruchtart sowie Anbaudauer der Vorfrucht auf die Nachfrüchte erfasst werden. Von besonderem Interesse war dabei die Aufklärung der relevanten Beeinflussungswege. Dazu wurde eine Überprüfung von Wirkungspfaden mit direktem Bezug zu Wasser- und Nährstoffversorgung einerseits und bioporenassoziierten bzw. gefügevermittelten Effekten andererseits vorgenommen.

Der Faktor Vorfruchtart beeinflusste als Hauptwirkung ca. 54 % der Untersuchungen an den Nachfrüchten. Verglichen mit dem Faktor Vorfruchtart war der Faktor Anbaudauer der Vorfrucht von nachrangiger Bedeutung, da er nur in ca. 12 % der Untersuchungen als Hauptwirkung Einfluss auf die Sprossentwicklung der Nachfrüchte hatte.

Untersuchungen am Pflanzenspross sowohl im Hauptversuch als auch im Rahmen eines Düngungssteigerungsversuchs sowie Messungen des mineralischen Bodenstickstoffs gaben Hinweise darauf, dass der Einfluss des Faktors Vorfruchtart im Wesentlichen von der Stickstoffwirkung der Luzerne verursacht wurde. Entsprechende Reaktionen der Nachfrüchte wie Steigerung der Sprosstrockenmasse, des Blattflächenindex oder des Kornertrags waren bis ins dritte Nachfruchtjahr festzustellen.

Ergebnisse eigener Untersuchungen sowie Forschungsergebnisse anderer Forscher aus dem *CeFIT* deuten darauf hin, dass hypothesengemäß in Abhängigkeit von der Vorfruchtart eine Änderung des Bodengefüges bis in den Unterboden auftrat. Nach Wegwarte waren mehr Bioporen vorhanden als nach Rohrschwengel. Weiterhin wurde festgestellt, dass die Nachfrüchte Wurzelkontakt zur Drilosphäre herstellten. Zudem waren der Anteil der Wurzellänge im Unterboden an der Gesamt-Wurzellänge sowie die Durchwurzelungstiefe nach Wegwarte höher als nach Rohrschwengel. Die Sprossparameter der Wintergetreide und der allorhizen Nachfrüchte wurden aber nur vereinzelt von der Art der nicht-legumen Vorfrucht beeinflusst, so dass keine konsistente Vorzüglichkeit einer hohen Bioporendichte festgestellt wurde. Es ist daher anzunehmen, dass diese Bestände unabhängig von einer durch mittel- und großlumige Bioporen potentiell erleichterten Zugänglichkeit von Unterboden-Ressourcen hinreichend mit Wasser und Nährstoffen versorgt waren.

Vereinzelt hatte der Faktor Anbaudauer der Vorfrucht einen Einfluss auf Sprossparameter der Nachfrüchte. Zumeist waren dabei die Nachfrüchte nach mehrjährigen Vorfruchtvarianten vitaler als nach einjährigen. Bioporenzählungen ergaben, dass die Anzahl von Bioporen jedoch nicht von der Anbaudauer der Vorfrucht beeinflusst war. Im Unterschied dazu war die Abundanz von tiefgrabenden Regenwürmern nach mehrjähriger Vorfruchtkultur höher als nach einjähriger. Daher wird angenommen, dass die höhere Regenwurmpopulation durch Erhöhung der Anzahl nährstoffreicher, unverblockter und stabiler Bioporen zu günstigeren Bedingungen für die Nachfrüchte führte. Ergebnisse von Untersuchungen an Sommerweizen deuten darauf hin, dass die Kultur in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht unterschiedlichen Zugang zu Wasser hatte. Im Falle von Sommerweizen (2010) lagen besondere Bedingungen vor, da mehrere ungünstige Faktoren wie geringe Durchwurzelungstiefe und ein durch Frühsommertrockenheit (Tab. 2, S. 12) wasserarmer Oberboden zusammentrafen. Mit steigender Anbaudauer der Vorfrucht wurde eine, wenn auch nur geringe, Förderung der Durchwurzelungstiefe des Sommerweizens festgestellt. Übereinstimmend damit wurden nach mehrjähriger Vorfrucht höhere Werte der Transpirationsrate des Sommerweizens erfasst. Diese Beobachtungen deuten darauf hin, dass eine Erhöhung der Bioporendichte insbesondere dann eine günstige Wirkung auf Pflanzenbestände haben kann, wenn das Pflanzenwachstum vergleichsweise engen Restriktionen unterworfen ist. Entsprechende Bedingungen könnten beispielsweise herrschen, wenn Trockenheit oder Nährstoffmangel im Oberboden oder Dichtlagerung der Matrix des Unterbodens auftreten, und zusätzlich eine geringe Ausgangsdichte der Bioporen herrscht.

Die allorhizen Nachfrüchte wurden durch die Versuchsfaktoren stärker beeinflusst als die homorhizen. Es wird vermutet, dass einerseits der Stickstoff-Effekt der Luzerne einen günstigen Einfluss auf den Blattflächenindex und die Blattflächendauer insbesondere der dikotylen, allorhizen Nachfrüchte hatte. Andererseits könnte bei den Allorhizen auch die Erhöhung der Bioporendichte aufgrund besserer Fähigkeit zur Nutzung von Nährstoffen aus der Drilosphäre wirkungsvoller gewesen sein als bei den Homorhizen.

Der Versuch zu Deposition und Wiederaufnahme von Stickstoff belegte das Potential des neuartigen Ansatzes zur Untersuchung der Drilosphären-Nährstoffdynamik. Die Methodik ermöglichte *in situ* eine tiefenstufenbezogene Analyse des Nährstoffeintrags aus Mulch in die Drilosphäre. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass die vermutlich überwiegend regenwurminduzierte *tracer*-Verlagerung mindestens bis in die Tiefenstufe von 75 cm - 105 cm erfolgte. Eine hohe Variabilität des *tracer*-Eintrags zwischen einzelnen Poren deutet darauf hin, dass der verwendete Versuchsansatz durch feiner auflösende Analysemethoden weiter verbessert werden kann. Der Versuchsansatz ist zudem geeignet, die Nährstoffaufnahme durch nachfolgende Kulturen aus einer vorab wählbaren Bodentiefe zu untersuchen. Im *CeFIT* wurde für die beiden Nachfrüchte Sommerweizen und Futtermalve festgestellt, dass die Kulturen *tracer* aus einer Bodentiefe unterhalb von 45 cm aufnahmen. Eine exakte Quantifizierung des Anteils unterbodenbürtiger Stickstoffaufnahme an der Gesamt-Stickstoffaufnahme war nicht möglich.

Die *Hood*-Infiltrometrie war nicht geeignet, einen Zusammenhang zwischen der visuell erfassten Bioporendichte und der Infiltrationsleistung des Unterbodens aufzuzeigen. Die Gründe für diesen Sachverhalt lassen sich mit den vorliegenden Daten nicht abschließend benennen. Da eine Vielzahl von Eigenschaften die Infiltrationsfähigkeit von Poren bestimmt, ist davon auszugehen, dass im *CeFIT* nicht untersuchte Faktoren den Einfluss der Bioporendichte auf die Infiltration überdeckten. Weitere Untersuchungen zur Infiltration von Bodensäulen mit bekannter Porosität könnten zu umfänglicherem Verständnis der Zusammenhänge führen.

Weiterer Forschungsbedarf besteht zudem hinsichtlich der Bedeutung von Bioporen für die Entwicklung von Pflanzenbeständen, insbesondere auf weniger fruchtbaren Standorten. Darüber hinaus sollten Untersuchungen zum Einfluss der Wurzelmorphologie von Vor- und Nachfrüchten auf die Ausprägungsintensität von gefügevermittelten Vorfruchteffekten weitergeführt und vertieft werden. Weitere Erkenntnisse zur Nährstoffdynamik der Drilosphäre könnten erlangt werden, indem bei einer Fortführung des *tracer*-gestützten Versuchs zu Deposition und Wiederaufnahme von Stickstoff eine feiner auflösende Analytik eingesetzt würde. Zudem könnte die Abschätzung der unterbodenbürtigen Stickstoffaufnahme durch wiederholte Erfassung der N_{\min} -Menge im Boden validiert werden. Weitere Untersuchungen sollten zudem den Einfluss von Bioporen auf die Infiltrationsrate des Unterbodens adressieren.

Bei Bestätigung des angedeuteten Potentials von Bioporen für die Versorgung von Pflanzenbeständen sollte die Schaffung und Nutzung von Bioporen als Bestandteil des Nährstoffmanagements in Fruchtfolgen vor allem für agrarische *low input*-Systeme angestrebt werden.

7 Literaturverzeichnis

- ALLEN, E. J. & D. G. MORGAN, 1972: A quantitative analysis of the effects of nitrogen on the growth, development and yield of oilseed rape. *The Journal of Agricultural Science* **78** (02), 315-324.
- ANGERS, D. A. & J. CARON, 1998: Plant-induced changes in soil structure: Processes and feedbacks. *Biogeochemistry* **42** (1-2), 55-72.
- ANGUS, J. F., T. P. BOLGER, J. A. KIRKEGAARD & M. B. PEOPLES, 2006: Nitrogen mineralisation in relation to previous crops and pastures. *Aust. J. Soil Res* **44** (4), 355-365.
- ATAFAR, Z., A. MESDAGHINIA, J. NOURI, M. HOMAEI, M. YUNESIAN, M. AHMADIMOGHADDAM & A. H. MAHVI, 2008: Effect of fertilizer application on soil heavy metal concentration. *Environmental Monitoring and Assessment* **160** (1), 83.
- ATHMANN, M., T. KAUTZ, N. HUANG & U. KÖPKE, 2014: Biopore characterization with *in situ* endoscopy: Influence of earthworms on carbon and nitrogen contents. In: *Building Organic Bridges. Proceedings of the 4th ISOFAR Scientific Conference at the Organic World Congress 2014, 13 - 15 October 2014 in Istanbul, Turkey*, 415-418. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig.
- 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, C. J., W. J. DAVIES & T. A. MANSFIELD, 1989: Changes in Stomatal Conductance in Intact Ageing Wheat Leaves in Response to Abscisic Acid. *Journal of Experimental Botany* **40** (9), 1021-1028.
- BAREJ, J. A. M., S. PÄTZOLD, U. PERKONS & W. AMELUNG, 2014: Phosphorus fractions in bulk subsoil and its biopore systems. *Eur J Soil Sci* **65** (4), 553-561.
- BELFORD, R. K., B. KLEPPER & R. W. RICKMAN, 1987: Studies of Intact Shoot-Root Systems of Field-Grown Winter Wheat. II. Root and Shoot Developmental Patterns as Related to Nitrogen Fertilizer. *Agronomy Journal* **79**, 310-319.
- 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.
- BEVEN, K. & P. GERMANN, 1982: Macropores and water flow in soils. *Water Resour. Res.* **18** (5), 1311-1325.
- BINET, F. & P. CURMI, 1992: Structural effects of *Lumbricus terrestris* (oligochaeta: lumbricidae) on the soil-organic matter system: Micromorphological observations and autoradiographs. *Soil Biology and Biochemistry* **24** (12), 1519-1523.
- BINET, F. & P. TREHEN, 1992: Experimental microcosm study of the role of *lumbricus terrestris* (oligochaeta: lumbricidae) on nitrogen dynamics in cultivated soils. *Soil Biology and Biochemistry* **24** (12), 1501-1506.
- BLUMENTHAL, J. M. & M. P. RUSSELLE, 1996: Subsoil Nitrate Uptake and Symbiotic Dinitrogen Fixation by Alfalfa.
- BOAWN, L. C., J. L. NELSON & C. L. CRAWFORD, 1963: Residual Nitrogen from NH₄NO₃ Fertilizer and from Alfalfa Plowed under.
- BOHNE, H., 1991: Der Einfluß künstlicher vertikaler Grobporen in einer verdichteten Bodenmatrix auf das Wachstum von Winterweizen I. Wachstum von Winterweizen auf einer Parabraunerde aus Löß. *Z. Pflanzenernaehr. Bodenk.* **154** (1), 27-31.
- BOUCHÉ, M. B., 1975: Action de la faune sur les états de la matière organique dans les écosystèmes. In: KILBERTUS, G., O. REISINGER, A. MOUREY & J. A. CANCELA DA FONSECA (Hrsg.): *Biodégradation et humification*, Pierron.

- BOUMA, J., 1990: Using morphometric expressions for macropores to improve soil physical analyses of field soils. *Geoderma* **46** (1–3), 3-11.
- BOUMA, J., C. F. M. BELMANS & L. W. DEKKER, 1982: Water Infiltration and Redistribution in a Silt Loam Subsoil with Vertical Worm Channels. *Soil Science Society of America Journal*, **46** (5), 917-921.
- BROWN, S. M. A., H. F. COOK & H. C. LEE, 2000: Topsoil Characteristics from a Paired Farm Survey of Organic versus Conventional Farming in Southern England. *Biological Agriculture & Horticulture* **18** (1), 37-54.
- BUCZKO, U., O. BENS & R. F. HÜTTL, 2006: Tillage Effects on Hydraulic Properties and Macroporosity in Silty and Sandy Soils. *Soil Science Society of America Journal*, **70** (6), 1998-2007.
- CAMMERAAT, L. H., 1992: Hydro-geomorphologic Processes in a Small Forested Sub-catchment. Preferred Flow-paths of Water. Doctoral Thesis, University of Amsterdam. University of Amsterdam Faculty of Environmental Sciences.
- CLASSEN, N., 1993: Die Bedeutung des Aneignungsvermögens der Pflanzen für den Nährstoffhaushalt. In: *Berichte über Landwirtschaft 207. Sonderheft. Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit. Band 5: Nährstoffhaushalt*, 85-107.
- 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.
- CORNISH, P. S., 1993: Soil macrostructure and root growth of establishing seedlings. *Plant Soil* **151** (1), 119-126.
- CORTEZ, J., R. HAMEED & M. B. BOUCHÉ, 1989: C and N transfer in soil with or without earthworms fed with ¹⁴C- and ¹⁵N-labelled wheat straw. *Soil Biology and Biochemistry* **21** (4), 491-497.
- 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.
- DAHLIN, A. S. & M. STENBERG, 2009: Cutting regime affects the amount and allocation of symbiotically fixed N in green manure leys. *Plant and Soil* **331** (1), 401-412.
- DANIEL, O., 1992: Population dynamics of *lumbricus terrestris* L. (oligochaeta: lumbricidae) in a meadow. *Soil Biology and Biochemistry* **24** (12), 1425-1431.
- DAWSON, C. J. & J. HILTON, 2011: Fertiliser availability in a resource-limited world: Production and recycling of nitrogen and phosphorus. *The challenge of global food sustainability* **36, Supplement 1** (0), S14-S22.
- DEAR, B. S., M. B. PEOPLES, P. S. COCKS, A. D. SWAN & A. B. SMITH, 1999: Nitrogen fixation by subterranean clover (*Trifolium subterraneum* L.) growing in pure culture and in mixtures with varying densities of lucerne (*Medicago sativa* L.) or phalaris (*Phalaris aquatica* L.). *Aust. J. Agric. Res.* **50** (6), 1047-1058.
- DEXTER, A. R., 1991: Amelioration of soil by natural processes. *Soil Till. Res.* **20** (1), 87-100.
- DIEPENBROCK, W., 2000: Yield analysis of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): a review. *Field Crops Research* **67** (1), 35-49.
- DINTER, A., C. OBERWALDER, P. KABOUW, M. COULSON, G. ERNST, T. LEICHER, M. MILES, G. WEYMAN & O. KLEIN, 2012: Occurrence and distribution of earthworms in agricultural landscapes across Europe with regard to testing for responses to plant protection products. *Journal of Soils and Sediments* **13** (2), 278-293.
- DROOGERS, P., F. B. W. VAN DER MEER & J. BOUMA, 1997: Water accessibility to plant roots in different soil structures occurring in the same soil type. *Plant and Soil* **188** (1), 83-91.

- EHLERS, W., 1975a: Einfluß von Wassergehalt, Struktur und Wurzeldichte auf die Wasseraufnahme von Weizen auf Löß-Parabraunerde. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* (22), 141-156.
- EHLERS, W., 1975b: Observations on earthworm channels and infiltration on tilled and untilled loess soil. *Soil Sci.* **119** (3), 242-249.
- EHLERS, W., U. KÖPKE, F. HESSE & W. BÖHM, 1983: Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. *Soil and Tillage Research* **3** (3), 261-275.
- ELKINS, C.B., 1985: Plant roots as tillage tools. In: *Tillage machinery systems as related to cropping systems*, 519-523. ICDS Conference, Auburn, Ala., USA.
- ELKINS, C.B., R.L. HAALAND & C.S. HOVELAND, 1977: Grass roots as a tool for penetrating soil hardpans and increasing crop yields. *Proceedings of the 34th Southern Pasture and Forage Crop Improvement Conference*, Auburn **34**, 21-26.
- EMMERLING, C., K. M. RASSIER & R. SCHNEIDER, 2015: A simple and effective method for linking field investigations of earthworms and water infiltration rate into soil at pedon-scale. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* **178** (6), 841-847.
- ERNST, G. & C. EMMERLING, 2009: Impact of five different tillage systems on soil organic carbon content and the density, biomass, and community composition of earthworms after a ten year period. *European Journal of Soil Biology* **45** (3), 247-251.
- FOWLER, D. B., J. BRYDON & R. J. BAKER, 1989: Nitrogen Fertilization of No-Till Winter Wheat and Rye. I. Yield and Agronomic Responses. *Agronomy journal*, **81** (1), 66-72.
- FULLEN, M. A., 1998: Effects of grass ley set-aside on runoff, erosion and organic matter levels in sandy soils in East Shropshire, UK. *Soil and Tillage Research* **46** (1-2), 41-49.
- GAHOONIA, T. S., S. RAZA & N. E. NIELSEN, 1994: Phosphorus depletion in the rhizosphere as influenced by soil moisture. *Plant Soil* **159** (2), 213-218.
- 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.
- GARZ, J., W. SCHLIEPHAKE & W. MERBACH, 2000: Changes in the subsoil of long-term trials in Halle (Saale), Germany, caused by mineral fertilization. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* **163** (6), 663-668.
- GIUFFRÉDE LÓPEZ CARNELO, L., S. R. de MIGUEZ & L. MARBÁN, 1997: Heavy metals input with phosphate fertilizers used in Argentina. *Science of The Total Environment* **204** (3), 245-250.
- GŁĄB, T., B. ŚCIGALSKA & B. ŁABUZ, 2013: Effect of crop rotations with triticale (× Triticosecale Wittm.) on soil pore characteristics. *Geoderma* **202-203**, 1-7.
- GRAFF, O., 1970: Der Einfluß verschiedener Mulchmaterialien auf den Nährelementgehalt von Regenwurmröhren im Unterboden. *Pedobiologia* **10** (4), 305-319.
- GROSSMAN-CLARKE, S., B. A. KIMBALL, D. J. HUNSAKER, S. P. LONG, R. L. GARCIA, T. KARTSCHALL, G. W. WALL, P. J. PRINTER, JR., F. WECHSUNG & R. L. LAMORTE, 1999: Effects of elevated atmospheric CO₂ on canopy transpiration in senescent spring wheat. *Agricultural and Forest Meteorology* **93** (2), 95-109.
- HAAK, E., 1981: Nutrient Uptake from Subsoil by Cereals. In: *International Potash Institute (Hrsg.): Agricultural yield potentials in continental climates: proceedings of the 16th colloquium of the International Potash Institute held in Warsaw/Poland, 1981*, 87-94.
- HABERLE, J., P. SVOBODA & J. KREJCOVA, 2006: Uptake of mineral nitrogen from subsoil by winter wheat. *Plant Soil and Environment* **52** (8), 377.

- HAFNER, S. & Y. KUZYAKOV, 2016: Carbon input and partitioning in subsoil by chicory and alfalfa. *Plant Soil* **406** (1), 29-42.
- HALLAMA, M., C. PEKRUN, H. LAMBERS & E. KANDELER, 2018: Hidden miners – the roles of cover crops and soil microorganisms in phosphorus cycling through agroecosystems. *Plant and Soil*, 1-39.
- HAMAMO, H., S. LANDSBERGER, G. HARBOTTLE & S. PANNO, 1995: Studies of radioactivity and heavy metals in phosphate fertilizer. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* **194** (2), 331-336.
- HAN, E., T. KAUTZ, N. HUANG & U. KÖPKE, 2017: Dynamics of plant nutrient uptake as affected by biopore-associated root growth in arable subsoil. *Plant Soil* **415** (1), 145-160.
- 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. *Biol. Fertil. Soils* **51** (7), 847-856.
- HANEKLAUS, S., I. HAGEL, H. M. PAULSEN & E. SCHNUG, 2002: Objectives of plant nutrition research in organic farming. *Landbauforschung Völkenrode* **52** (2), 61-68.
- HARTGE, K. H. & R. HORN, 2009: Die physikalische Untersuchung von Böden [Praxis, Messmethoden, Auswertung]. Schweizerbart, Stuttgart, 4. Aufl.
- HATCH, D. J., G. GOODLASS, A. JOYNES & M. A. SHEPHERD, 2007: The effect of cutting, mulching and applications of farmyard manure on nitrogen fixation in a red clover/grass sward. *Bioresource Technology* **98** (17), 3243-3248.
- HENDERSON, C. W.L., 1989: Lupin as a biological plough – evidence for, and effects on wheat growth and yield. *Aust. J. Exp. Agr.* **29** (1), 99-102.
- HENSEN, V., 1892: Die Wurzeln in den tieferen Bodenschichten. *Jb. Dtsch. Landw.-Ges.* **7**, 84-96.
- HOANG, D. T. T., J. PAUSCH, B. S. RAZAVI, I. KUZYAKOVA, C. C. BANFIELD & Y. KUZYAKOV, 2016: Hotspots of microbial activity induced by earthworm burrows, old root channels, and their combination in subsoil. *Biol. Fertil. Soils* **52** (8), 1105-1119.
- HOYT, P. B. & A. M. F. HENNIG, 1971: Effect of Alfalfa and Grasses on Yield of Subsequent Wheat Crops and some Chemical Properties of a Gray Wooded Soil. *Can. J. Soil. Sci* **51** (2), 177-183.
- 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.
- JONES, D. L., A. HODGE & Y. KUZYAKOV, 2004: Plant and mycorrhizal regulation of rhizodeposition. *New Phytol* **163** (3), 459-480.
- JOSCHKO, M., H. DIESTEL & O. LARINK, 1989: Assessment of earthworm burrowing efficiency in compacted soil with a combination of morphological and soil physical measurements. *Biol Fert Soils* **8** (3), 191-196.
- JUNGK, A., 1993: Die Pflanzenverfügbarkeit der Nährstoffe im Boden: chemische und räumliche Aspekte. In: *Berichte über Landwirtschaft 207. Sonderheft. Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit. Band 5: Nährstoffhaushalt*, 71-84.
- KAHNT, G. & U. KÖPKE, 1997: Ökologischer Landbau: Fruchtfolge. In: KELLER, E. R., H. HANUS & K.-U. HEYLAND (Hrsg.): *Handbuch des Pflanzenbaues 1*. 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. SCHLOTER, H. SCHNEIDER, J. VANDERBORGH, 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** (0), 1003-1022.
- KAUTZ, T., M. ATHMANN & U. KÖPKE, 2014a: Growth of barley (*Hordeum vulgare* L.) roots in biopores with differing carbon and nitrogen contents. In: Building Organic Bridges. Proceedings of the 4th ISOFAR Scientific Conference at the Organic World Congress 2014, 13 - 15 October 2014 in Istanbul, Turkey, 391-394. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig.
- KAUTZ, T., D. LANDGRAF & U. KÖPKE, 2011: Biomass and abundance of the anecic earthworm *Lumbricus terrestris* L. under perennial fodder crops. In: Proceedings of the 3rd Scientific Conference of ISOFAR, 86-89.
- KAUTZ, T., M. LÜSEBRINK, S. PÄTZOLD, D. VETTERLEIN, R. PUDE, M. ATHMANN, P. M. KÜPPER, U. PERKONS & U. KÖPKE, 2014b: 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.
- KELNER, D. J., J.K. VESSEY & M. H. ENTZ, 1997: The nitrogen dynamics of 1-, 2- and 3-year stands of alfalfa in a cropping system. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **64** (1), 1-10.
- KHAN, M. N., M. MOBIN, Z. K. ABBAS & S. A. ALAMRI, 2018: Fertilizers and Their Contaminants in Soils, Surface and Groundwater. In: D. A. DELLASALA, and M. I. GOLDSTEIN (eds.) *The Encyclopedia of the Anthropocene* **5**, 225-240. Oxford.
- KIRKEGAARD, J. A., J. M. LILLEY, G. N. HOWE & J. M. GRAHAM, 2007: Impact of subsoil water use on wheat yield. *Aust. J. Agric. Res* **58** (4), 303-315.
- KÖPKE, U., M. ATHMANN, E. HAN & T. KAUTZ, 2015: Optimising Cropping Techniques for Nutrient and Environmental Management in Organic Agriculture. *Sustainable Agriculture Research* **4** (3), 15.
- KÖPKE, U., 1987: Symbiotische Stickstoff-Fixierung und Vorfruchtwirkung von Ackerbohnen (*Vicia faba* L.). Habilitationsschrift, Göttingen.
- KÖPKE, U., 1993: Nährstoffmanagement durch acker- und pflanzenbauliche Maßnahmen. In: Berichte über Landwirtschaft 207. Sonderheft. Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit. Band 5: Nährstoffhaushalt, 181-203.
- KÖPKE, U., 1994: Nährstoffkreislauf und Nährstoffmanagement unter dem Aspekt des Betriebsorganismus. Mayer J., O. Faul, M. Ries, A. Gerber u. A. Kärcher (Hrsg.): SÖL-Sonderausgabe 58. Ökologischer Landbau – Perspektive für die Zukunft.
- KÖPKE, U. & W. WERNER, 1993: Resümee und Ausblick. In: Berichte über Landwirtschaft 207. Sonderheft. Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit. Band 5: Nährstoffhaushalt, 213-215.
- KOTZ, L., G. KAISER, P. TSCHÖPEL & G. TÖLG, 1972: Aufschluß biologischer Matrices für die Bestimmung sehr niedriger Spurenelementgehalte bei begrenzter Einwaage mit Salpetersäure unter Druck in einem Teflongefäß. *Z. Anal. Chem.* **260** (3), 207-209.
- KRISTENSEN, L., J. OLSEN & J. WEINER, 2008: Crop Density, Sowing Pattern, and Nitrogen Fertilization Effects on Weed Suppression and Yield In Spring Wheat. *Weed Science* **56** (1), 97-102.

- KUCHENBUCH, R. & A. JUNGK, 1982: A method for determining concentration profiles at the soil-root interface by thin slicing rhizospheric soil. *Plant Soil* **68** (3), 391-394.
- KUHLMANN, H., 1990: Importance of the subsoil for the K nutrition of crops. *Plant Soil* **127** (1), 129-136.
- KUHLMANN, H., P. B. BARRACLOUGH & A. H. WEIR, 1989: Utilization of mineral nitrogen in the subsoil by winter wheat. *Z. Pflanzenernaehr. Bodenk.* **152** (3), 291-295.
- KUHLMANN, H. & G. BAUMGÄRTEL, 1991: Potential importance of the subsoil for the P and Mg nutrition of wheat. *Plant Soil* **137** (2), 259-266.
- KULIG, B., A. LEPIARCZYK, A. OLEKSY & M. KOŁODZIEJCZYK, 2010: The effect of tillage system and forecrop on the yield and values of LAI and SPAD indices of spring wheat. *European Journal of Agronomy* **33** (1), 43-51.
- KUNTZ, M., A. BERNER, A. GATTINGER, J. M. SCHOLBERG, P. MÄDER & L. PFIFFNER, 2013: Influence of reduced tillage on earthworm and microbial communities under organic arable farming. *Pedobiologia* **56** (4-6), 251-260.
- KÜPPER, P. M., U. PERKONS, C. PRIES, P. M. ANTAR, T. KAUTZ & U. KÖPKE, 2014: Rates of photosynthesis and transpiration of spring wheat and barley as influenced by fodder precrops and their cropping period. In: *Building Organic Bridges. Proceedings of the 4th ISOFAR Scientific Conference at the Organic World Congress 2014, 13 - 15 October 2014 in Istanbul, Turkey*, 547-550. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig.
- KUTSCHERA, L. & E. LICHTENEGGER, 1982: *Wurzelatlas mitteleuropäischer Grünlandpflanzen*. G. Fischer, Stuttgart, New York.
- KUTSCHERA, L., E. LICHTENEGGER & M. SOBOTIK, 2009: *Wurzelatlas der Kulturpflanzen gemäßiger Gebiete mit Arten des Feldgemüsebaues*. DLG-Verl., Frankfurt am Main.
- LAMPURLANÉS, J., P. ANGÁS & C. CANTERO-MARTÍNEZ, 2001: Root growth, soil water content and yield of barley under different tillage systems on two soils in semiarid conditions. *Field Crops Research* **69** (1), 27-40.
- LANGENSIEPEN, M., M. KUPISCH, M. T. VAN WIJK & F. EWERT, 2012: Analyzing transient closed chamber effects on canopy gas exchange for optimizing flux calculation timing. *Agricultural and Forest Meteorology* **164** (0), 61-70.
- LEE, K. E. & R. C. FOSTER, 1991: Soil fauna and soil structure. *Soil Res* **29** (6), 745-775.
- LESTURGEZ, G., R. POSS, C. HARTMANN, E. BOURDON, A. NOBLE & S. RATANA-ANUPAP, 2004: Roots of *Stylosanthes hamata* create macropores in the compact layer of a sandy soil. *Plant and Soil* **260** (1-2), 101-109.
- LEUE, M., R. H. ELLERBROCK & H. H. GERKE, 2010: DRIFT Mapping of Organic Matter Composition at Intact Soil Aggregate Surfaces. *Vadose Zone Journal* **9**, 317-324.
- LILLEY, J. M. & J. A. KIRKEGAARD, 2007: Seasonal variation in the value of subsoil water to wheat: simulation studies in southern New South Wales. *Aust. J. Agric. Res* **58** (12), 1115-1128.
- LISITSA, A. V., N. A. PETUSHKOVA, H. THIELE, S. A. MOSHKOVSKII, V. G. ZGODA, I. I. KARUZINA, A. L. CHERNOBROVKIN, O. G. SKIPENKO & A. I. ARCHAKOV, 2009: Application of Slicing of One-Dimensional Gels with Subsequent Slice-by-Slice Mass Spectrometry for the Proteomic Profiling of Human Liver Cytochromes P450. *J. Proteome Res* **9** (1), 95-103.
- LØES, A.-K. & A. F. ØGAARD, 1997: Changes in the nutrient content of agricultural soil on conversion to organic farming in relation to farm-level nutrient balances and soil contents of clay and organic matter. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science* **47** (4), 201-214.
- LOGSDON, S. D. & D. R. LINDEN, 1992: Interactions of earthworms with soil physical conditions influencing plant growth. *Soil Sci.* **154** (4), 330-337.

- LOPEZ-BELLIDO, R. J., C. E. SHEPHERD & P. B. BARRACLOUGH, 2004: Predicting post-anthesis N requirements of bread wheat with a Minolta SPAD meter. *European Journal of Agronomy* **20** (3), 313-320.
- LUNT, H. A. & H. G. M. JACOBSON, 1944: The chemical composition of Earthworm Casts. *Soil Science* **58** (5).
- LUXMOORE, R. J., 1981: Micro-, Meso-, and Macroporosity of Soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* (45), 671-672.
- 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.
- MCCORMACK, M. L. & D. GUO, 2014: Impacts of environmental factors on fine root lifespan. *Frontiers in Plant Science* **5**.
- MCKENZIE, B. M., A. G. BENGOUGH, P. D. HALLETT, W.T.B. THOMAS, B. FORSTER & J.W. 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.
- 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.
- MEEK, B. D., E. A. RECHEL, L. M. CARTER & W. R. DETAR, 1989: Changes in Infiltration under Alfalfa as influenced by Time and Wheel Traffic. *Soil Science Society of America journal* (1), 238-241.
- MISRA, R. K., A. R. DEXTER & A. M. ALSTON, 1986: Maximum axial and radial growth pressures of plant roots. *Plant Soil* **95** (3), 315-326.
- 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.
- MOTULSKY, H., 2010: *Intuitive biostatistics. A nonmathematical guide to statistical thinking.* Oxford University Press, New York, 2. Aufl.
- MUDAHAR, M. S. & T. P. HIGNETT, 1985: Energy efficiency in nitrogen fertilizer production. *Energy in Agriculture* **4** (0), 159-177.
- NEVENS, F. & D. REHEUL, 2002: The nitrogen- and non-nitrogen-contribution effect of ploughed grass leys on the following arable forage crops: determination and optimum use. *European Journal of Agronomy* **16** (1), 57-74.
- 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.
- PAGENKEMPER, S. K., M. ATHMANN, D. UTEAU, T. KAUTZ, S. PETH & R. HORN, 2015: The effect of earthworm activity on soil bioporosity – Investigated with X-ray computed tomography and endoscopy. *Soil Structure and its Functions in Ecosystems: Phase matter & Scale matter* **146**, PART A, 79-88.
- PASSIOURA, J. B., 1983: Roots and drought resistance. *Plant production and management under drought conditions* **7** (1–3), 265-280.
- 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.
- PELLETIER, N., N. ARSENAULT & P. TYEDMERS, 2008: Scenario Modeling Potential Eco-Efficiency Gains from a Transition to Organic Agriculture: Life Cycle Perspectives on Canadian Canola, Corn, Soy, and Wheat Production. *Environmental Management* **42** (6), 989-1001.
- PELOSI, C., M. BERTRAND, D. MAKOWSKI & J. ROGER-ESTRADE, 2008: WORMDYN: A model of *Lumbricus terrestris* population dynamics in agricultural fields. *Ecological Modelling* **218** (3-4), 219-234.
- PERKONS, U., T. KAUTZ & U. KÖPKE, 2014a: Root growth response of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) and mallow (*Malva sylvestris* L.) to biopore generating precrops. In: Building Organic Bridges. Proceedings of the 4th ISOFAR Scientific Conference at the Organic World Congress 2014, 13 - 15 October 2014 in Istanbul, Turkey, 477-480. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig.
- PERKONS, U., T. KAUTZ, D. UTEAU, S. PETH, V. GEIER, K. THOMAS, K. LÜTKE HOLZ, M. ATHMANN, R. PUDE & U. KÖPKE, 2014b: Root-length densities of various annual crops following crops with contrasting root systems. *Soil Till. Res.* **137** (0), 50-57.
- PIETSCH, G., J. K. FRIEDEL & B. FREYER, 2007: Lucerne management in an organic farming system under dry site conditions. *Field Crops Research* **102** (2), 104-118.
- PURY, D. G. G. de & G. D. FARQUHAR, 1997: Simple scaling of photosynthesis from leaves to canopies without the errors of big-leaf models. *Plant, Cell & Environment* **20** (5), 537-557.
- RADIN, J. W., 1983: Control of plant growth by nitrogen: differences between cereals and broadleaf species. *Plant, Cell & Environment* **6** (1), 65-68.
- RASMUSSEN, I. S., D. B. DRESBØLL & K. THORUP-KRISTENSEN, 2015: Winter wheat cultivars and nitrogen (N) fertilization - Effects on root growth, N uptake efficiency and N use efficiency. *European Journal of Agronomy* **68**, 38-49.
- RASSE, D. P. & A. J.M. SMUCKER, 1998: Root recolonization of previous root channels in corn and alfalfa rotations. *Plant Soil* **204** (2), 203-212.
- RATHKE, G.-W., T. BEHRENS & W. DIEPENBROCK, 2006: Integrated nitrogen management strategies to improve seed yield, oil content and nitrogen efficiency of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **117** (2-3), 80-108.
- RICHTER, D., M. KERSCHBERGER & G. MARKS, 1977: Einfluß der Nährstoffgehalte des Unterbodens (21...40cm) auf die Versorgung der Pflanzen mit Phosphor und Kalium. *Archives of Agronomy and Soil Science* **21** (3), 239-247.
- RILEY, H., R. POMMERESCHE, R. ELTUN, S. HANSEN & A. KORSÆTH, 2008: Soil structure, organic matter and earthworm activity in a comparison of cropping systems with contrasting tillage, rotations, fertilizer levels and manure use. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **124** (3-4), 275-284.
- RÖMPP, H., J. FALBE & M. REGITZ, 1997: *Römpp Lexikon Chemie*, 10. Aufl.
- ROOD, S. B. & D. J. MAJOR, 1984: Influence of plant density, nitrogen, water supply and pod or leaf removal on growth of oilseed rape. *Field Crops Research* **8** (0), 323-331.
- ROTH, C. H. & M. JOSCHKO, 1991: A note on the reduction of runoff from crusted soils by earthworm burrows and artificial channels. *Z. Pflanzenernaehr. Bodenk.* **154** (2), 101-105.
- RUSCH, H. P., 1968: *Bodenfruchtbarkeit: eine Studie biologischen Denkens*. Haug.

- SALVAGIOTTI, F. & D. J. MIRALLES, 2008: Radiation interception, biomass production and grain yield as affected by the interaction of nitrogen and sulfur fertilization in wheat. *European Journal of Agronomy* **28** (3), 282-290.
- SCHEFFER, F. & P. SCHACHTSCHABEL, 1984: Lehrbuch der Bodenkunde. Enke, Stuttgart, 11. Aufl.
- SCOTT, R. K., E. A. OGUNREMI, J. D. IVINS & N. J. MENDHAM, 1973: The effect of fertilizers and harvest date on growth and yield of oilseed rape sown in autumn and spring. *The Journal of Agricultural Science* **81** (02), 287-293.
- SHAFI, M., J. BAKHT, F. JALAL, M. A. KHAN & S. G. KHATTAK, 2011: Effect of nitrogen application on yield and yield components of barley (*Hordeum vulgare* L.). *Pak. J. Bot* **43** (3), 1471-1475.
- SHEARER, G. & D. H. KOHL, 1986: N₂-Fixation in Field Settings: Estimations Based on Natural ¹⁵N Abundance. *Functional Plant Biol* **13** (6), 699-756.
- 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. & W. M. EDWARDS, 1996: Effects of Initial Water Content on Macropore/Matrix Flow and Transport of Surface-Applied Chemicals. *Journal of Environmental Quality*, **25** (4), 662-670.
- SHIPITALO, M. J., W. M. EDWARDS, L. B. OWENS & W. A. DICK, 1990: Initial Storm Effects on Macropore Transport of Surface-Applied Chemicals in No-Till Soil. *Soil Science Society of America Journal*, **54** (6), 1530-1536.
- SHIPITALO, M. J., R. PROTZ & A. D. TOMLIN, 1988: Effect of diet on the feeding and casting activity of *Lumbricus terrestris* and *L. rubellus* in laboratory culture. *Soil Biology and Biochemistry* **20** (2), 233-237.
- SMETTEM, K. R. J., 1986: Analysis of Water Flow from Cylindrical Macropores. *Soil Science Society of America Journal*, **50** (5), 1139-1142.
- SPRINGETT, J. & R. GRAY, 1997: The interaction between plant roots and earthworm burrows in pasture. 5th International Symposium on Earthworm Ecology **29** (3-4), 621-625.
- 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.
- STYPA, M., A. NUNEZ-BARRIOS, D. A. BARRRY, M. H. MILLER & W. A. MITCHELL, 1987: Effects of Subsoil Bulk Density, Nutrient Availability and Soil Moisture on Corn Root Growth in the Field. *Can. J. Soil. Sci* **67** (2), 293-308.
- 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.
- 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.
- VAN HERWAARDEN, A. F., G. D. FARQUHAR, J. F. ANGUS, R. A. RICHARDS & G. N. HOWE, 1998: 'Haying-off', the negative grain yield response of dryland wheat to nitrogen fertiliser. I. Biomass, grain yield, and water use. *Aust. J. Agric. Res* **49** (7), 1067-1082.
- VAN SCHAİK, L., J. PALM, J. KLAUS, E. ZEHE & B. SCHRÖDER, 2014: Linking spatial earthworm distribution to macropore numbers and hydrological effectiveness. *Ecohydrol.* **7** (2), 401-408.
- VDLUFA VERBAND DEUTSCHER LANDWIRTSCHAFTLICHER UNTERSUCHUNGS- UND FORSCHUNGSANSTALTEN, 1991: Methodenbuch Band 1: Die Untersuchung von Böden.

- VERCAMMEN, Y., R. de MONDT, J. VAN LUPPEN, F. VANGAEVER & L. VAN VAECK, 2010: Ultra-low-angle microtomy and static secondary ion mass spectrometry for molecular depth profiling of UV-curable acrylate multilayers at the nanoscale. *Anal Bioanal Chem* **396** (8), 2943-2954.
- VETTERLEIN, D., T. KÜHN, K. KAISER & R. JAHN, 2013: Illite transformation and potassium release upon changes in composition of the rhizosphere soil solution. *Plant Soil* **371** (1-2), 267-279.
- VOLKMAR, K. M., 1996: Effects of biopores on the growth and N-uptake of wheat at three levels of soil moisture. *Can. J. Soil Sci.* **76** (4), 453-458.
- WANG, J., J. D. HESKETH & J. T. WOOLLEY, 1986: Preexisting channels and soybean rooting patterns. *Soil Sci.* **141** (6), 432-437.
- WILLIAMS, S. M. & R. R. WEIL, 2004: Crop Cover Root Channels May Alleviate Soil Compaction Effects on Soybean Crop. *Soil Science Society of America Journal*, **68** (4), 1403-1409.
- WITTER, E. & G. JOHANSSON, 2001: Potassium Uptake from the Subsoil by Green Manure Crops. *Biological Agriculture & Horticulture* **19** (2), 127-141.
- YUNUSA, I. A.M., 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.

Anhang

Anhangverzeichnis

Anhang-Abb. 1: Versuchsplan des <i>CeFIT</i> , Versuch A (angelegt 2007) und Versuch B (angelegt 2009).	147
Anhang-Tab. 1: Variantenübersicht des <i>CeFIT</i> , Versuch A und Versuch B.	145
Anhang-Tab. 2: BBCH-Stadien, zu denen im Versuch A von 2010 bis 2012 Zeiternten in den Nachfruchtbeständen vorgenommen wurden, sowie untersuchte Varianten in Abhängigkeit von den erfassten Parametern.	154
Anhang-Tab. 3: BBCH-Stadien, zu denen im Versuch A von 2010 bis 2012 Gaswechselfmessungen in den Nachfruchtbeständen vorgenommen wurden, sowie die untersuchten Varianten.	155
Anhang-Tab. 4: Sprosstrockenmasse von Sommerweizen in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht.	156
Anhang-Tab. 5: Blattflächenindex von Sommerweizen nach Luzerne und Wegwarte in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht.	156
Anhang-Tab. 6: Sprosslänge von Sommerweizen in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht.	156
Anhang-Tab. 7: Blattphotosyntheserate von Sommerweizen bezogen auf 1 m ² Blattfläche nach einjährig kultivierter Vorfrucht in Abhängigkeit von der Vorfruchtart.	157
Anhang-Tab. 8: Bestandes-Blattphotosyntheserate von Sommerweizen bezogen auf 1 m ² Bodenfläche nach einjährig kultivierter Vorfrucht in Abhängigkeit von der Vorfruchtart.	157
Anhang-Tab. 9: Blatttranspirationsrate von Sommerweizen bezogen auf 1 m ² Blattfläche nach einjährig kultivierter Vorfrucht in Abhängigkeit von der Vorfruchtart.	157
Anhang-Tab. 10: Bestandes-Blatttranspirationsrate von Sommerweizen bezogen auf 1 m ² Bodenfläche nach einjährig kultivierter Vorfrucht in Abhängigkeit von der Vorfruchtart.	158
Anhang-Tab. 11: Nährstoffgehalte in der Sprosstrockenmasse von Sommerweizen zu den fünf Zeiternteterminen und im Erntegut in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht.	158
Anhang-Tab. 12: N _{min} -Menge im Boden unter Sommerweizen in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der Vorfruchtvariante.	159
Anhang-Tab. 13: Sprosstrockenmasse von Futtermalve in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht.	160
Anhang-Tab. 14: Blattflächenindex von Futtermalve nach Luzerne und Wegwarte in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht.	160

Anhang-Tab. 15: Sprosslänge von Futtermalve in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht.	160
Anhang-Tab. 16: Bestandes-Blattphotosyntheserate von Futtermalve bezogen auf 1 m ² Bodenfläche nach Luzerne und Wegwarte in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht.	161
Anhang-Tab. 17: Blatttranspirationsrate von Futtermalve bezogen auf 1 m ² Blattfläche nach Luzerne und Wegwarte in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht.	161
Anhang-Tab. 18: Bestandes-Blatttranspirationsrate von Futtermalve bezogen auf 1 m ² Bodenfläche nach Luzerne und Wegwarte in Abhängigkeit von der Vorfruchtart.	161
Anhang-Tab. 19: Nährstoffgehalte in der Sprosstrockenmasse von Futtermalve zu den drei Zeiternteterminen in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht.	162
Anhang-Tab. 20: Sprosstrockenmasse von Wintergerste in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht.	162
Anhang-Tab. 21: Blattflächenindex von Wintergerste in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht.	163
Anhang-Tab. 22: Sprosslänge von Wintergerste in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht.	163
Anhang-Tab. 23: SPAD-Value von Wintergerste in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht.	163
Anhang-Tab. 24: Photosyntheserate von Wintergerste bezogen auf 1 m ² Blattfläche in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht.	164
Anhang-Tab. 25: Bestandes-Blattphotosyntheserate von Wintergerste bezogen auf 1 m ² Bodenfläche in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht. ..	164
Anhang-Tab. 26: Blatttranspirationsrate von Wintergerste bezogen auf 1 m ² Blattfläche in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht.	164
Anhang-Tab. 27: Bestandes-Blatttranspirationsrate von Wintergerste bezogen auf 1 m ² Bodenfläche in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht.	165
Anhang-Tab. 28: Nährstoffgehalte in der Sprosstrockenmasse von Wintergerste zu den fünf Zeiternteterminen und im Erntegut in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht.	166
Anhang-Tab. 29: N _{min} -Menge im Boden unter Wintergerste in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der Vorfruchtvariante.	167
Anhang-Tab. 30: Blattphotosyntheserate von Winterraps bezogen auf 1 m ² Blattfläche in Abhängigkeit von der Vorfruchtart.	168

Anhang-Tab. 31: Blatttranspirationsrate von Winterraps bezogen auf 1 m ² Blattfläche in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht.	168
Anhang-Tab. 32: Nährstoffgehalte in der Korntrockenmasse von Winterraps 2011 in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht.	168
Anhang-Tab. 33: Nährstoffgehalte in der Korn- und Strohtrockenmasse von Winterroggen 2012 in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht.	169
Anhang-Tab. 34: Sprosstrockenmasse von Winterraps in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht.	169
Anhang-Tab. 35: Blattflächenindex von Winterraps in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht.	169
Anhang-Tab. 36: Sprosslänge von Winterraps in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht.	170
Anhang-Tab. 37: <i>SPAD-Value</i> von Winterraps in Abhängigkeit von der Vorfruchtart.	170
Anhang-Tab. 38: Blattphotosyntheserate von Winterraps bezogen auf 1 m ² Blattfläche in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht.	171
Anhang-Tab. 39: Bestandes-Blattphotosyntheserate von Winterraps bezogen auf 1 m ² Bodenfläche in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht.	171
Anhang-Tab. 40: Bestandes-Blattphotosyntheserate von Winterraps bezogen auf 1 m ² Bodenfläche nach optimierter Schätzung in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht.	171
Anhang-Tab. 41: Blatttranspirationsrate von Winterraps bezogen auf 1 m ² Blattfläche in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht.	172
Anhang-Tab. 42: Bestandes-Blatttranspirationsrate von Winterraps bezogen auf 1 m ² Bodenfläche in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht.	172
Anhang-Tab. 43: Bestandes-Blatttranspirationsrate von Winterraps bezogen auf 1 m ² Bodenfläche nach optimierter Schätzung in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht.	172
Anhang-Tab. 44: Nährstoffgehalte in der Sprosstrockenmasse von Winterraps 2012 zu den fünf Zeiternteterminen und im Erntegut in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht i.	173
Anhang-Tab. 45: N _{min} -Menge im Boden unter Winterraps in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der Vorfruchtvariante.	174

Versuchsplan und Variantenübersicht

97 (9)	98 (18)	99 (27)	100 (14)	101 (23)	102 (5)	103 (21)	104 (3)	105 (12)	106 (8)	107 (26)	108 (17)
85 (8)	86 (17)	87 (26)	88 (15)	89 (24)	90 (6)	91 (23)	92 (5)	93 (14)	94 (3)	95 (21)	96 (12)
73 (7)	74 (16)	75 (25)	76 (13)	77 (22)	78 (4)	79 (24)	80 (6)	81 (15)	82 (1)	83 (19)	84 (10)
61 (6)	62 (15)	63 (24)	64 (18)	65 (27)	66 (9)	67 (19)	68 (1)	69 (10)	70 (5)	71 (23)	72 (14)
49 (5)	50 (14)	51 (23)	52 (10)	53 (19)	54 (1)	55 (25)	56 (7)	57 (16)	58 (2)	59 (20)	60 (11)
37 (4)	38 (13)	39 (22)	40 (16)	41 (25)	42 (7)	43 (20)	44 (2)	45 (11)	46 (6)	47 (24)	48 (15)
25 (3)	26 (12)	27 (21)	28 (11)	29 (20)	30 (2)	31 (22)	32 (4)	33 (13)	34 (9)	35 (27)	36 (18)
13 (2)	14 (11)	15 (20)	16 (17)	17 (26)	18 (8)	19 (27)	20 (9)	21 (18)	22 (7)	23 (25)	24 (16)
1 (1)	2 (10)	3 (19)	4 (12)	5 (21)	6 (3)	7 (26)	8 (8)	9 (17)	10 (4)	11 (22)	12 (13)
Block 1			Block 2			Block 3			Block 4		

Anhang-Abb. 1: Versuchsplan des *CeFIT*, Versuch A (angelegt 2007) und Versuch B (angelegt 2009). Die erste Zahl in jeder Parzelle gibt die Parzellennummer, die zweite (in Klammern gesetzte) Zahl die Variantennummer an. Parzellengröße: 6 m · 10 m. Die grau hinterlegten Bereiche kennzeichnen Wege (3 m bzw. 9 m breit) bzw. Ränder.

Anhang-Tab. 1: Variantenübersicht des CeFIT, Versuch A und Versuch B. Dunkelgrau hinterlegt sind die Jahre der Vorfrucht, hellgrau hinterlegt sind die allorhizen Nachfrüchte. Die erste Angabe des Versuchsjahrs bezieht sich auf Versuch A, die zweite auf Versuch B.

Variante	Vorfrucht-Variante	Versuchsjahr					
		1. (2007/09)	2. (2008/10)	3. (2009/11)	4. (2010/12)	5. (2011/13)	6. (2012/14)
1	Lu 1	Sommerroggen	Hafer	Luzerne	Futtermalve	Wintergerste	Winterroggen
2	Lu 1	Sommerroggen	Hafer	Luzerne	Sommerweizen	Winterraps	Winterroggen
3	Lu 1	Sommerroggen	Hafer	Luzerne	Sommerweizen	Wintergerste	Winterraps
4	Lu 2	Sommerroggen	Luzerne	Luzerne	Futtermalve	Wintergerste	Winterroggen
5	Lu 2	Sommerroggen	Luzerne	Luzerne	Sommerweizen	Winterraps	Winterroggen
6	Lu 2	Sommerroggen	Luzerne	Luzerne	Sommerweizen	Wintergerste	Winterraps
7	Lu 3	Luzerne	Luzerne	Luzerne	Futtermalve	Wintergerste	Winterroggen
8	Lu 3	Luzerne	Luzerne	Luzerne	Sommerweizen	Winterraps	Winterroggen
9	Lu 3	Luzerne	Luzerne	Luzerne	Sommerweizen	Wintergerste	Winterraps
10	Ww 1	Sommerroggen	Hafer	Wegwarte	Futtermalve	Wintergerste	Winterroggen
11	Ww 1	Sommerroggen	Hafer	Wegwarte	Sommerweizen	Winterraps	Winterroggen
12	Ww 1	Sommerroggen	Hafer	Wegwarte	Sommerweizen	Wintergerste	Winterraps
13	Ww 2	Sommerroggen	Wegwarte	Wegwarte	Futtermalve	Wintergerste	Winterroggen
14	Ww 2	Sommerroggen	Wegwarte	Wegwarte	Sommerweizen	Winterraps	Winterroggen
15	Ww 2	Sommerroggen	Wegwarte	Wegwarte	Sommerweizen	Wintergerste	Winterraps
16	Ww 3	Wegwarte	Wegwarte	Wegwarte	Futtermalve	Wintergerste	Winterroggen
17	Ww 3	Wegwarte	Wegwarte	Wegwarte	Sommerweizen	Winterraps	Winterroggen
18	Ww 3	Wegwarte	Wegwarte	Wegwarte	Sommerweizen	Wintergerste	Winterraps
19	Rs 1	Sommerroggen	Hafer	Rohrschwinger	Futtermalve	Wintergerste	Winterroggen
20	Rs 1	Sommerroggen	Hafer	Rohrschwinger	Sommerweizen	Winterraps	Winterroggen
21	Rs 1	Sommerroggen	Hafer	Rohrschwinger	Sommerweizen	Wintergerste	Winterraps
22	Rs 2	Sommerroggen	Rohrschwinger	Rohrschwinger	Futtermalve	Wintergerste	Winterroggen
23	Rs 2	Sommerroggen	Rohrschwinger	Rohrschwinger	Sommerweizen	Winterraps	Winterroggen
24	Rs 2	Sommerroggen	Rohrschwinger	Rohrschwinger	Sommerweizen	Wintergerste	Winterraps
25	Rs 3	Rohrschwinger	Rohrschwinger	Rohrschwinger	Futtermalve	Wintergerste	Winterroggen
26	Rs 3	Rohrschwinger	Rohrschwinger	Rohrschwinger	Sommerweizen	Winterraps	Winterroggen
27	Rs 3	Rohrschwinger	Rohrschwinger	Rohrschwinger	Sommerweizen	Wintergerste	Winterraps

Statistische Modelle

Zweifaktorielle Streifenanlage

```
data s96;
set sasuser.PKSW10;

Proc Mixed DATA=sasuser.PKSW10;
  CLASS VF Dauer Block;
  MODEL TKM=VF Dauer VF*Dauer /DDFM=kr (firstorder);
  RANDOM Block VF*Block Dauer*Block;
  LSMEANS VF Dauer VF*Dauer /ADJUST=TUKEY CL;
Run;
*Berechnung der Residuen;
ODS Output Influence=Resid_TKM;
Proc Mixed DATA=sasuser.PKSW10 NOBOUND;
  CLASS Var Block;
  MODEL TKM=Var Block/ INFLUENCE;
Run;
*Prüfung der Residuen auf Normalverteilung;
Proc Univariate DATA=Resid_TKM PLOT NORMAL;
  VAR Residual;
Run;
```

Dreifaktorielle Auswertung von Relativerträgen

```

/* Makrovariablen vereinbaren */
%let pfad=C:\SAS;
%let exceldatei=CeFit_2faktoriell_3Jahre;
/* Exceldatei importieren */
proc import datafile="&pfad\&exceldatei" out=Daten dbms=excel replace;
sheet="Alles";
run;
/*****
*****/
/* Parzellenmittelwerte berechnen aus den beiden Wiederholungen A und B
*/
proc sort data=Daten;
    by Jahr Variante VF Dauer Kultur Block Parzelle;
run;
proc means data=Daten noprint;
    var KornTM KornTMrel;
    by Jahr Variante VF Dauer Kultur Block Parzelle;
    output out=Plotdaten Mean=KornTM KornTMrel;
run;
data Plotdaten;
    set Plotdaten;
    drop _type_ _freq_;
run;
/*****
*****/

/* Makro für Buchstabenausgabe von Prof. Hans-Peter Piepho (Uni
Hohenheim) einlesen */
%INCLUDE "&pfad\Mult.sas";

options nocenter nodate ls=250 ps=500;
/*****
*****/
* Vergleich der Ertraege von [1] Raps und Gerste 2011 oder [2] Raps und
Roggen 2012: 3-faktorielle 2-stufige Streifenanlage;
* (1) zunächst ohne Buchstabenausgabe;
%let merkmal=KornTMrel;      /* KornTM, KornTMrel */
%let datei=Plotdaten;
Proc Mixed DATA=&datei nobound;
    where Jahr=2011; /* Raps und Gerste 2011 */
    *where Jahr=2012; /* Raps und Roggen 2012 */
    CLASS VF Dauer Block Kultur;
    MODEL &merkmal = VF | Dauer | Kultur / DDFM=kr(firstorder);
    RANDOM Block VF*Block Dauer*Block;
    LSMEANS VF Dauer Kultur VF*Dauer VF*Kultur Dauer*Kultur
VF*Dauer*Kultur/ ADJUST=TUKEY CL;
Run;

* (2a) Buchstabenausgabe, wenn keine Wechselwirkungen vorliegen und VF
signifikant;
ods output LSMeans=lsmeans Diffs=diffs;
Proc Mixed DATA=&datei nobound;
    where Jahr=2011; /* Raps und Gerste 2011 */
    *where Jahr=2012; /* Raps und Roggen 2012 */

```

```
CLASS VF Dauer Block Kultur;
MODEL &merkmal = VF | Dauer | Kultur / DDFM=kr(firstorder);
RANDOM Block VF*Block Dauer*Block;
LSMEANS VF / ADJUST=TUKEY CL;
%MULT (trt=VF, alpha=0.05, p=adjp, descending=0); /* t-Test; für
Tukey-Test p=adjp */
Run;
* (2b) Buchstabenausgabe, wenn keine Wechselwirkungen vorliegen und
Dauer signifikant;
ods output LSMeans=lsmeans Diffs=diffs;
Proc Mixed DATA=&datei nobound;
  where Jahr=2011; /* Raps und Gerste 2011 */
  *where Jahr=2012; /* Raps und Roggen 2012 */
CLASS VF Dauer Block Kultur;
MODEL &merkmal = VF | Dauer | Kultur / DDFM=kr(firstorder);
RANDOM Block VF*Block Dauer*Block;
LSMEANS Dauer / ADJUST=TUKEY CL;
%MULT (trt=Dauer, alpha=0.05, p=adjp, descending=0); /* t-Test;
für Tukey-Test p=adjp */
Run;
* (2c) Buchstabenausgabe, wenn keine Wechselwirkungen vorliegen und
Kultur signifikant;
ods output LSMeans=lsmeans Diffs=diffs;
Proc Mixed DATA=&datei nobound;
  where Jahr=2011; /* Raps und Gerste 2011 */
  *where Jahr=2012; /* Raps und Roggen 2012 */
CLASS VF Dauer Block Kultur;
MODEL &merkmal = VF | Dauer | Kultur / DDFM=kr(firstorder);
RANDOM Block VF*Block Dauer*Block;
LSMEANS Kultur / ADJUST=TUKEY CL;
%MULT (trt=Kultur, alpha=0.05, p=probt, descending=0); /* t-Test;
für Tukey-Test p=adjp */
Run;

* (3) Buchstabenausgabe, wenn irgendwelche Interaktionen signifikant
(VF*Dauer, VF*Kultur, Dauer*Kultur, VF*Dauer*Kultur);
ods output LSMeans=lsmeans Diffs=diffs;
Proc Mixed DATA=&datei nobound;
  where Jahr=2011; /* Raps und Gerste 2011 */
  *where Jahr=2012; /* Raps und Roggen 2012 */
CLASS VF Dauer Block Kultur;
MODEL &merkmal = VF | Dauer | Kultur / DDFM=kr(firstorder);
RANDOM Block VF*Block Dauer*Block;
LSMEANS VF*Dauer*Kultur / ADJUST=TUKEY CL;
%MULT (trt=VF, by=Dauer, by2=Kultur, alpha=0.05, p=adjp,
descending=0); /* t-Test; für Tukey-Test p=adjp */
%MULT (trt=Dauer, by=VF, by2=Kultur, alpha=0.05, p=adjp,
descending=0); /* t-Test; für Tukey-Test p=adjp */
%MULT (trt=Kultur, by=VF, by2=Dauer, alpha=0.05, p=probt,
descending=0); /* t-Test; für Tukey-Test p=adjp */
Run;
```

Bestandesführung der Vor- und Nachfrüchte (Versuch A)

Dreijährig kultivierte Futterpflanzen (Saat: 2007)

Saatbettbereitung	10.04.2007	Kreiselegge
Saat	12.04.2007	Luzerne 25 kg ha ⁻¹ , Sorte <i>Planet</i> , Wegwarte 5 kg ha ⁻¹ , Sorte <i>Puna</i> , Rohrschwengel 30 kg ha ⁻¹ , Sorte <i>Hykor</i>
Kulturführung	24.-25.05.2007	Manuelle Unkrautregulierung
	14.06.2007	1. Mulchschnitt 2007
	10.07.2007	2. Mulchschnitt 2007
	30.08.2007	3. Mulchschnitt 2007
	22.11.2007	4. Mulchschnitt 2007
	14.05.2008	1. Mulchschnitt 2008
	19.06.2008	2. Mulchschnitt 2008
	28.07.2008	3. Mulchschnitt 2008
	29.07.2008	Manuelle Unkrautregulierung
	03.09.2008	4. Mulchschnitt 2008
	20.05.2009	1. Mulchschnitt 2009
	30.06.2009	2. Mulchschnitt 2009
	16.08.2009	3. Mulchschnitt 2009
	21.09.2009	4. Mulchschnitt Wegwarte und Luzerne 2009
	29.09.2009	4. Mulchschnitt Rohrschwengel 2009
Stoppelbearbeitung	10.03.2010	Grubber
	19.03.2010	Grubber
	23.03.2010	Pflug

Zweijährig kultivierte Futterpflanzen (Saat: 2008)

Saatbettbereitung	06.05.2008	Kreiselegge
Saat	06.-07.05.2008	Luzerne 25 kg ha ⁻¹ , Sorte <i>Planet</i> , Wegwarte 5 kg ha ⁻¹ , Sorte <i>Puna</i> , Rohrschwengel 30 kg ha ⁻¹ , Sorte <i>Hykor</i>
Kulturführung	30.06.2008	1. Mulchschnitt 2008
	29.07.2008	Manuelle Unkrautregulierung
	06.08.2008	2. Mulchschnitt 2008
	29.09.2008	3. Mulchschnitt 2008
	20.05.2009	1. Mulchschnitt 2009
	30.06.2009	2. Mulchschnitt 2009
	16.08.2009	3. Mulchschnitt 2009
	21.09.2009	4. Mulchschnitt Wegwarte und Luzerne 2009
	29.09.2009	4. Mulchschnitt Rohrschwengel 2009
Stoppelbearbeitung	10.03.2010	Grubber
	19.03.2010	Grubber
	23.03.2010	Pflug

Einjährig kultivierte Futterpflanzen (Saat: 2009)

Saatbettbereitung	14.04.2009	Kreiselegge
Saat	15.-16.04.2009	Luzerne 25 kg ha ⁻¹ , Sorte <i>Planet</i> , Wegwarte 5 kg ha ⁻¹ , Sorte <i>Puna</i> , Rohrschwengel 30 kg ha ⁻¹ , Sorte <i>Hykor</i>
Kulturführung	20.04.2009	Stickstoffdüngung mit KAS: 50 kg N ha ⁻¹ (zu Ww 1 und Rs 1)
	30.06.2009	1. Mulchschnitt 2009
	16.08.2009	2. Mulchschnitt 2009
	21.09.2009	3. Mulchschnitt Luzerne und Wegwarte 2009
	29.09.2009	3. Mulchschnitt Rohrschwengel 2009
Stoppelbearbeitung	10.03.2010	Grubber
	19.03.2010	Grubber
	23.03.2010	Pflug

Erste Nachfrucht: Sommerweizen (2010)

Saatbettbereitung	07.04.2010	Kreiselegge
Saat	08.04.2010	Sorte <i>Scirocco</i> , 400 Körner/m ² , 11 cm Reihenabstand
Kulturführung	14.04.2010	Stickstoffdüngung mit KAS <ul style="list-style-type: none"> • Nach Lu 1: 68 kg N ha⁻¹ • Nach Lu 2: 15 kg N ha⁻¹ • Nach Lu 3: 0 kg N ha⁻¹ • Nach Ww 1 – 3 und Rs 1 – 3: 77 kg N ha⁻¹
	21.05.2010	1,5 L ha ⁻¹ Ariane C,
	22.07.2010	Manuelle Unkrautregulierung
	11.08.2010	Manuelle Unkrautregulierung
Ernte	13.08.2010	Parzellenmähdrescher
Stoppelbearbeitung	20.08.2010	Grubber
	25.08.2010	Grubber, Pflug

Erste Nachfrucht: Futtermalve (2010)

Saatbettbereitung	??.??.2010	Kreiselegge
Saat	21.05.2010	Sorte <i>Sylva</i> , 12 kg ha ⁻¹ , 11 cm Reihenabstand
Kulturführung	14.04.2010	Stickstoffdüngung mit KAS <ul style="list-style-type: none"> • Nach Lu 1: 68 kg N ha⁻¹ • Nach Lu 2: 15 kg N ha⁻¹ • Nach Lu 3: 0 kg N ha⁻¹ • Nach Ww 1 – 3 und Rs 1 – 3: 77 kg N ha⁻¹
Ernte	30.07.2010	Balkenmäher
Stoppelbearbeitung	20.08.2010	Grubber
	25.08.2010	Grubber, Pflug

Zweite Nachfrucht: Wintergerste (2011)

Saatbettbereitung	25.08.2010	Kreiselegge
Saat	07.10.2010	Sorte <i>Highlight</i> , 310 Körner/m ² , 11 cm Reihenabstand
Kulturführung	11.03.2011	Stickstoffdüngung mit KAS <ul style="list-style-type: none"> • Nach Lu 1 – 3-FM: 19 kg N ha⁻¹ • Nach Lu 1 – 3-SW: 38 kg N ha⁻¹ • Nach Ww 1 – 3 und Rs 1 – 3: 63 kg N ha⁻¹
	22.03.2011	1,2 L ha ⁻¹ Axial 50
	29.03.2011	2,0 L ha ⁻¹ Foxtril super
	19.04.2011	0,6 L ha ⁻¹ Moddus + 1,2 L ha ⁻¹ Input Xpro
Ernte	11.07.2011	Parzellenmähdrescher
Stoppelbearbeitung	28.07.2011	Grubber
	05.08.2011	Grubber
	18.08.2011	Kreiselegge
	22.08.2011	Pflug

Zweite Nachfrucht: Winterraps (2011)

Saatbettbereitung	25.08.2010	Kreiselegge, Saat Raps, Sorte <i>Visby</i> , 100 Körner/m ² , 11 cm Reihenabstand
	25.08.2010	4,0 L ha ⁻¹ Colzor Trio
	17.09.2010	Kreiselegge
Saat	17.09.2010	Neusaat Raps, Sorte <i>Visby</i> , 80 Körner/m ² , 11 cm Reihenabstand
Kulturführung	11.03.2011	Stickstoffdüngung mit KAS <ul style="list-style-type: none"> • Nach Lu 1 – 3: 58 kg N ha⁻¹ • Nach Ww 1 – 3 und Rs 1 – 3: 83 kg N ha⁻¹
	24.03.2011	0,3 L ha ⁻¹ Decis
	24.03.2011	1,0 L ha ⁻¹ Lebosol, entspricht 150 g Bor ha ⁻¹
	29.03.2011	0,2 L ha ⁻¹ Trebon 30
	06.04.2011	0,3 L ha ⁻¹ Biscaya + 1,5 Liter ha ⁻¹ Folicur
	14.04.2011	0,2 L ha ⁻¹ Trebon 30
Ernte	12.07.2011	Parzellenmähdrescher
Stoppelbearbeitung	28.07.2011	Grubber
	05.08.2011	Grubber
	18.08.2011	Kreiselegge
	22.08.2011	Pflug

Dritte Nachfrucht: Winterroggen (2012)

Saatbettbereitung	24.08.2011	Kreiselegge
	30.09.2011	Kreiselegge
Saat	05.10.2011	Sorte <i>Dukato</i> , 230 Körner/m ² , 9,6 cm Reihenabstand
Kulturführung	17.10.2011	4,5 L ha ⁻¹ Malibu
	15.03.2012	50 kg N ha ⁻¹ ASS
	18.04.2012	0,8 L ha ⁻¹ CCC + 0,3 L ha ⁻¹ Moddus + 1,5 L ha ⁻¹ Input Xpro
	27.04.2012	0,7 L ha ⁻¹ Camposan extra
Ernte	27.06.2012	Parzellenmähdrescher

Dritte Nachfrucht: Winterraps (2012)

Saatbettbereitung	24.08.2011	Kreiselegge; Saat Raps, Sorte <i>Visby</i> , 100 Körner/m ² , 10,5 cm Reihenabstand
	24.08.2011	4,0 L ha ⁻¹ Colzor Trio Vorauflauf
	31.08.2011	Walzen
	05.09.2011	Kreiselegge
Saat	05.09.2011	Neusaat Raps, Sorte <i>Visby</i> , 60 Körner/m ² , 10,5 cm Reihenabstand
Kulturführung	13.09.2011	2,0 L ha ⁻¹ Butisan Top
	15.09.2011	0,5 L ha ⁻¹ Select 240 + 1,0 L ha ⁻¹ Öl Parasommer
	19.09.2011	50 mL ha ⁻¹ Karate Zeon
	12.10.2011	1,0 L ha ⁻¹ Folicur + 1,0 L ha ⁻¹ Agil S
	07.03.2012	75 kg N ha ⁻¹ ASS
	28.03.2012	0,2 L ha ⁻¹ Trebon 30 EC + 0,5 L ha ⁻¹ Toprex + 2,0 L ha ⁻¹ Lebosol, entspricht 300 g Bor ha ⁻¹
	05.04.2012	0,3 L ha ⁻¹ Biscaya
Ernte	10.07.2012	Parzellenmähdrescher

Zeiternten und Gaswechselfmessungen an den Nachfrüchten (Versuch A)

Anhang-Tab. 2: BBCH-Stadien, zu denen im Versuch A von 2010 bis 2012 Zeiternten in den Nachfruchtbeständen vorgenommen wurden, sowie untersuchte Varianten in Abhängigkeit von den erfassten Parametern. *Anmerkungen:* TM: Sprosstrockenmasse, L: Sprosslänge, BFI: Blattflächenindex, SPAD: SPAD-Value. Die vierte Beprobung der Futtermalve am 30.07.2010 umfasste eine größere Fläche (3 m²/Parzelle) als die üblichen Zeiternten (0,5 m²/Parzelle) und es wurde nur die Sprosstrockenmasse erfasst. Mit der ersten Zeiternte in den Beständen der Wintergerste wurde nur die Sprosstrockenmasse erfasst.

		Zeiternten					
2010	Sommerweizen	Datum	31.05.	15.06.	30.06.	13.07.	27.07.
		BBCH	33	55	68	83	89
		Varianten TM, L	Lu 1 – 3; Ww 1 – 3; Rs 1 – 3				
	Futtermalve	Varianten BFI	Lu 1 – 3; Ww 1 – 3; Rs 1				
		Datum	09.07.	20.07.	28.07.	(30.07.)	
		BBCH	62	67/71	69/72	(69/72)	
	Varianten TM, L	Lu 1 – 3; Ww 1 – 3; Rs 1 – 3					
	Varianten BFI	Lu 1 – 3; Ww 1 – 3; Rs 1					
2011	Wintergerste	Datum	17.02.	18.04.	05.05.	19.05.	01.06.
		BBCH	22	31/32	47/49	59/62	84/85
		Varianten TM, L, SPAD, BFI	Lu 1 – 3; Ww 1 – 3; Rs 1 – 3				
2012	Winterraps	Datum	27.03.	13.04.	27.04.	11.05.	29.05.
		BBCH	51/52	60/61	65	68	76/78
		Varianten TM, L, SPAD, BFI	Lu 1 – 3; Ww 1 – 3; Rs 1 – 3				

Anhang-Tab. 3: BBCH-Stadien, zu denen im Versuch A von 2010 bis 2012 Gaswechselfmessungen in den Nachfruchtbeständen vorgenommen wurden, sowie die untersuchten Varianten.

		Gaswechselfmessungen						
2010	Sommer- weizen	Datum	21.06.	24.06.	28.06.	01.07.	05.07.	08.07.
		BBCH	59	66	68	71	73	75
		Varianten Gaswechsel	Lu 1 – 3, Ww 1 – 3, Rs 1					
	Futter- malve	Datum	06.07.	13.07.	15.07.	20.07.	22.07.	27.07.
		BBCH	60	65	66	67	69	69
		Varianten Gaswechsel	Lu 1 – 2, Ww 1 – 2, Rs 1					
2011	Winter- gerste	Datum	18.04.	03.05.	17.05.	07.06.	27.06.	
		BBCH	32	47	59	86	89	
		Varianten Gaswechsel	Lu 1 – 2, Ww 1 – 2, Rs 1 – 2					
	Winter- raps	Datum	17.04.	10.05.	06.06.	19.06.		
		BBCH	59	68	81	83		
		Varianten Gaswechsel	Lu 1 – 2, Ww 1 – 2, Rs 1 – 2					
2012	Winter- raps	Datum	03.05.	14.05.	30.05.	12.06.	22.06.	
		BBCH	66	69	77	79	80	
		Varianten Gaswechsel	Lu 1 – 2, Ww 1 – 2, Rs 1 – 2					

Weitere Ergebnisse von Zeiternten, Gaswechsellmessungen und Nährstoffanalytik an den Nachfruchtbeständen (Versuch A)

Erste Nachfrucht: Sommerweizen (2010)

Sprosstrockenmasse

Anhang-Tab. 4: Sprosstrockenmasse von Sommerweizen in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht. Fünf Zeiternten (31.05. - 27.07.2010) im Versuch A. Das Zeichen # kennzeichnet eine Wechselwirkung der Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Sprosstrockenmasse [t TM ha ⁻¹]				
		31.05.10	15.06.10	30.06.10	13.07.10	27.07.10
Dauer	1	2,25 #	5,87	11,05	14,52	10,23
	2	2,00 #	5,81	11,06	14,24	9,76
	3	2,48 #	6,30	10,92	14,92	11,18
	∅	2,24	5,99	11,01	14,56	10,39

Blattflächenindex

Anhang-Tab. 5: Blattflächenindex von Sommerweizen nach Luzerne und Wegwarte in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht. Fünf Zeiternten (31.05. - 27.07.2010) im Versuch A. Das Zeichen # kennzeichnet eine Wechselwirkung der Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Blattflächenindex				
		31.05.10	15.06.10	30.06.10	13.07.10	27.07.10
Dauer	1	3,68	2,85 #	1,93	0,08	0,00
	2	3,41	2,42 #	2,10	0,13	0,00
	3	4,20	2,91 #	2,26	0,15	0,00
	∅	3,76	2,73	2,10	0,12	0,00

Sprosslänge

Anhang-Tab. 6: Sprosslänge von Sommerweizen in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht. Vier Zeiternten (15.06. - 27.07.2010) im Versuch A. Keine signifikanten Unterschiede. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Sprosslänge [cm]			
		15.06.10	30.06.10	13.07.10	27.07.10
Art	Lu	81	94	97	94
	Ww	79	92	93	91
	Rs	80	89	94	93
Dauer	1	79	92	95	95
	2	79	90	94	91
	3	81	92	94	91
	∅	80	92	94	93

Blattphotosyntheserate

Anhang-Tab. 7: Blattphotosyntheserate von Sommerweizen bezogen auf 1 m² Blattfläche nach einjährig kultivierter Vorfrucht in Abhängigkeit von der Vorfruchtart. Sechs Messreihen (21.06. - 08.07.2010) im Versuch A. Keine signifikanten Unterschiede. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Photosyntheserate [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]					
		21.06.10	24.06.10	28.06.10	01.07.10	05.07.10	08.07.10
Art	Lu	18,84	11,24	8,37	4,20	12,87	3,03
	Ww	18,54	12,38	9,25	4,65	13,14	3,87
	Rs	20,18	11,63	8,35	4,10	14,61	3,82
Ø		19,18	11,75	8,65	4,31	13,54	3,57

Bestandes-Blattphotosyntheserate

Anhang-Tab. 8: Bestandes-Blattphotosyntheserate von Sommerweizen bezogen auf 1 m² Bodenfläche nach einjährig kultivierter Vorfrucht in Abhängigkeit von der Vorfruchtart. Sechs Messreihen (21.06. - 08.07.2010) im Versuch A. Keine signifikanten Unterschiede. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Bestandesphotosyntheserate [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]					
		21.06.10	24.06.10	28.06.10	01.07.10	05.07.10	08.07.10
Art	Lu	66,44	39,37	20,64	10,17	29,91	8,58
	Ww	56,46	37,12	27,61	14,13	34,07	8,92
	Rs	67,66	38,93	24,58	12,41	33,50	8,86
Ø		63,52	38,47	24,28	12,24	32,49	8,79

Blatttranspirationsrate

Anhang-Tab. 9: Blatttranspirationsrate von Sommerweizen bezogen auf 1 m² Blattfläche nach einjährig kultivierter Vorfrucht in Abhängigkeit von der Vorfruchtart. Sechs Messreihen (21.06. - 08.07.2010) im Versuch A. Keine signifikanten Unterschiede. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Transpirationsrate [$\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]					
		21.06.10	24.06.10	28.06.10	01.07.10	05.07.10	08.07.10
Art	Lu	1,82	2,74	2,49	1,64	2,31	1,21
	Ww	2,28	3,11	2,60	1,73	2,24	1,62
	Rs	2,22	3,17	2,28	1,57	2,62	1,69
Ø		2,11	3,01	2,46	1,65	2,39	1,51

Bestandes-Blatttranspirationsrate

Anhang-Tab. 10: Bestandes-Blatttranspirationsrate von Sommerweizen bezogen auf 1 m² Bodenfläche nach einjährig kultivierter Vorfrucht in Abhängigkeit von der Vorfruchtart. Sechs Messreihen (21.06. - 08.07.2010) im Versuch A. Keine signifikanten Unterschiede. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Bestandestranspirationsrate [mmol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹]					
		21.06.10	24.06.10	28.06.10	01.07.10	05.07.10	08.07.10
Art	Lu	6,47	9,63	6,27	4,16	5,26	2,81
	Ww	6,77	9,26	7,96	5,35	5,64	3,93
	Rs	7,41	10,54	6,63	4,64	6,00	3,91
Ø		6,88	9,81	6,95	4,72	5,63	3,55

Nährstoffgehalte in der Sprosstrockenmasse

Anhang-Tab. 11: Nährstoffgehalte in der Sprosstrockenmasse von Sommerweizen zu den fünf Zeiternteterminen (31.05. - 27.07.2010) und im Erntegut in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Stufe des jeweiligen Versuchsfaktors. Das Zeichen # kennzeichnet eine Wechselwirkung der Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Nährstoffgehalt [%] in der TM								
		31.05.10	15.06.10	30.06.10	13.07.10	27.07.10	13.08.10	13.08.10		
		Spross	Spross	Spross	Spross	Spross	Korn	Stroh		
Stickstoff	Art	Lu	3,93	2,58 a	1,82 a	1,35	1,30 a	2,93 a	0,54 a	
		Ww	3,65	2,12 b	1,44 b	1,15	0,91 b	2,50 b	0,39 b	
		Rs	3,74	2,19 b	1,43 b	1,10	0,96 b	2,47 b	0,37 b	
	Dauer	1	3,88	2,39	1,56	1,23	1,09	2,72 a	0,46	
		2	3,87	2,26	1,58	1,20	0,99	2,58 b	0,40	
		3	3,57	2,25	1,55	1,18	1,09	2,59 ab	0,43	
		Ø	3,77	2,30	1,56	1,20	1,06	2,63	0,43	
	Phosphor	Art	Lu	0,58 #	0,38 #	0,26 ab	0,22	0,17 #	0,44 #	0,07 b
			Ww	0,58 #	0,39 #	0,27 a	0,24	0,17 #	0,44 #	0,09 a
			Rs	0,53 #	0,37 #	0,25 b	0,22	0,16 #	0,44 #	0,07 b
Dauer		1	0,55 #	0,37 #	0,26	0,22	0,16 #	0,43 #	0,07	
		2	0,57 #	0,38 #	0,26	0,24	0,16 #	0,45 #	0,08	
		3	0,57 #	0,38 #	0,27	0,22	0,17 #	0,43 #	0,08	
		Ø	0,56	0,38	0,26	0,23	0,16	0,44	0,08	
Kalium		Art	Lu	5,50 a	3,73 a	2,24 #	1,58 #	1,17 #	0,56	1,37 a
			Ww	5,14 b	3,21 b	1,84 #	1,33 #	1,04 #	0,59	1,06 b
			Rs	5,33 ab	3,25 b	1,82 #	1,28 #	0,97 #	0,57	0,98 b
	Dauer	1	5,29	3,42	2,02 #	1,38 #	1,07 #	0,59	1,17	
		2	5,42	3,42	1,91 #	1,35 #	1,01 #	0,56	1,03	
		3	5,26	3,36	1,97 #	1,44 #	1,10 #	0,56	1,21	
		Ø	5,32	3,40	1,97	1,39	1,06	0,57	1,14	

N_{min}-Menge im Boden

Anhang-Tab. 12: N_{min}-Menge im Boden unter Sommerweizen in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der Vorfruchtvariante. Vier Messreihen (26.05. - 28.07.2010) im Versuch A.

Anmerkungen: SD: Standardabweichung. *: SD kann nicht angegeben werden, da nur ein Messwert vorliegt.

		N _{min} -Menge im Boden							
		26.05.10		16.06.10		07.07.10		28.07.10	
		[kg ha ⁻¹]	SD	[kg ha ⁻¹]	SD	[kg ha ⁻¹]	SD	[kg ha ⁻¹]	SD
0 – 45 cm	Lu 2	168,5	0,3	74,7	*	46,5	26,1	57,5	*
	Lu 3	182,6	*	54,5	17,7	51,1	22,0	52,1	16,1
	Ww 2	50,6	5,3	28,3	*	38,8	3,1	22,3	6,6
	Ww 3	61,6	*	30,3	8,5	20,4	8,2	25,2	3,3
	Rs 1	46,1	15,8	33,1	15,3	18,6	9,6	16,6	0,7
	Rs 3	29,0	*	24,4	*	34,1	*	22,5	*
	∅	89,3	63,9	40,4	19,1	35,0	17,6	31,2	17,0
45 – 75 cm	Lu 2	26,9	17,9	23,6	5,1	18,9	14,9	20,7	18,2
	Lu 3	35,9	19,0	22,6	3,3	16,5	8,6	10,3	8,1
	Ww 2	3,3	0,9	4,6	2,5	7,7	2,7	1,8	1,4
	Ww 3	4,9	3,8	2,5	1,5	4,6	1,6	2,6	1,5
	Rs 1	4,8	0,0	3,8	0,1	3,5	1,7	4,9	4,4
	Rs3	5,4	*	2,5	*	5,7	*	1,4	*
	∅	14,3	16,2	10,6	10,2	9,8	8,5	7,4	9,7
75 – 105 cm	Lu 2	30,1	11,0	18,9	10,2	19,3	17,6	14,7	5,7
	Lu 3	30,4	1,6	22,9	1,5	23,5	3,8	12,4	6,0
	Ww 2	2,7	2,0	5,5	5,7	10,8	6,0	1,1	1,5
	Ww 3	3,8	0,5	3,8	2,2	4,1	1,5	2,4	0,4
	Rs 1	1,9	0,1	2,7	0,5	4,7	0,9	1,4	2,0
	Rs 3	1,9	*	2,3	*	5,2	*	0,0	*
	∅	12,7	14,4	10,0	9,6	11,8	10,1	5,8	6,8
0 – 105 cm	Lu 2	225,6	28,5	128,0	*	84,7	58,7	76,0	*
	Lu 3	261,2	*	100,0	15,9	91,1	26,8	74,8	30,3
	Ww 2	56,7	4,2	40,6	*	57,3	5,6	25,1	6,5
	Ww 3	67,2	*	36,6	12,2	29,1	11,4	30,2	5,2
	Rs 1	52,8	16,0	39,6	15,8	26,8	12,2	22,9	5,7
	Rs 3	36,3	*	29,3	*	45,0	*	23,9	*
	∅	115,0	93,5	61,1	38,3	56,6	34,4	40,6	26,2

Erste Nachfrucht: Futtermalve (2010)

Sprosstrockenmasse

Anhang-Tab. 13: Sprosstrockenmasse von Futtermalve in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht. Drei Zeiternten (09.07. - 28.07.2010) im Versuch A. Keine signifikanten Unterschiede. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Sprosstrockenmasse [t TM ha ⁻¹]		
		09.07.10	20.07.10	28.07.10
Dauer	1	3,15	6,11	6,08
	2	3,37	6,33	6,51
	3	3,39	6,35	6,58
Ø		3,31	6,27	6,39

Blattflächenindex

Anhang-Tab. 14: Blattflächenindex von Futtermalve nach Luzerne und Wegwarte in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht. Drei Zeiternten (09.07. - 28.07.2010) im Versuch A. Keine signifikanten Unterschiede. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Blattflächenindex		
		09.07.10	20.07.10	28.07.10
Dauer	1	2,63	2,03	1,75
	2	2,76	2,17	1,81
	3	3,08	2,19	1,53
Ø		2,82	2,13	1,70

Sprosslänge

Anhang-Tab. 15: Sprosslänge von Futtermalve in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht. Drei Zeiternten (09.07. - 28.07.2010) im Versuch A. Keine signifikanten Unterschiede. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Sprosslänge [cm]		
		09.07.10	20.07.10	28.07.10
Art	Lu	68	83	86
	Ww	66	82	88
	Rs	67	86	86
Dauer	1	65	81	86
	2	67	84	86
	3	69	86	89
Ø		67	83	87

Bestandes-Blattphotosyntheserate

Anhang-Tab. 16: Bestandes-Blattphotosyntheserate von Futtermalve bezogen auf 1 m² Bodenfläche nach Luzerne und Wegwarte in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht. Sechs Messreihen (06.07. - 27.07.2010) im Versuch A. Keine signifikanten Unterschiede. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Bestandesphotosyntheserate [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]					
		06.07.10	13.07.10	15.07.10	20.07.10	22.07.10	27.07.10
Dauer	1	62,27	65,30	46,38	34,56	41,80	39,45
	2	64,79	63,76	50,13	40,20	42,83	44,01
Ø		63,53	64,53	48,26	37,38	42,31	41,73

Blatttranspirationsrate

Anhang-Tab. 17: Blatttranspirationsrate von Futtermalve bezogen auf 1 m² Blattfläche nach Luzerne und Wegwarte in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht. Sechs Messreihen (06.07. - 27.07.2010) im Versuch A. Keine signifikanten Unterschiede. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Transpirationsrate [$\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]					
		06.07.10	13.07.10	15.07.10	20.07.10	22.07.10	27.07.10
Dauer	1	3,08	4,25	2,79	3,04	2,47	3,14
	2	3,53	4,80	2,47	3,53	2,35	2,66
Ø		3,30	4,53	2,63	3,29	2,41	2,90

Bestandes-Blatttranspirationsrate

Anhang-Tab. 18: Bestandes-Blatttranspirationsrate von Futtermalve bezogen auf 1 m² Bodenfläche nach Luzerne und Wegwarte in Abhängigkeit von der Vorfruchtart. Sechs Messreihen (06.07. - 27.07.2010) im Versuch A. Keine signifikanten Unterschiede. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Bestandestranspirationsrate [$\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]					
		06.07.10	13.07.10	15.07.10	20.07.10	22.07.10	27.07.10
Dauer	1	8,06	9,91	6,51	6,18	4,88	5,57
	2	9,49	10,98	6,05	7,29	5,09	4,85
Ø		8,77	10,44	6,28	6,73	4,98	5,21

Nährstoffgehalte in der Sprosstrockenmasse

Anhang-Tab. 19: Nährstoffgehalte in der Sprosstrockenmasse von Futtermalve zu den drei Zeiternteterminen (09.07. - 28.07.2010) in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Stufe des jeweiligen Versuchsfaktors. Das Zeichen # kennzeichnet eine Wechselwirkung der Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Nährstoffgehalt [%] in der TM			
		09.07.10	20.07.10	28.07.10	
Stickstoff	Art	Lu	3,85 #	2,94 a	2,89 a
		Ww	3,44 #	2,62 b	2,50 b
		Rs	3,51 #	2,57 b	2,40 b
	Dauer	1	3,65 #	2,75	2,65
		2	3,50 #	2,64	2,50
		3	3,65 #	2,74	2,64
		Ø	3,60	2,71	2,60
Phosphor	Art	Lu	0,36	0,30 #	0,29 b
		Ww	0,37	0,33 #	0,32 a
		Rs	0,37	0,31 #	0,31 a
	Dauer	1	0,37	0,30 #	0,30
		2	0,36	0,32 #	0,31
		3	0,37	0,32 #	0,31
		Ø	0,37	0,31	0,31
Kalium	Art	Lu	4,62 a	3,44 #	3,17
		Ww	4,34 b	3,33 #	3,09
		Rs	4,50 ab	3,44 #	3,08
	Dauer	1	4,41	3,30 #	3,14
		2	4,45	3,37 #	3,06
		3	4,60	3,54 #	3,13
		Ø	4,49	3,40	3,11

Zweite Nachfrucht: Wintergerste (2011)

Sprosstrockenmasse

Anhang-Tab. 20: Sprosstrockenmasse von Wintergerste in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht. Fünf Zeiternten (17.02. - 01.06.2011) im Versuch A. Keine signifikanten Unterschiede. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Sprosstrockenmasse [t TM ha ⁻¹]				
		17.02.11	18.04.11	05.05.11	19.05.11	01.06.11
Dauer	1	0,40	2,09	7,57	12,05	15,64
	2	0,40	2,40	8,35	13,97	16,75
	3	0,42	2,43	7,89	12,38	16,15
	Ø	0,41	2,31	7,94	12,80	16,18

Blattflächenindex

Anhang-Tab. 21: Blattflächenindex von Wintergerste in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht. Vier Zeiternten (18.04. - 01.06.2011) im Versuch A. Keine signifikanten Unterschiede. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Blattflächenindex			
		18.04.11	05.05.11	19.05.11	01.06.11
Art	Lu	3,59	5,23	3,96	3,19
	Ww	3,63	5,49	4,22	3,13
	Rs	3,38	5,11	4,40	3,04
Dauer	1	3,15	5,13	3,93	3,04
	2	3,71	5,36	4,50	3,31
	3	3,73	5,32	4,15	3,02
Ø		3,53	5,27	4,20	3,12

Sprosslänge

Anhang-Tab. 22: Sprosslänge von Wintergerste in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht. Vier Zeiternten (18.04. - 01.06.2011) im Versuch A. Keine signifikanten Unterschiede. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Sprosslänge [cm]			
		18.04.11	05.05.11	19.05.11	01.06.11
Art	Lu	35	78	112	116
	Ww	36	79	115	116
	Rs	35	78	114	113
Dauer	1	34	76	111	114
	2	36	81	116	117
	3	36	77	114	114
Ø		36	78	114	115

SPAD-Value

Anhang-Tab. 23: SPAD-Value von Wintergerste in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht. Vier Messungen (18.04. - 01.06.2011) im Versuch A. Keine signifikanten Unterschiede. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		SPAD-Value			
		18.04.11	05.05.11	19.05.11	01.06.11
Art	Lu	47,0	46,0	53,0	50,8
	Ww	46,8	46,6	53,2	51,6
	Rs	47,8	45,9	52,5	51,9
Dauer	1	47,3	46,3	53,1	52,2
	2	48,2	46,0	53,3	51,2
	3	46,2	46,2	52,3	50,9
Ø		47,2	46,2	52,9	51,4

Blattphotosyntheserate

Anhang-Tab. 24: Photosyntheserate von Wintergerste bezogen auf 1 m² Blattfläche in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht. Fünf Messreihen (18.04. - 27.06.2011) im Versuch A. Keine signifikanten Unterschiede. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Photosyntheserate [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]				
		18.04.11	03.05.11	17.05.11	07.06.11	27.06.11
Dau- er	1	10,98	15,19	10,59	8,74	19,89
	2	9,93	15,33	10,47	8,21	18,64
Ø		10,45	15,26	10,53	8,47	19,26

Bestandes-Blattphotosyntheserate

Anhang-Tab. 25: Bestandes-Blattphotosyntheserate von Wintergerste bezogen auf 1 m² Bodenfläche in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht. Vier Messreihen (18.04. - 07.06.2011) im Versuch A. Keine signifikanten Unterschiede. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Bestandesphotosyntheserate [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]			
		18.04.11	03.05.11	17.05.11	07.06.11
Dau- er	1	35,05	74,97	40,26	26,34
	2	37,32	81,18	47,67	27,50
Ø		36,18	78,08	43,97	26,92

Blatttranspirationsrate

Anhang-Tab. 26: Blatttranspirationsrate von Wintergerste bezogen auf 1 m² Blattfläche in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht. Fünf Messreihen (18.04. - 27.06.2011) im Versuch A. Keine signifikanten Unterschiede. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Transpirationsrate [$\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]				
		18.04.11	03.05.11	17.05.11	07.06.11	27.06.11
Art	Lu	3,19	2,39	2,37	1,95	3,86
	Ww	3,30	2,46	2,61	2,43	3,95
	Rs	3,04	2,36	2,27	2,27	3,63
Dau- er	1	3,22	2,47	2,50	2,39	3,91
	2	3,13	2,35	2,34	2,05	3,71
Ø		3,18	2,40	2,42	2,22	3,81

Bestandes-Blatttranspirationsrate

Anhang-Tab. 27: Bestandes-Blatttranspirationsrate von Wintergerste bezogen auf 1 m² Bodenfläche in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht. Vier Messreihen (18.04. - 07.06.2011) im Versuch A. Keine signifikanten Unterschiede. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Bestandestranspirationsrate [mmol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹]			
		18.04.11	03.05.11	17.05.11	07.06.11
Art	Lu	11,43	12,41	9,27	6,29
	Ww	11,18	12,47	10,97	7,55
	Rs	10,40	11,98	9,70	7,15
Dauer	1	10,33	12,07	9,42	7,22
	2	11,71	12,45	10,55	6,78
Ø		11,00	12,29	9,98	7,00

Nährstoffgehalte in der Sprosstrockenmasse

Anhang-Tab. 28: Nährstoffgehalte in der Sprosstrockenmasse von Wintergerste zu den fünf Zeiternteterminen (17.02. - 01.06.2011) und im Erntegut in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Stufe des jeweiligen Versuchsfaktors. Das Zeichen # kennzeichnet eine Wechselwirkung der Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Nährstoffgehalt [%] in der TM							
		17.02.11 Spross	18.04.11 Spross	05.05.11 Spross	19.05.11 Spross	01.06.11 Spross	11.07.11 Korn	11.07.11 Stroh	
Stickstoff	Art	Lu	5,07 a	3,35	1,97 a	1,66 a	1,25 a	1,87 a	0,49 a
		Ww	4,85 b	3,42	1,76 b	1,38 b	1,04 b	1,58 b	0,31 b
		Rs	4,90 b	3,38	1,67 b	1,39 b	1,06 b	1,57 b	0,33 b
	Dauer	1	4,84	3,37	1,73 b	1,55	1,01	1,67	0,36
		2	5,02	3,39	1,76 ab	1,47	1,17	1,62	0,38
		3	4,96	3,39	1,90 a	1,41	1,16	1,74	0,39
		Ø	4,94	3,38	1,80	1,48	1,11	1,67	0,38
Phosphor	Art	Lu	0,58	0,61 #	0,36	0,30	0,23	0,37	0,10 #
		Ww	0,56	0,60 #	0,35	0,29	0,22	0,38	0,10 #
		Rs	0,57	0,60 #	0,35	0,30	0,23	0,38	0,12 #
	Dauer	1	0,57	0,59 #	0,34	0,30	0,22	0,37	0,10 #
		2	0,58	0,61 #	0,36	0,29	0,23	0,38	0,11 #
		3	0,55	0,61 #	0,35	0,30	0,23	0,38	0,11 #
		Ø	0,57	0,60	0,35	0,30	0,23	0,38	0,11
Kalium	Art	Lu	4,56	4,87 #	3,14 a	2,07	1,84	0,57	1,62
		Ww	4,53	5,06 #	2,99 b	2,07	1,77	0,58	1,56
		Rs	4,73	4,99 #	2,92 b	2,01	1,75	0,56	1,63
	Dauer	1	4,27	4,65 #	2,98	1,97	1,74	0,61	1,59
		2	4,86	4,89 #	3,06	2,09	1,78	0,55	1,58
		3	4,70	5,37 #	3,01	2,09	1,84	0,57	1,64
		Ø	4,61	4,97	3,02	2,05	1,79	0,57	1,60

N_{min}-Menge im Boden

Anhang-Tab. 29: N_{min}-Menge im Boden unter Wintergerste in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der Vorfruchtvariante. Sechs Messreihen (06.04. - 04.08.2011) im Versuch A.

Anmerkung: SD: Standardabweichung.

		N _{min} -Menge im Boden											
		06.04.11		02.05.11		18.05.11		09.06.11		06.07.11		04.08.11	
		[kg ha ⁻¹]	SD [kg ha ⁻¹]	SD [kg ha ⁻¹]	SD [kg ha ⁻¹]	SD [kg ha ⁻¹]	SD [kg ha ⁻¹]	SD [kg ha ⁻¹]	SD [kg ha ⁻¹]	SD [kg ha ⁻¹]	SD [kg ha ⁻¹]	SD [kg ha ⁻¹]	SD [kg ha ⁻¹]
0 – 45 cm	Lu 1	22,1	21,8	19,4	2,9	10,3	3,7	19,0	2,2	32,5	14,9	42,0	4,1
	Lu 2	33,7	10,4	19,4	7,0	11,2	5,4	20,2	3,0	35,4	3,8	38,4	15,1
	Lu 3	35,5	23,7	25,9	2,8	16,9	5,4	25,0	2,3	35,3	0,4	48,8	14,3
	Ww 1	37,1	21,1	14,7	4,3	14,2	2,2	14,3	3,3	26,5	2,9	27,9	1,6
	Ww 2	44,1	19,3	16,3	0,7	16,7	0,3	13,4	0,2	26,6	4,1	41,5	0,8
	Ww 3	35,4	13,5	20,7	2,6	12,3	11,9	17,4	4,0	29,4	4,6	27,0	3,4
	Rs 1	37,3	5,4	18,8	1,1	15,5	2,7	14,1	1,4	21,9	0,2	33,9	9,7
	Rs 3	33,4	17,5	14,6	3,1	16,6	3,7	19,5	7,4	28,7	0,1	36,0	6,4
	∅	34,8	14,2	18,7	4,4	14,2	4,7	17,9	4,6	29,5	6,3	36,9	9,5
45 – 75 cm	Lu 1	19,9	18,4	3,6	2,2	2,5	3,5	3,3	0,2	3,7	1,2	7,0	1,9
	Lu 2	7,7	0,8	4,6	2,2	2,7	3,3	2,7	0,1	3,4	1,4	10,1	6,4
	Lu 3	7,9	9,4	5,6	1,1	2,4	3,3	4,7	0,5	3,7	1,2	4,5	2,7
	Ww 1	4,5	0,1	2,5	0,7	4,9	0,2	3,9	0,6	4,0	1,2	4,6	3,2
	Ww 2	3,0	1,8	4,5	1,4	2,9	0,1	2,9	0,0	4,5	0,0	2,7	0,1
	Ww 3	6,0	5,9	11,0	2,0	1,4	2,0	3,6	0,1	3,9	0,9	4,1	2,7
	Rs 1	5,4	4,0	3,4	0,5	3,9	1,2	3,7	1,6	4,1	2,7	2,4	0,6
	Rs 3	6,3	1,8	8,4	3,5	4,8	0,3	4,2	0,0	3,9	1,2	2,1	0,4
	∅	7,6	7,6	5,5	3,1	3,2	2,0	3,6	0,8	3,9	1,1	4,7	3,4
75 – 105 cm	Lu 1	24,1	6,7	10,4	3,4	6,7	2,5	4,5	0,9	3,4	2,1	3,6	0,5
	Lu 2	55,2	7,8	24,9	2,1	6,8	5,2	8,7	6,7	6,9	3,5	4,5	1,7
	Lu 3	38,3	33,3	8,8	3,5	6,2	8,7	6,7	5,0	5,5	1,5	6,2	4,9
	Ww 1	19,3	0,6	6,9	7,2	4,0	1,5	3,9	0,5	3,7	1,5	2,1	0,2
	Ww 2	17,5	6,9	10,1	0,4	2,7	0,6	3,7	1,2	2,5	0,9	2,5	1,0
	Ww 3	31,0	13,6	23,5	9,8	5,1	7,2	4,1	0,9	3,8	0,8	4,2	3,4
	Rs 1	21,7	13,6	5,7	3,3	4,8	0,1	3,9	0,2	2,6	0,8	1,6	0,1
	Rs 3	28,1	9,1	22,4	11,5	8,5	2,5	6,3	3,7	3,4	0,8	7,0	4,3
	∅	29,4	16,1	14,1	9,1	5,6	3,8	5,2	3,0	4,0	1,9	4,0	2,7
0 – 105 cm	Lu 1	66,1	10,1	33,4	2,7	19,5	4,7	26,8	1,1	39,6	11,6	52,6	2,7
	Lu 2	96,6	1,8	49,0	2,7	20,6	13,8	31,6	9,6	45,7	8,7	52,9	10,4
	Lu 3	81,7	66,4	40,2	0,4	25,6	17,5	36,4	6,8	44,4	3,1	59,6	22,0
	Ww 1	61,0	21,8	24,1	12,2	23,0	0,6	22,1	3,4	34,3	5,5	34,5	4,6
	Ww 2	64,7	28,0	30,9	1,6	22,3	1,1	20,0	1,0	33,7	3,1	46,7	2,0
	Ww 3	72,4	33,1	55,2	9,2	18,8	21,0	25,1	5,0	37,1	4,5	35,4	9,5
	Rs 1	64,3	23,0	27,9	4,9	24,3	1,4	21,7	0,0	28,5	3,2	37,9	10,4
	Rs 3	67,8	10,1	45,5	18,0	29,9	0,9	30,0	3,7	36,0	2,1	45,2	10,3
	∅	71,8	25,1	38,3	12,3	23,0	8,8	26,7	6,5	37,4	7,1	45,6	11,8

Zweite Nachfrucht: Winterraps (2011)

Blattphotosyntheserate

Anhang-Tab. 30: Blattphotosyntheserate von Winterraps bezogen auf 1 m² Blattfläche in Abhängigkeit von der Vorfruchtart. Vier Messreihen (17.04. - 19.06.2011) im Versuch A. Keine signifikanten Unterschiede. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Photosyntheserate [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]			
		17.04.11	10.05.11	06.06.11	19.06.11
Art	Lu	22,29	14,64	11,42	7,49
	Ww	21,97	13,56	12,69	7,36
	Rs	21,99	14,97	10,29	7,17
Ø		22,08	14,39	11,47	7,34

Blatttranspirationsrate

Anhang-Tab. 31: Blatttranspirationsrate von Winterraps bezogen auf 1 m² Blattfläche in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht. Vier Messreihen (17.04. - 19.06.2011) im Versuch A. Keine signifikanten Unterschiede. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Transpirationsrate [$\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]			
		17.04.11	10.05.11	06.06.11	19.06.11
Art	Lu	3,98	4,18	2,38	0,84
	Ww	4,18	4,59	2,75	0,83
	Rs	3,88	4,46	2,39	0,74
Dauer	1	4,12	4,49	2,37	0,79
	2	3,90	4,32	2,64	0,82
	Ø	4,01	4,41	2,51	0,80

Nährstoffgehalte in der Korntrockenmasse

Anhang-Tab. 32: Nährstoffgehalte in der Korntrockenmasse von Winterraps 2011 in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Stufe des jeweiligen Versuchsfaktors. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Nährstoffgehalt [%] in der TM		
		Stickstoff	Phosphor	Kalium
Art	Lu	3,31 a	0,69	0,61
	Ww	2,95 b	0,71	0,59
	Rs	2,81 b	0,69	0,59
Dauer	1	2,99 b	0,68 b	0,59
	2	2,98 b	0,71 a	0,60
	3	3,10 a	0,71 a	0,61
Ø		3,02	0,70	0,60

Dritte Nachfrucht: Winterroggen (2012)

Nährstoffgehalte in der Korn- und Strohtrockenmasse

Anhang-Tab. 33: Nährstoffgehalte in der Korn- und Strohtrockenmasse von Winterroggen 2012 in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Faktorstufe. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Nährstoffgehalt [%] in der TM					
		Korn			Stroh		
		Stickstoff	Phosphor	Kalium	Stickstoff	Phosphor	Kalium
Art	Lu	1,36 a	0,35	0,60	0,43 a	0,13 ab	1,76 a
	Ww	1,16 b	0,35	0,59	0,35 b	0,13 a	1,68 b
	Rs	1,18 b	0,34	0,60	0,34 b	0,12 b	1,65 b
Dauer	1	1,21	0,33	0,59	0,37	0,12	1,68
	2	1,21	0,35	0,59	0,35	0,13	1,69
	3	1,28	0,35	0,60	0,39	0,13	1,73
	∅	1,23	0,35	0,60	0,37	0,13	1,70

Dritte Nachfrucht: Winterraps (2012)

Sprosstrockenmasse

Anhang-Tab. 34: Sprosstrockenmasse von Winterraps in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht. Fünf Zeiternten (27.03. - 29.05.2012) im Versuch A. Das Zeichen # kennzeichnet eine Wechselwirkung der Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Sprosstrockenmasse [t TM ha ⁻¹]				
		27.03.12	13.04.12	27.04.12	11.05.12	29.05.12
Dauer	1	2,75	3,77	6,48	6,94 #	10,96
	2	2,82	3,72	6,81	7,08 #	10,65
	3	2,93	3,81	6,57	7,56 #	11,45
	∅	2,83	3,77	6,62	7,19	11,02

Blattflächenindex

Anhang-Tab. 35: Blattflächenindex von Winterraps in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht. Fünf Zeiternten (27.03. - 29.05.2012) im Versuch A. Keine signifikanten Unterschiede. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Blattflächenindex				
		27.03.12	13.04.12	27.04.12	11.05.12	29.05.12
Dauer	1	1,70	2,10	2,03	1,82	1,06
	2	1,92	2,06	2,03	1,64	0,91
	3	1,96	2,29	2,15	1,88	1,11
	∅	1,86	2,15	2,07	1,78	1,03

Sprosslänge

Anhang-Tab. 36: Sprosslänge von Winterraps in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht. Fünf Zeiternten (27.03. - 29.05.2012) im Versuch A. Keine signifikanten Unterschiede. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Sprosslänge [cm]				
		27.03.12	13.04.12	27.04.12	11.05.12	29.05.12
Dauer	1	28	65	88	109	112
	2	26	65	88	109	109
	3	28	64	86	114	110
Ø		27	65	87	111	111

SPAD-Value

Anhang-Tab. 37: SPAD-Value von Winterraps in Abhängigkeit von der Vorfruchtart. Fünf Messungen (27.03. - 29.05.2012) im Versuch A. Das Zeichen # kennzeichnet eine Wechselwirkung der Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		SPAD-Value				
		27.03.12	13.04.12	27.04.12	11.05.12	29.05.12
Art	Lu	53,4	59,2	62,5	54,6 #	47,0
	Ww	53,6	58,4	60,8	54,0 #	44,7
	Rs	52,6	59,7	58,7	52,2 #	44,6
Ø		53,2	59,1	60,7	53,6	45,4

Blattphotosyntheserate

Anhang-Tab. 38: Blattphotosyntheserate von Winterraps bezogen auf 1 m² Blattfläche in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht. Fünf (nach Luzerne) bzw. vier (nach Wegwarte und Rohrschwengel) Messreihen (03.05. - 22.06.2012 bzw. 03.05. - 12.06.2012) im Versuch A. Keine signifikanten Unterschiede. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Photosyntheserate [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]				
		03.05.12	14.05.12	30.05.12	12.06.12	22.06.12
Art	Lu	18,71	13,84	10,00	10,03	8,70
	Ww	18,78	15,03	9,91	9,11	
	Rs	18,24	14,62	10,91	8,97	
Dauer	1	18,19	15,50	10,13	9,19	8,92
	2	18,96	13,50	10,41	9,55	8,49
Ø		18,58	14,50	10,27	9,37	8,70

Bestandes-Blattphotosyntheserate

Erste Schätzung

Anhang-Tab. 39: Bestandes-Blattphotosyntheserate von Winterraps bezogen auf 1 m² Bodenfläche in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht. Fünf (nach Luzerne) bzw. vier (nach Wegwarte und Rohrschwengel) Messreihen (03.05. - 22.06.2012 bzw. 03.05. - 12.06.2012) im Versuch A. Keine signifikanten Unterschiede. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Bestandesphotosyntheserate [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]				
		03.05.12	14.05.12	30.05.12	12.06.12	22.06.12
Dauer	1	35,44	29,09	9,61	1,66	0,47
	2	37,88	21,00	10,22	1,24	0,37
Ø		36,66	25,04	9,91	1,45	0,42

Optimierte Schätzung

Anhang-Tab. 40: Bestandes-Blattphotosyntheserate von Winterraps bezogen auf 1 m² Bodenfläche nach optimierter Schätzung in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht. Fünf (nach Luzerne) bzw. vier (nach Wegwarte und Rohrschwengel) Messreihen (03.05. - 22.06.2012 bzw. 03.05. - 12.06.2012) im Versuch A. Keine signifikanten Unterschiede. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Bestandesphotosyntheserate [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]				
		03.05.12	14.05.12	30.05.12	12.06.12	22.06.12
Dauer	1	20,64	19,67	9,31	1,66	0,47
	2	21,36	15,53	9,53	1,24	0,37
Ø		21,00	17,60	9,42	1,45	0,42

Blatttranspirationsrate

Anhang-Tab. 41: Blatttranspirationsrate von Winterraps bezogen auf 1 m² Blattfläche in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht. Fünf (nach Luzerne) bzw. vier (nach Wegwarte und Rohrschwengel) Messreihen (03.05. - 22.06.2012 bzw. 03.05. - 12.06.2012) im Versuch A. Keine signifikanten Unterschiede. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Transpirationsrate [mmol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹]				
		03.05.12	14.05.12	30.05.12	12.06.12	22.06.12
Art	Lu	1,91	3,00	3,69	3,12	1,73
	Ww	2,37	3,29	3,60	2,53	
	Rs	2,46	3,66	3,66	2,78	
Dauer	1	2,05	3,69	3,78	2,91	1,69
	2	2,44	2,94	3,53	2,71	1,76
Ø		2,25	3,32	3,65	2,81	1,73

Bestandes-Blatttranspirationsrate

Erste Schätzung

Anhang-Tab. 42: Bestandes-Blatttranspirationsrate von Winterraps bezogen auf 1 m² Bodenfläche in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht. Fünf (nach Luzerne) bzw. vier (nach Wegwarte und Rohrschwengel) Messreihen (03.05. - 22.06.2012 bzw. 03.05. - 12.06.2012) im Versuch A. Keine signifikanten Unterschiede. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Bestandestranspirationsrate [mmol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹]				
		03.05.12	14.05.12	30.05.12	12.06.12	22.06.12
Dauer	1	4,20	7,02	3,55	0,48	0,07
	2	5,16	4,39	3,46	0,37	0,08
Ø		4,68	5,71	3,50	0,43	0,07

Optimierte Schätzung

Anhang-Tab. 43: Bestandes-Blatttranspirationsrate von Winterraps bezogen auf 1 m² Bodenfläche nach optimierter Schätzung in Abhängigkeit von der Anbaudauer der Vorfrucht. Fünf Messreihen (03.05. - 22.06.2012 bzw. 03.05. - 12.06.2012) im Versuch A. Keine signifikanten Unterschiede. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Bestandestranspirationsrate [mmol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹]				
		03.05.12	14.05.12	30.05.12	12.06.12	22.06.12
Dauer	1	3,63	5,96	3,46	0,48	0,07
	2	4,47	3,87	3,27	0,37	0,08
Ø		4,05	4,91	3,37	0,48	0,07

Nährstoffgehalte in der Sprosstrockenmasse

Anhang-Tab. 44: Nährstoffgehalte in der Sprosstrockenmasse von Winterraps 2012 zu den fünf Zeiternteterminen (27.03. - 29.05.2012) und im Erntegut in Abhängigkeit von der Vorfruchtart und der Anbaudauer der Vorfrucht im Versuch A. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen Varianten in Abhängigkeit von der Stufe des jeweiligen Versuchsfaktors. Das Zeichen # kennzeichnet eine Wechselwirkung der Faktoren Vorfruchtart und Anbaudauer der Vorfrucht. ANOVA mit *Post-hoc* Tukey, $\alpha = 0,05$.

		Nährstoffgehalt [%] in der TM						
		27.03.12	13.04.12	27.04.12	11.05.12	29.05.12	10.07.12	
		Spross	Spross	Spross	Spross	Spross	Korn	
Stickstoff	Art	Lu	3,69 a	3,62 a	2,61 a	2,31 a	1,38 #	3,14 a
		Ww	3,39 b	3,33 b	2,20 b	1,85 b	1,25 #	2,85 b
		Rs	3,49 a	3,55 a	2,25 b	1,88 b	1,23 #	2,77 b
	Dauer	1	3,44	3,64	2,36	1,90	1,25 #	2,91
		2	3,63	3,39	2,34	2,12	1,31 #	2,92
		3	3,48	3,53	2,35	2,02	1,30 #	2,94
		∅	3,52	3,52	2,35	2,01	1,29	2,92
Phosphor	Art	Lu	0,51	0,56	0,44 a	0,49 #	0,37	0,76
		Ww	0,47	0,53	0,41 b	0,48 #	0,37	0,74
		Rs	0,48	0,54	0,43 ab	0,48 #	0,37	0,75
	Dauer	1	0,48	0,52 b	0,42	0,48 #	0,37	0,75
		2	0,50	0,54 ab	0,43	0,48 #	0,37	0,77
		3	0,49	0,57 a	0,43	0,49 #	0,36	0,73
		∅	0,49	0,54	0,43	0,48	0,37	0,75
Kalium	Art	Lu	3,46	3,52	2,92 a	2,71 a	1,86	0,65
		Ww	3,25	3,35	2,58 b	2,58 ab	1,84	0,65
		Rs	3,37	3,48	2,66 b	2,52 b	1,84	0,65
	Dauer	1	3,26	3,40	2,59	2,55	1,80	0,66
		2	3,46	3,50	2,85	2,59	1,88	0,66
		3	3,35	3,44	2,72	2,66	1,86	0,64
		∅	3,36	3,45	2,72	2,60	1,85	0,65

N_{min}-Menge im Boden

Anhang-Tab. 45: N_{min}-Menge im Boden unter Winterraps in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der Vorfruchtvariante. Sechs Messreihen (31.01. - 11.07.2012) im Versuch A.

Anmerkungen: SD: Standardabweichung. *: SD kann nicht angegeben werden, da nur ein Messwert vorliegt.

		N _{min} -Menge im Boden											
		31.01.12		15.03.12		03.04.12		09.05.12		05.06.12		11.07.12	
		[kg ha ⁻¹]	SD [kg ha ⁻¹]	SD [kg ha ⁻¹]	SD [kg ha ⁻¹]	SD [kg ha ⁻¹]	SD [kg ha ⁻¹]	SD [kg ha ⁻¹]	SD [kg ha ⁻¹]	SD [kg ha ⁻¹]	SD [kg ha ⁻¹]	SD	
0 – 45 cm	Lu 1	17,2	2,6	89,5	0,1	71,4	7,3	24,6	15,5	21,8	8,4	28,9	10,6
	Lu 2	17,4	3,5	171,4	1,7	72,5	0,9	27,9	*	19,7	6,9	36,7	15,9
	Lu 3	19,6	3,0	146,7	28,2	71,3	14,8	25,7	4,1	26,1	5,4	41,6	10,5
	Ww 1	17,6	1,1	97,4	*	44,0	7,1	33,0	*	14,6	0,4	28,3	5,2
	Ww 2	20,9	1,3	130,1	14,3	70,1	43,9	28,4	11,1	21,2	1,0	24,8	*
	Ww 3	20,5	4,1	116,0	28,5	67,2	37,4	25,5	9,2	23,6	1,7	32,2	3,7
	Rs 1	18,1	1,5	96,2	*	42,7	8,4	21,6	11,2	8,7	0,8	27,2	5,5
	Rs 3	16,1	2,6	172,8	6,3	51,8	0,6	32,8	4,7	14,5	5,2	34,6	4,5
	∅	18,4	2,5	131,9	34,3	61,4	20,1	27,0	7,8	18,8	6,5	32,3	8,2
45 – 75 cm	Lu 1	6,0	0,1	7,5	2,0	4,1	1,2	5,7	3,1	5,5	3,4	4,6	1,3
	Lu 2	7,8	4,1	11,2	8,3	6,8	4,2	15,2	*	2,9	0,0	5,2	1,5
	Lu 3	5,9	0,0	15,2	9,6	5,8	2,9	7,5	6,2	2,9	0,5	4,9	1,6
	Ww 1	4,9	1,4	5,0	*	3,7	0,3	5,4	*	2,7	0,5	5,4	0,0
	Ww 2	5,5	0,3	10,7	0,2	6,0	2,8	6,1	2,2	3,9	0,9	7,8	3,6
	Ww 3	4,5	0,8	7,6	2,1	2,6	0,1	4,3	0,3	3,5	0,2	4,6	1,1
	Rs 1	5,3	0,6	6,6	*	3,8	0,5	5,4	2,3	3,1	0,4	6,3	1,8
	Rs 3	5,4	0,6	8,6	2,3	3,8	0,6	5,7	0,8	4,0	0,6	5,8	0,1
	∅	5,7	1,5	9,5	4,8	4,6	2,1	6,4	3,4	3,6	1,3	5,6	1,6
75 – 105 cm	Lu 1	4,7	0,5	22,6	25,1	4,4	0,6	4,6	1,3	2,8	0,6	4,0	0,4
	Lu 2	5,2	0,3	8,9	8,0	3,3	1,5	6,8	*	5,8	4,1	4,4	0,6
	Lu 3	7,1	2,0	9,6	0,7	4,8	2,1	4,4	1,7	2,4	0,7	4,5	0,8
	Ww 1	6,0	1,0	3,3	*	2,4	0,3	4,8	*	3,1	1,0	5,2	0,4
	Ww 2	5,2	0,7	5,3	2,7	2,7	0,8	4,4	2,2	3,1	0,5	5,3	0,7
	Ww 3	5,1	0,6	6,3	5,6	5,4	4,6	4,7	0,8	4,2	0,6	5,1	0,1
	Rs 1	5,2	0,8	7,3	*	3,2	1,5	4,4	1,2	2,9	0,3	5,5	0,5
	Rs 3	5,1	0,6	4,9	0,8	3,9	1,5	6,0	0,6	5,5	2,2	6,0	0,1
	∅	5,5	1,0	9,0	9,7	3,7	1,8	4,9	1,2	3,7	1,8	5,0	0,7
0 – 105 cm	Lu 1	28,0	2,0	119,6	23,3	79,9	6,8	35,0	20,0	30,1	12,4	37,5	12,3
	Lu 2	30,4	1,0	191,5	18,0	82,6	4,8	24,9	35,2	28,5	10,9	46,4	16,7
	Lu 3	32,6	5,0	171,5	17,8	81,9	19,7	37,6	11,9	31,4	6,6	51,0	12,9
	Ww 1	28,5	3,5	105,7	*	50,1	7,2	21,6	30,5	20,4	1,2	38,9	5,6
	Ww 2	31,6	2,2	146,0	11,8	78,7	47,6	38,9	15,6	28,2	0,4	35,8	*
	Ww 3	30,1	4,3	129,9	32,0	75,1	41,8	34,5	9,7	31,4	2,5	41,9	2,7
	Rs 1	28,6	1,3	110,2	*	49,7	10,4	31,3	14,7	14,7	1,5	39,0	7,8
	Rs 3	26,6	3,8	186,3	9,4	59,5	1,5	44,4	6,1	24,0	8,0	46,4	4,5
	∅	29,6	3,0	150,4	34,7	69,7	22,3	33,5	16,5	26,1	7,7	42,5	8,7

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich von Herzen allen danken, die mich in und bei meinem Promotionsvorhaben unterstützt haben.

Zunächst sei Prof. Dr. Ulrich Köpke für das in mich gesetzte Vertrauen, die Betreuung und die Begutachtung der Arbeit sowie für die Unterstützung mit Institutsressourcen gedankt.

Vielen Dank an Prof. Dr. Wulf Amelung für die Übernahme des Zweitgutachtens, an Prof. Dr. Karl-Heinz Südekum für die Bereitschaft als fachnahes Mitglied zu fungieren sowie an Prof. Dr. Heinrich Scherer für die Leitung des Prüfungsausschusses.

Der Konrad-Adenauer-Stiftung danke ich sehr für die finanzielle und ideelle Förderung im Rahmen des Promotionsstipendiums, das mir die Durchführung des Vorhabens ermöglicht hat.

Ich danke herzlich Prof. Dr. Timo Kautz für die Betreuung bei der Datenerhebung sowie bei Auswertung, Interpretation und Niederschrift der Ergebnisse.

Ein herzliches Dankeschön gilt Dr. Daniel Neuhoff, Dr. Miriam Athmann und Christoph Stumm für die Unterstützung und das anregende Umfeld im Institut. Meinen Mitdoktoranden, insbesondere Dr. Ute Perkons, gebührt für ausgezeichnete Kollegialität und Freundschaft mein tiefer Dank.

Dr. Patrick Beuters danke ich für die gute und angenehme Zusammenarbeit im Rahmen des Versuchs zu Deposition und Wiederaufnahme von Stickstoff. Ein Dankeschön richte ich ebenfalls an alle weiteren Kolleginnen und Kollegen der DFG-Forschergruppe FOR 1320 für gutes Miteinander.

Die Durchführung der Feldversuche wäre nicht möglich gewesen ohne den Einsatz von Johannes Siebigtheroth, Henning Riebeling, Christian Dahn, Frank Täufer, Harriet Hunter und Britta Staffel. Großartige Unterstützung durch Dieter Zedow, Monica Tucholla-Haas und das Labor-Team erfuhr ich bei der Analyse der zahllosen Proben. Allen ein großes Dankeschön.

Ebenfalls von Herzen danken möchte ich den Mitarbeitern der Versuchstechnik auf dem Campus Klein-Altendorf unter der Leitung von Bernd Bünten für bestmögliche Unterstützung.

Herzlicher Dank gebührt Deborah Rupprecht (INRES Pflanzenernährung, Universität Bonn) für Unterstützung durch Rat und Tat bei Massenspektroskopie und Kryovermahlung, Dr. Bärbel Kroschewski (Humboldt-Universität zu Berlin) für Beratung bei statistischen Fragen sowie Petra-Maria Küpper für Hilfe bei der Lösung weiterer mathematischer Aufgaben.

Philipp Antar, Hannah Becker, Charlotte Pries und Paul Blume danke ich sehr für produktive und angenehme Zusammenarbeit bei der Durchführung von Teilprojekten der dargestellten Untersuchungen im Rahmen ihrer Bachelor- und Diplomarbeiten.

Auch an die zahlreichen studentischen Hilfskräfte und Praktikanten, die unverzichtbare Unterstützung geleistet haben, richte ich ein großes Dankeschön.

Für wertvolle Hinweise zum Manuskript dieser Arbeit danke ich außerdem herzlich KHS, Johannes Küpper und Dr. Ute Perkons.

Herzlichen Dank richte ich an meine Eltern Elfriede und Karl-Peter Küpper, die es mir auf unterschiedlichste Art ermöglicht haben, mich voll auf Studium und Promotion konzentrieren zu können.

