

Schlussbericht zum Thema

Fruchtfolgen für optimierte Nutzung der
Bodenressourcen: Mischanbau allorhizer und
homorhizer Arten zur komplementären
Durchwurzelung des Ober- und Unterbodens

FKZ: 2818OE024, 2818OE045, 2818OE046, 2818OE047,
2818OE048, 2818OE142

Projektnehmer: Rheinische Friedrich-Wilhelms-
Universität Bonn, Universität Kassel, Georg-August-
Universität Göttingen, Forschungsring e.V., Leibniz
Universität Hannover

Gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung
und Landwirtschaft auf Grund eines Beschlusses des
Deutschen Bundestages im Rahmen des
Bundesprogramms Ökologischer Landbau.

Das Bundesprogramm Ökologischer Landbau Landwirtschaft (BÖL) hat sich zum Ziel gesetzt, die Rahmenbedingungen für die ökologische und nachhaltige Land- und Lebensmittelwirtschaft in Deutschland zu verbessern. Es wird vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) finanziert und in der BÖL-Geschäftsstelle in der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) in Bonn in die Praxis umgesetzt. Das Programm untergliedert sich in zwei ineinandergreifende Aktionsfelder, den Forschungs- und den Informationsbereich.

Detaillierte Informationen und aktuelle Entwicklungen finden Sie unter www.bundesprogramm.de

Wenn Sie weitere Fragen haben, wenden Sie sich bitte an:

Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
Geschäftsstelle Bundesprogramm Ökologischer Landbau
Deichmanns Aue 29
53179 Bonn
Tel: 0228-6845-3280
E-Mail: boel@ble.de

Abschlussbericht des Verbundprojektes

Fruchtfolgen für optimierte Nutzung der Bodenressourcen: Mischanbau allorhizer und homorhizer Arten zur **komplementären** Durchwurzelung des Ober- und Unterbodens

Akronym

MIKODU

FKZ: 2818OE024, 2818OE045, 2818OE047, 2818OE046, 2818OE048, 2818OE142

Projektlaufzeit: 01. 10. 2018 - 31. 12. 2023

Zuwendungsempfänger/ ausführende Stellen:

- Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn - Landwirtschaftliche Fakultät - Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz (INRES) - Agrarökologie und Organischer Landbau, Bonn
- Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn - Landwirtschaftliche Fakultät - Institut für Landtechnik, Bonn
- Forschungsring e.V., Darmstadt
- Georg-August-Universität Göttingen - Fakultät für Agrarwissenschaften - Department für Nutzpflanzenwissenschaften - Abt. Pflanzenbau, Göttingen
- Universität Kassel - Fachbereich 11 Ökologische Agrarwissenschaften - Fachgebiet Bodenkunde, Witzenhausen
- Leibniz Universität Hannover - Naturwissenschaftliche Fakultät - Institut für Bodenkunde, Hannover

Gefördert durch



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Roman Kemper

Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz, Fachgebiet Agrarökologie und
Organischer Landbau
Auf dem Hügel 6, 53121 Bonn

Dr. Sabine Seidel und Sofia Hadir

Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz, Fachgebiet Pflanzenbau
Katzenburgweg 5, 53115 Bonn

Dr. Oliver Schmittmann

Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
Institut für Landtechnik
Nussallee 5, 53115 Bonn

Meike Oltmanns und Dr. Christopher Brock

Forschungsring e.V.
Brandschneise 5, 64295 Darmstadt

Dr. Nicole Legner

Georg-August-Universität Göttingen
Department für Nutzpflanzenwissenschaften, Abteilung Pflanzenbau
Von-Siebold-Straße 8, 37075 Göttingen

Prof. Dr. Stephan Peth und Dr. Marc-Oliver Göbel

Leibniz Universität Hannover
Institut für Bodenkunde, Arbeitsgruppe Bodenbiophysik
Herrenhäuser Straße 2, 30419 Hannover

Weitere Beteiligte

Prof. Dr. Thomas Döring

Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz, Fachgebiet Agrarökologie und
Organischer Landbau
Auf dem Hügel 6, 53121 Bonn

Dr. Catharina Meinen und Prof. Dr. Stefan Siebert

Georg-August-Universität Göttingen
Department für Nutzpflanzenwissenschaften, Abteilung Pflanzenbau
Von-Siebold-Straße 8, 37075 Göttingen

Dr. Daniel Uteau

Universität Kassel
Fachbereich Ökologische Agrarwissenschaften, Fachgebiet Bodenkunde
Nordbahnhofstraße 1a, D-37213 Witzenhausen

Prof. Dr. Miriam Athmann

Universität Kassel
Fachbereich Ökologische Agrarwissenschaften, Fachgebiet Ökologischer Land- und Pflanzenbau
Nordbahnhofstraße 1a, D-37213 Witzenhausen

Inhaltsverzeichnis

Inhalt

Kurzfassung	8
Abstract	10
1 Einführung	11
1.1 Gegenstand des Vorhabens	11
1.2 Ziele und Aufgabenstellung des Projekts, Bezug des Vorhabens zu den einschlägigen Zielen des BÖLN oder zu konkreten Bekanntmachungen und Ausschreibungen	12
1.3 Planung und Ablauf des Projektes	13
1.3.1 Arbeitspaket 1: Mehrjähriger Feldfutterbau – Futterpflanzenkombinationen mit maximierter Durchwurzelung des Ober- und Unterbodens (Hofgut Oberfeld bei Darmstadt)	13
1.3.2 Arbeitspaket 2: Zwischenfruchtoptionen zur pflanzenbaulichen Optimierung der Bodenstruktur (Lehr- und Versuchsstation für Organischen Landbau ‚Wiesengut‘)	14
1.3.3 Arbeitspaket 3: Anbauoptionen zur Minderung von Bodenverdichtungen im Vorgewende (Lehr- und Versuchsstation für Organischen Landbau ‚Wiesengut‘)	14
1.3.4 Arbeitspaket 4: Modellierung der Effekte von Futterpflanzen und Zwischenfrüchten auf Wasserhaushaltskomponenten, Wasser- und Nährstoffaufnahme, Ertrag und Humus	15
2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	16
2.1 Beeinflussung der Bodenstruktur durch Pflanzenwurzeln	16
2.2 Effekte der Bodenstruktur auf Wurzelwachstum	16
2.3 Auswirkungen auf das Nährstoffmanagement	16
2.4 Gemengeanbau zur Nutzung komplementärer Effekte auf Bodenstruktur und Nährstoffanlieferung für die Nachfrucht	17
3 Material und Methoden	20
3.1 Arbeitspaket 1	20
3.1.1 Versuchsstandort (Meike Oltmanns)	20
3.1.2 Versuchsanlage (Meike Oltmanns)	21
3.1.3 Sprossmasse, Nährstoffgehalte, mineralischer Bodenstickstoff, Bodenwassergehalt, Blattflächenindex (Meike Oltmanns, Sofia Hadir, Dr. Sabine Seidel)	22
3.1.4 Wurzelwachstum und Bioporen (Roman Kemper)	22
3.1.5 Wurzelartentrennung (Dr. Nicole Legner)	23
3.1.6 Eindringwiderstand und Bodenwassergehalt (Dr. Oliver Schmittmann)	23
3.1.7 Bodenphysik (Dr. Marc-Oliver Göbel und Prof. Dr. Stephan Peth)	24
3.2 Arbeitspaket 2	25
3.2.1 Versuchsstandort (Roman Kemper)	25
3.2.2 Versuchsanlage (Roman Kemper)	28
3.2.3 Sprossmasse, Nährstoffgehalte, mineralischer Bodenstickstoff (Roman Kemper)	28

3.2.4	Wurzelwachstum und Bioporen (Roman Kemper)	29
3.2.5	Wurzelartentrennung (Dr. Nicole Legner).....	29
3.2.6	Eindringwiderstand und Bodenwassergehalt (Dr. Oliver Schmittmann)	30
3.2.7	Bodenphysik (Dr. Marc-Oliver Göbel und Prof. Dr. Stephan Peth)	30
3.3	Arbeitspaket 3	31
3.3.1	Versuchsstandort (Roman Kemper)	31
3.3.2	Versuchsanlage (Roman Kemper)	31
3.3.3	Sprossmasse, Nährstoffgehalte, mineralischer Bodenstickstoff, Bodenwassergehalt (Roman Kemper)	32
3.3.4	Wurzelwachstum und Bioporen (Roman Kemper)	32
3.3.5	Eindringwiderstand und Bodenwassergehalt (Dr. Oliver Schmittmann)	33
3.3.6	Bodenphysik (Dr. Marc-Oliver Göbel und Prof. Dr. Stephan Peth)	33
3.4	Arbeitspaket 4	34
3.4.1	Modellierung von Spross- und Wurzelwachstum sowie Ertragsbildung und Ertrag mit SIMPLACE (Sofia Hadir und Dr. Sabine Seidel)	34
3.4.2	Modellierung des Bodenwasserhaushalts mit HYDRUS-1D (Dr. Marc-Oliver Göbel und Prof. Dr. Stephan Peth).....	35
3.4.3	Modellierung der Humusbildung mit HUMOD (Dr. Christopher Brock)	39
4	Ausführliche Darstellung der wichtigsten Ergebnisse	45
4.1	Arbeitspaket 1	45
4.1.1	Spross- und Wurzelmasse sowie Nährstoff-Aufnahmen der Futterpflanzen (Roman Kemper) 45	
4.1.2	Wurzellängendichte, Wurzelmasse und Wurzelmassenverteilung in den Mischungen sowie Bioporendichte und Abschätzung des Bioporengenesepotential mittels Wurzelstücken (Roman Kemper)	47
4.1.3	Mineralischer Bodenstickstoff unter den Nachfrüchten (Roman Kemper)	51
4.1.4	Effekte auf die Nachfrucht (Roman Kemper)	53
4.1.5	Wurzelartentrennung (Dr. Nicole Legner).....	59
4.1.6	Eindringwiderstand und Bodenwassergehalt (Dr. Oliver Schmittmann)	66
4.1.7	Bodenphysik (Dr. Marc-Oliver Göbel und Prof. Dr. Stephan Peth)	68
4.2	Arbeitspaket 2	70
4.2.1	Spross- und Wurzelwachstum sowie Bioporen (Roman Kemper)	70
4.2.2	Stickstoffaufnahme, C/N-Verhältnis und Lignin-Gehalte der Zwischenfrüchte sowie mineralischer Bodenstickstoffgehalt und Ertrag der Nachfrucht Sommerweizen (Roman Kemper) 83	
4.2.3	Wurzelartentrennung (Dr. Nicole Legner).....	86
4.2.4	Eindringwiderstand und Bodenwassergehalt (Dr. Oliver Schmittmann)	96
4.2.5	Bodenphysik (Dr. Marc-Oliver Göbel und Prof. Dr. Stephan Peth)	99

4.3	Arbeitspaket 3	105
4.3.1	Ergebnisse Vorversuche – Säulen (Roman Kemper)	105
4.3.2	Sprossmasse, Nährstoffgehalte und Wurzelwachstum von Vor- und Nachfrüchten sowie Bioporendichte und mineralischer Bodenstickstoff (Roman Kemper)	106
4.3.3	Eindringwiderstand und Bodenwassergehalt (Dr. Oliver Schmittmann)	117
4.3.4	Bodenphysik (Dr. Marc-Oliver Göbel und Prof. Dr. Stephan Peth)	120
4.4	Arbeitspaket 4	123
4.4.1	Modellierung von Spross- und Wurzelwachstum sowie Ertragsbildung und Ertrag mit SIMPLACE (Sofia Hadir und Dr. Sabine Seidel)	123
4.4.2	Modellierung des Bodenwasserhaushalts mit HYDRUS-1D (Dr. Marc-Oliver Göbel und Prof. Dr. Stephan Peth).....	127
4.4.3	Modellierung der Humusbildung mit HUMOD (Dr. Christopher Brock)	136
5	Diskussion der Ergebnisse	139
5.1	Arbeitspaket 1	139
5.1.1	Spross- und Wurzelwachstum der Futterpflanzen (Roman Kemper)	139
5.1.2	Effekte auf die Nachfrüchte (Roman Kemper)	140
5.1.3	Wurzelartentrennung (Dr. Nicole Legner).....	141
5.1.4	Eindringwiderstand und Bodenwassergehalt (Dr. Oliver Schmittmann)	141
5.1.5	Bodenphysik (Dr. Marc-Oliver Göbel und Prof. Dr. Stephan Peth)	141
5.2	Arbeitspaket 2	143
5.2.1	Spross- und Wurzelwachstum sowie Bioporen (Roman Kemper)	143
5.2.2	Stickstoffaufnahme der Zwischenfrüchte und Erträge der Nachfrucht (Roman Kemper) 145	
5.2.3	Wurzelartentrennung (Dr. Nicole Legner).....	146
5.2.4	Eindringwiderstand und Bodenwassergehalt (Dr. Oliver Schmittmann)	146
5.2.5	Bodenphysik (Dr. Marc-Oliver Göbel und Prof. Dr. Stephan Peth)	147
5.3	Arbeitspaket 3	150
5.3.1	Effekte der Futterpflanzen und Zwischenfrüchte auf Bioporengese, Vorfruchtwirkung sowie Ertragsbildung und Durchwurzelung der Nachfrüchte (Roman Kemper) 150	
5.3.2	Eindringwiderstand und Bodenwassergehalt (Dr. Oliver Schmittmann)	151
5.3.3	Bodenphysik (Dr. Marc-Oliver Göbel und Prof. Dr. Stephan Peth)	152
5.4	Arbeitspaket 4	154
5.4.1	Modellierung von Spross- und Wurzelwachstum sowie Ertragsbildung und Ertrag mit SIMPLACE (Sofia Hadir und Dr. Sabine Seidel)	154
5.4.2	Modellierung des Bodenwasserhaushalts mit HYDRUS-1D (Dr. Marc-Oliver Göbel und Prof. Dr. Stephan Peth).....	154
5.4.3	Modellierung der Humusbildung mit HUMOD (Dr. Christopher Brock)	155

6	Angaben zum voraussichtlichen Nutzen und zur Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	157
6.1	Spross, Wurzel und Bioporen	157
6.2	Wurzelartentrennung.....	157
6.3	Eindringwiderstand und Bodenwassergehalt	157
6.4	Bodenphysik/ Bodenphysikalische Modellierung	157
6.5	Modellierung von Spross- und Wurzelwachstum sowie Ertragsbildung und Ertrag.....	158
6.6	Modellierung der Humusbildung mit HUMOD.....	158
7	Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten zu den tatsächlich erreichten Zielen; Hinweise auf weiterführende Fragestellungen.....	159
7.1	Spross, Wurzel und Bioporen	159
7.2	Wurzelartentrennung.....	159
7.3	Eindringwiderstand und Bodenwassergehalt	159
7.4	Bodenphysik/ Bodenphysikalische Modellierung	159
7.5	Modellierung von Spross- und Wurzelwachstum sowie Ertragsbildung und Ertrag.....	160
7.6	Modellierung der Humusbildung mit HUMOD.....	160
8	Zusammenfassung.....	161
9	Literaturverzeichnis.....	163
10	Übersicht über alle im Berichtszeitraum vom Projektnehmer realisierten Veröffentlichungen zum Projekt	168
11	Anhang.....	171

Kurzfassung

Um Ertragslücken im ökologischen Ackerbau zu schließen, sollen durch die Ausbildung ausgedehnter Wurzelsysteme und die durch Pflanzenwurzeln verbesserte Bodenstruktur die Mobilisierung von Nährstoffen aus der Festphase des Bodens optimiert, sowie bisher nicht vollständig genutzte Wasserreserven im Unterboden erschlossen werden. Dazu ist ein vertieftes Verständnis der Wurzel-Boden-Interaktion sowie des Wurzelwachstums im Gemenge im Vergleich zu Reinsaaten wichtig. Hier setzte das Forschungsprojekt MIKODU (Fruchtfolgen für optimierte Nutzung der Bodenressourcen: Misch-anbau allorhizer und homorhizer Arten zur komplementären Durchwurzelung des Ober- und Unterbodens) an. Es beschäftigte sich mit der Durchwurzelung von Futterpflanzen und Zwischenfrüchten und deren Wirkung auf Nachfrüchte, Bodenstruktur, Bodenwasserhaushalt, Stickstoffdynamik sowie Humusbildung. Dabei stand der Vergleich von Zwischenfrucht- und Futterpflanzen-Mischungen mit Reinsaaten im Fokus.

In einem Feldversuch am Sand-Standort Hofgut Oberfeld in Darmstadt wurden zweijährig Mischungen und Reinsaaten allorhizer und homorhizer Futterpflanzen sowie eine Kontroll-Variante ohne Futterpflanzen angebaut. Anschließend erfolgte der Anbau der Nachfrüchte Sommerweizen und Winterroggen. Am Auenlehm-Standort Wiesengut in Hennef an der Sieg wurden in zwei Jahren Feldversuche mit Zwischenfruchtreinsaaten und -mischungen angelegt. Die Mischungen wurden aus allorhiz und homorhiz wurzelnden Zwischenfruchtarten zusammengesetzt. Zur Bewertung der Vorfruchtwirkung wurde Sommerweizen angebaut. In einem dritten Versuch, ebenfalls am Wiesengut, wurde die meliorative Wirkung pfahlwurzelnder Kulturpflanzen in einem verdichteten Vorgewende untersucht. Dazu wurden verschiedene Varianten von Zwischenfrüchten und Futterpflanzen angebaut und anschließend der Ertrag und die Durchwurzelung der Nachfrüchte Sommerweizen und Winterroggen untersucht.

Zur Erfassung der Wurzelmerkmale wurden die Profilwandmethode und die Monolithmethode angewendet. Die Bioporendichte wurde mittels Fotografie und digitaler Bildauswertung erfasst. Die Fourier-Transform-Infrarot Spektroskopie wurde zur Wurzelartentrennung der Mischungen genutzt. Messungen mit einem Penetrometer wurden zur Erhebung der Eindringwiderstände verwendet. Stechzylinder wurden für die Analyse der bodenphysikalischen Parameter entnommen. Darüber hinaus wurden Modellierungen mit SIMPLACE zur Quantifizierung der Stickstoff-Dynamik im Zwischenfruchtanbau, mit HYDRUS-1D zur Simulation des Bodenwasserhaushalts sowie mit HUMOD zur Quantifizierung der Humusbildung durchgeführt.

Im Futterpflanzen-Versuch am Hofgut Oberfeld erreichten Luzerne und Luzerne-Rohrschwingelmischungen die höchsten Spross- und Wurzeltrockenmassen. Eine intensive Durchwurzelung des Unterbodens erreichte die Luzerne, eine intensive Durchwurzelung des Oberbodens die Gräser. Zudem zeigte Luzerne das höchste Potential zur Erhöhung der Bioporendichte.

Im Zwischenfruchtversuch am Wiesengut zeigte das Screening mit der Profilwandmethode unterschiedliche Wurzeltypen. Mischungseffekte für Spross- und Wurzeltrockenmasse der Zwischenfruchtmischungen waren gering oder nicht vorhanden. Hingegen zeigten sich, insbesondere in Mischungen mit Ölrettich, hohe Mischungseffekte für die Durchwurzelungsintensität im Unterboden. Winterharte Zwischenfrüchte wiesen geringe Stickstoffverluste über Winter und niedrige C/N-Verhältnisse auf. Die Unterschiede in den Kornerträgen der Nachfrucht Sommerweizen waren gering, mit höchsten Erträgen nach legumen Zwischenfrüchten.

Im Vorgewende-Versuch am Wiesengut zeigte der Anbau von pfahlwurzelnden Futterpflanzen, insbesondere von Wegwarte, ein höheres Bioporengenesepotential im verdichtenden Unterboden im Vergleich zu Zwischenfrüchten. Jedoch konnte bisher kein signifikanter Ertragsvorteil in den Getreide-Nachfrüchten nach diesen Pflanzen festgestellt werden. Die Wegwarte und die Wegwarte-Rohrschwinkel-Mischung zeigten Tendenzen zur Bodenlockerung und Erhöhung der Luftkapazität.

Die Modellierung ergab, dass Leguminosen und ihre Mischungen positiv zur Humusbilanz beitragen, wobei der Humusaufbau durch Futterpflanzen höher war als durch Zwischenfrüchte.

Insgesamt sind die Ergebnisse des gesamten Projektes ein wichtiger Schritt zu einem tieferen Verständnis von Dynamiken in Mischungen von Kulturpflanzen sowie der Wurzel-Boden-Interaktion.

Abstract

One strategy for closing yield gaps in organic arable farming is to develop extensive root systems and improve soil structure through plant roots, thereby optimising the mobilisation of nutrients from the solid phase of the soil and of underutilised water reserves in the subsoil. To achieve this, a deeper understanding of root-soil interaction and root growth in mixtures compared to pure stands is essential. This is the focus of the MIKODU research project (Crop rotations for optimised use of soil resources: mixed cultivation of allorhizous and homorhizous species for complementary rooting of the topsoil and subsoil). It dealt with the rooting of forage and cover crops and their effect on subsequent crops, soil structure, soil water balance, nitrogen dynamics and humus balance. The focus was on the comparison of cover and forage crop mixtures with pure stands.

In a field trial at the sandy site Hofgut Oberfeld in Darmstadt, mixtures and pure stands of allorhizous and homorhizous forage crops and a control treatment without forage plants were grown for two years. Subsequently, the cash crops spring wheat and winter rye were cultivated. At the alluvial loam site Wiesengut in Hennef (Sieg), two years of field trials were carried out with cover crop pure stands and mixtures. The mixtures were composed of allorhizous and homorhizous rooted cover crop species. Spring wheat was cultivated as the subsequent crop. In a third trial, also at the Wiesengut, the meliorative effect of taprooted crops was investigated in a compacted headland. For this purpose, different treatments of cover and forage crops were cultivated; subsequently the yield and rooting of the subsequent crops spring wheat and winter rye were analysed.

The profile wall method and the monolith method were used to record root traits. The biopore density was recorded using photography and digital image analysis. Fourier transform infrared spectroscopy was used to separate the root mass into the species of the mixtures. Measurements with a penetrometer were used to determine the penetration resistance. Soil cylinders were taken to analyse the soil physical parameters. Modelling was carried out with SIMPLACE to quantify nitrogen dynamics in cover cropping, with HYDRUS-1D for the soil water balance and with HUMOD for the humus balance.

In the forage crop trial at Oberfeld, lucerne and the lucerne-tall fescue-mixture reached the highest shoot and root dry masses. Lucerne achieved intensive rooting of the subsoil, while grasses achieved intensive rooting of the topsoil. In addition, lucerne showed the highest potential for increasing biopore density.

In the cover cropping trial at the Wiesengut, screening with the profile wall method showed different root types. Mixture effects for shoot and root dry mass of the intercrop mixtures were low or non-existent. On the other hand, there were high mixture effects for rooting intensity in the subsoil, especially in mixtures with oil radish. Winter-hardy cover crops showed low nitrogen losses over winter and low C/N ratios. The differences in the grain yields of the subsequent spring wheat were small, with the highest yields after leguminous cover crops.

In the headland trial at the Wiesengut, the cultivation of taprooted forage crops, especially chicory, showed a higher biopore generating potential in the compacted subsoil compared to cover crops. However, no significant yield advantage in the subsequent cereal cash crops after these plants could be determined so far. Chicory and the chicory-tall fescue-mixture showed tendencies to loosen the soil and increase air capacity.

The modelling showed that legumes and their mixtures contributed positively to the humus balance, whereby the humus formation by forage crops was higher than by cover crops.

Overall, the results of the entire project are an important step towards a deeper understanding of dynamics in crop mixtures and root-soil interactions.

1 Einführung

1.1 Gegenstand des Vorhabens

Primäres Ziel des Projektes ist die Schließung von Ertragslücken und Erhöhung der Ertragsstabilität im ökologischen Ackerbau durch Optimierung der Mobilisierung von Nährstoffen aus der Festphase des Bodens sowie von bisher nicht vollständig genutzten Wasserreserven im Unterboden. Grundlage dafür ist die Ausbildung ausgedehnter Wurzelsysteme mit hohem Feinwurzelanteil. Solche Wurzelsysteme werden durch eine für die Bodenmikrobiologie und das Wurzelwachstum günstige Bodenstruktur gefördert. Im geplanten Projekt werden spezifische Zwischen- und Vorfrüchte angebaut, die

(i) mit homorhizen Wurzelsystemen Feinporen in geringen Bodentiefen vermehren oder

(ii) mit Pfahlwurzeln Zugangswege in den Unterboden schaffen oder

(iii) im Zuge des Mischfruchtanbaus die Wirkungen beider Wurzelsysteme integrieren.

Durch diese Optimierung der Unterbodenstruktur sollen die mikrobielle Aktivität sowie das Tiefenwachstum und die Ausdehnung der Nachfruchtplanzenwurzeln im Unterboden vergrößert werden. So können Nachfrüchte die Nährstoffvorräte des Unterbodens besser erschließen, bspw. in Tonmineralen gebundenes K und in Bioporen angereichertes N und pflanzenverfügbares P. Der Anschluss an Wasserreserven des Unterbodens wird erleichtert, d.h. die Toleranz gegenüber Trockenheit gesteigert. In Vor- und Zwischenfruchtgemengen werden neben Bodenstruktureffekten die unterschiedlichen Abbaugeschwindigkeiten der Wurzeln der Gemengepartner berücksichtigt, mit dem Ziel einer möglichst gleichmäßigen Nährstoffanlieferung für die Nachfrüchte.

Die im Projekt verfolgten **Teilziele** umfassen:

- Förderung von Wurzelwachstum und Nährstoffakquisition der Nachfrüchte durch strukturbildende Effekte mehrjährigen Feldfutterbaus mit Mischanbau von Arten mit ausgeprägter Pfahlwurzel und Arten mit intensiven Feinwurzelssystemen (WP 1).
- Identifizierung von Zwischenfrüchten, die durch Kombination tiefwurzelnder allorhizer Arten und intensiv wurzelnder homorhizer Arten Stickstoffverluste über Winter minimieren, diese Nährstoffe möglichst gleichmäßig über die Vegetationsperiode der Nachfrüchte hinweg freisetzen und das Wurzelwachstum der Nachfrüchte wie oben beschrieben fördern (WP 2).
- Nutzung intensiv wurzelnder Vor- und Zwischenfrüchte zum Aufbrechen von ertragslimitierenden Verdichtungen in Vorgewenden (WP 3).
- Modellierung der Effekte von Futterpflanzen und Zwischenfrüchten auf Wasserhaushaltskomponenten, Wasser- und Nährstoffaufnahme, Ertrag und Humus (AP4).

1.2 Ziele und Aufgabenstellung des Projekts, Bezug des Vorhabens zu den einschlägigen Zielen des BÖLN oder zu konkreten Bekanntmachungen und Ausschreibungen

Das Forschungsvorhaben steht gemäß den in der Verordnung (EG) Nr. 834/2007 festgelegten Grundsätzen des ökologischen Landbaus im Kontext der Verbesserung und Weiterentwicklung der Fruchtfolgen mit dem Ziel der Steigerung des mikrobiellen Umsatzes sowie Mehrung der Bodenfruchtbarkeit durch vermehrte Zufuhr von Sauerstoff und organischem Material in den Unterboden. Als langfristig wirksame Maßnahme zur Verbesserung der ressourcenschonenden Nährstoffversorgung der Kulturpflanzen wird angestrebt, praxistaugliche Artengemenge gezielt in Hinblick auf pflanzenbaulich günstige Beeinflussung der Bodenstruktur zu verbessern. Übergeordnetes Ziel ist die Entwicklung stabiler Agrarökosysteme im Sinne nachhaltiger Sicherung des Ertrags durch Optimierung des innerbetrieblichen Nährstoffmanagements. Durch verbesserte Ausschöpfung bisher nicht optimal genutzter Wasser- und Nährstoffreserven im Unterboden können Nährstoffabfuhr über den Verkauf pflanzlicher Erzeugnisse nicht nur durch eine vermehrte Nährstoffzufuhr von außen, sondern auch durch bessere Ausnutzung der Standortressourcen ausgeglichen werden. Insbesondere soll die Versorgung der Pflanzen bei minimierter Verwendung außerbetrieblicher Produktionsmittel über das Ökosystem des Bodens gefördert werden.

Das übergeordnete Ziel des Projektes ist es, durch pflanzenbauliche Beeinflussungen der Bodenstruktur positive Auswirkungen auf Nährstoffaufnahme und Ertrag von Kulturpflanzen zu ermöglichen. Dabei soll der Anbau von Futterpflanzen mit intensiver Durchwurzelung des oberen Unterbodens mit tiefwurzelnden Pfahlwurzelpflanzen kombiniert werden. Kombinationen von Zwischenfrüchten mit kontrastierenden Wurzelsystemen sollen getestet werden. Ein verdichtetes Vorgewende soll durch Anbau von Pflanzen mit einem geeigneten Wurzelsystem melioriert werden.

Die Bestimmung der relativen Wurzelanteile der Gemengepartner mit Fourier-Transform-Infrarot Spektroskopie im Zwischenfrucht- und Futterpflanzenversuch soll durchgeführt werden. Diese Daten vervollständigen das sich ergebende Bild des Wurzelwachstums. Für das Wurzelwachstum wird neben der Wurzellängendichte die Wurzelmasse und der Wurzeldurchmesser bestimmt. Nur durch die Arttrennung mit Hilfe der Fourier-Transform-Infrarot Spektroskopie können die Gemenge genauer untersucht werden.

1.3 Planung und Ablauf des Projektes

1.3.1 Arbeitspaket 1: Mehrjähriger Feldfutterbau – Futterpflanzenkombinationen mit maximierter Durchwurzelung des Ober- und Unterbodens (Hofgut Oberfeld bei Darmstadt)

Die Wirkung verschiedener Futterpflanzen und ihrer Kombinationen wurde in einem Feldversuch auf dem Hofgut Oberfeld bei Darmstadt auf einem nährstoffarmen sandigen Boden im Frühjahr 2019 eingerichtet.

Folgende Varianten wurden untersucht:

1. Luzerne
2. Wegwarte
3. Rohrschwengel
4. Luzerne + Rohrschwengel
5. Wegwarte + Rohrschwengel
6. Rotklee gras
7. Getreidefruchtfolge (Kontrolle)

Die Vorfrüchte wurden zwei- bis dreimal im Jahr geschnitten, der Aufwuchs wurde abgefahren, um eine Nutzung als Futter bzw. als Gründüngung auf Nachbarflächen zu simulieren. Als Nachfrucht wurde im ersten Jahr Sommerweizen, im darauffolgenden Jahr Winterroggen als zweite Nachfrucht angebaut.

Folgenden Parameter wurden erhoben:

- Bodenstruktur
 - Dichte großlumiger Bioporen
 - physikalische Kenngrößen für Luft- und Wasserhaushalt
 - Eindringwiderstand
 - Bodenfeuchte
- Nährstoffmobilisierung
 - mineralischer Bodenstickstoff
- Wurzelwachstum
 - Wurzellängendichten der Vorfrüchte (Profilwandmethode)
 - Wurzellängendichten der Vorfrüchte (Monolithmethode)
 - Wurzelmasse der Vorfrüchte (Monolithmethode)
 - Wurzellängendichten der Nachfrüchte (Profilwandmethode)
 - relativer Wurzelanteil der Gemengepartner mit Fourier-Transform-Infrarot Spektroskopie
- Sprosswachstum
 - Biomasse der Futterpflanzen zwei- bis dreimal jährlich
 - Erträge der Nachfrüchte
 - N-, P- und K-Aufnahme
 - Blattflächenindex der Nachfrüchte

1.3.2 Arbeitspaket 2: Zwischenfruchtoptionen zur pflanzenbaulichen Optimierung der Bodenstruktur (Lehr- und Versuchsstation für Organischen Landbau ‚Wiesengut‘)

Folgende Reinsaaten und Mischungen von Zwischenfrüchten wurden angebaut:

1. Ölrettich
2. Ölrettich „deeptill“ (nur 2018)
3. Phacelia
4. Blaue Lupine
5. Grünroggen
6. Sandhafer
7. Inkarnatklée
8. Ölrettich + Grünroggen (50:50)
9. Lupine + Grünroggen (50:50)
10. Lupine + Grünroggen (75:25, nur 2019)
11. Ölrettich + Inkarnatklée + Grünroggen (33:33:33)
12. Kommerzielle Mischung (DSV „RigoITR“, nur 2018)
13. Schwarzbrache (Kontrolle)

Die Wurzellängendichte und Wurzelmasse, die Sprossmassebildung und die Wurzelanteile der Gemengepartner der Zwischenfrüchte wurden, wie in Arbeitspaket 1, bestimmt. Darüber hinaus wurden parallel zu den Wurzeluntersuchungen der Gehalt an mineralischem Bodenstickstoff sowie Bodenstrukturparameter (Gesamtporenvolumen und Dichte großlumiger Bioporen) sowie Wassergehalt und Eindringwiderstand erhoben, wie in Arbeitspaket 1. Zusätzlich wurden von den Zwischenfruchtwurzeln C/N-Verhältnis und Lignin-Gehalt untersucht. Als Nachfrucht wurde einheitlich ein Sommerweizen angebaut. Korn- und Strohertrag sowie Ertragsstrukturparameter der Nachfrüchte wurden quantifiziert.

Die zu untersuchenden Pflanzen des Zwischenfruchtversuches (AP2) wurden am Wiesengut (Lehr- und Versuchsstation für Organischen Landbau, Hennef) angebaut, geerntet und nach ersten Analysen zur weiteren Analyse zum Institut für Pflanzenbau der Universität Göttingen gesendet. Die Vermahlung der Wurzelproben sowie die Messung der Wurzeln am FTIR-Spektrometer stand in den Jahren 2019 bis 2021 an. Die Auswertung der FTIR-Spektrometer-Analyse der Wurzeln erfolgte direkt im Anschluss.

1.3.3 Arbeitspaket 3: Anbauoptionen zur Minderung von Bodenverdichtungen im Vorgewende (Lehr- und Versuchsstation für Organischen Landbau ‚Wiesengut‘)

Das Experiment begann mit einer gezielten Untersuchung des Potenzials verschiedener Vor- und Zwischenfrüchte mit Pfahlwurzelsystemen, um verdichtete Bodenschichten zu durchdringen. Hierfür wurden PVC-Rohre mit einem Durchmesser von 20 cm Durchmesser und 70 cm Länge mit Unterboden befüllt und von oben stark verdichtet, so dass eine verdichtete Schicht entsteht. Auf die so vorbereiteten Säulen wurden Oberbodenstücke (20 cm Durchmesser, 45 cm Tiefe) aufgesetzt und die Vorfrüchte Luzerne und Wegwarte sowie die Zwischenfruchtarten Ölrettich, Tiefenrettich, Phacelia und Lupine wurden in vier Wiederholungen eingesät und im beheizten Gewächshaus unter Schnittnutzung kultiviert. Die Wurzellängendichten, -massen, und -durchmesser in den Unterbodensäulen in 5 cm-Tiefenstufen wurden mittels Auswaschen der Wurzeln und WinRhizo bzw. durch Trocknen und Wiegen der Wurzeln bestimmt.

Basierend auf diesen Ergebnissen wurden geeignete Vor- und Zwischenfrüchte (Ölrettich, Tiefenrettich, Wegwarte) für den Feldversuch ausgewählt. Die Vorfrüchte wurden im Frühjahr 2019 nach Staturerhebung von Eindringwiderständen in Vorgewendeflächen als Futterpflanze in Hauptfruchtstellung auf dem Wiesengut eingesät. Zusätzlich zu den Futterpflanzen wurden auch Hauptfrüchte (Sommerhafer, Winterackerbohne) in den Jahren 2019 und 2020 bestellt. Während der Vegetationsperiode 2019 und 2020 wurden die Futterpflanzen zwei- bis dreimal unter Bestimmung von Sprossbiomasse und Nährstoffgehalten im Spross geschnitten und abgefahren. Im Sommer 2020 wurden die ausgewählten Zwischenfrüchte nach den Hauptfrüchten im Versuch eingesät. Im Herbst 2020 wurden Wurzellängendichten, -durchmesser und -masse in ausgewählten Bodentiefen (Hauptverdichtungszone) an der Profilwand und mittels entnommener Wurzelproben bestimmt. Im Frühjahr 2021 wurde Sommerweizen als erste Nachfrucht eingesät, im Herbst 2021 folgte Winterroggen als zweite Nachfrucht. Von den Nachfrüchten wurde die Wurzellängendichte mittels Profilwandmethode sowie die Ertragsparameter bestimmt. Im Frühjahr 2022 wurde die Bioporendichte und das Gesamtporenvolumen erhoben.

1.3.4 Arbeitspaket 4: Modellierung der Effekte von Futterpflanzen und Zwischenfrüchten auf Wasserhaushaltskomponenten, Wasser- und Nährstoffaufnahme, Ertrag und Humus

Die in Arbeitspaket 1 und 2 erhobenen Daten wurden für verschiedene Modellierungen genutzt. Mit dem Modell HYDRUS-1D wurden die Effekte der induzierten Bodenstrukturveränderungen auf die Wasserhaushaltskomponenten Infiltration, Bodenwasserspeicher, Evapotranspiration und Sickerwasser im Boden modelliert.

Der Einfluss der Zwischenfruchtvarianten aus Arbeitspaket 2 sowie der Vorfrüchte aus Arbeitspaket 1 auf die organische Bodensubstanz (OBS bzw. C_{org}) wurde auf Grundlage der erhobenen Daten zu Wurzelmassen, Bodenstruktur und Nährstoffdynamik mit HUMOD modelliert. Eine direkte Erfassung der OBS war aufgrund der kurzen Versuchslaufzeit nicht sinnvoll.

Schließlich wurden die Daten aus dem Arbeitspaket 1 und 2 dazu genutzt, Effekte der Bodenstruktur auf Wurzel- und Sprosswachstum der Nachfrüchte mit dem Modell SIMPLACE (1D, operiert auf der Feldskala) zu modellieren. Der Fokus lag dabei insbesondere auf der Stickstoffdynamik im Boden und der Stickstoffaufnahme der Zwischenfrüchte und der Hauptfrüchte. Die Ergebnisse der HYDRUS-Modellierung gingen als Eingangsparameter in die Modellierung von Spross- und Wurzelwachstum sowie Ertrag in SIMPLACE ein. Ebenso gingen die mit HUMOD modellierten C_{org} -Gehalte als Eingangsparameter in die Modellierung von Spross- und Wurzelwachstum sowie Ertrag mit SIMPLACE ein.

2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

2.1 Beeinflussung der Bodenstruktur durch Pflanzenwurzeln

Pflanzenwurzeln üben während des Dickenwachstums radialen Druck auf den Boden aus, was zur Bewegung und Neuorientierung fester Bodenpartikel führt (Dexter, 2004). Durch Kompaktierung des Bodens in unmittelbarer Umgebung der Wurzeln und die Ausscheidung von Schleimstoffen bleiben die so geschaffenen Hohlräume auch nach dem Absterben der Wurzel stabil (Jones et al., 2004). Die Persistenz der Poren steigt mit zunehmendem Durchmesser (Logsdon and Linden, 1992). Somit generieren dikotyle Pflanzen, die einen vergleichsweise hohen Anteil dicker Wurzeln aufweisen i.d.R. mehr stabile Bioporen als Gräser (Materchera et al., 1993). Insbesondere perennierende Pflanzen mit Pfahlwurzelssystemen fördern stabile, kontinuierliche Porensysteme (Benjamin et al., 2007), auch in verdichteten Vorgewenden (Kautz et al., 2010). Eigene Anbauvergleiche mit perennierenden Futterpflanzen auf einem tiefgründigen Lössstandort (Campus Klein-Altendorf, Universität Bonn) zeigten, dass Wegwarte (*Cichorium intybus*) und Luzerne (*Medicago sativa*) mit tiefen Pfahlwurzelssystemen signifikant mehr große Bioporen (>2 mm Durchmesser) im Unterboden hinterließen als Rohrschwengel (*Festuca arundinacea*) mit einem vergleichsweise flachen, aber intensiven homorhizen Wurzelsystem (Han et al., 2015a). Demgegenüber zeigte sich, dass der Anbau des Rohrschwengels Luftkapazität und Gesamtporenvolumen in geringen Bodentiefen erhöhte (Perkons et al., 2014). Auch auf Sandböden ist die Ausbildung stabiler Unterbodenstrukturen möglich: In Dauerversuchen in Berlin-Dahlem resultierten langjährige Kalkung sowie Vermeidung von Hackfrüchten in der Fruchtfolge in erhöhten Regenwurmpopulationen und Bioporendichten (eigene Untersuchungen, unveröffentlicht).

2.2 Effekte der Bodenstruktur auf Wurzelwachstum

Der mechanische Penetrationswiderstand des Bodens ist ein limitierender Faktor für das Wurzelwachstum: Bereits bei einem Eindringwiderstand von 2 MPa kann die Wurzelelongation um mehr als die Hälfte reduziert werden (Bengough et al., 2011). Insbesondere unterhalb des Bearbeitungshorizonts ist somit das Wurzelwachstum eingeschränkt. Aus diesem Grunde werden auch kleine Hohlräume im Boden von Pflanzenwurzeln besiedelt (White and Kirkegaard, 2010). Von besonderer Bedeutung im Unterboden sind großlumige, kontinuierliche Bioporen, die für Wurzeln präferierte Ausbreitungswege in tiefere Bodenschichten darstellen, vor allem, weil sie geringen mechanischen Widerstand aufweisen (Stewart et al., 1999). Eigene Untersuchungen in Feldversuchen zeigten, dass die räumliche Ausdehnung von Getreide-Wurzelsystemen über den Anbau von Vorfrüchten, welche die Bodenstruktur prägen, gesteuert werden kann: Nach Anbau von flach wurzelndem Rohrschwengel bildete Wintergerste bis in den oberen Teil des Unterbodens größere Wurzellängendichten aus, wohingegen vorheriger Anbau des Pfahlwurzlers Wegwarte zu größeren Wurzellängendichten im tiefen Unterboden führte (Perkons et al., 2014). In Böden mit erhöhter Dichte großlumiger Bioporen bildeten Getreidewurzeln zudem bereits in frühen Phasen der Pflanzenentwicklung (vor der Blüte) größere Wurzellängendichten im Unterboden aus (Han et al., 2015b). Das Ausmaß dieses Effektes ist von den Standortbedingungen abhängig: Die Förderung der Wurzelelongation durch großlumige Bioporen ist besonders stark ausgeprägt, wenn die Lagerungsdichte des Bodens hoch ist (Gaiser et al., 2013).

2.3 Auswirkungen auf das Nährstoffmanagement

Die Ausbildung großer Wurzellängendichten in geringen Bodentiefen, wie sie nach Anbau des Rohrschwengels beobachtet wurde, wird als günstig für die P-Akquisition angesehen (Williamson et al.,

2001). P-Konzentrationen nehmen i.d.R. mit zunehmender Bodentiefe stark ab, so dass intensive flache Wurzelsysteme – zumindest bei günstigen Wachstumsverhältnissen – die P-Aufnahme fördern können (Bonser et al., 1996).

Tiefere Wurzelsysteme infolge vorherigen Anbaus von Pflanzen mit Pfahlwurzeln können sich während Trockenperioden günstig auf die Wasserversorgung insbesondere von Sommerungen auswirken (Gaiser et al., 2012) und somit auch die N-Aufnahme und den Kornertrag von Sommergetreide steigern (Kautz et al., 2015). In ähnlicher Weise zeigte sich in eigenen Gefäßversuchen, dass Makroporen im Unterboden insbesondere bei niedrigem Nährstoffangebot im Oberboden und unter trockenen Bedingungen ertragswirksam werden (Dresemann et al., 2018). Die Wandungen von Bioporen weisen zudem erhöhte Konzentrationen von N und pflanzenverfügbarem P sowie erhöhte mikrobielle Aktivität auf; auch wenn sie nicht von Regenwürmern besiedelt sind (Athmann et al., 2017), so dass sie als hot spots der Nährstoffakquisition anzusehen sind. Mögliche negative Auswirkungen des Wurzelwachstums durch solche Poren sind (i) mangelnder Kontakt zwischen Wurzeln und Porenwand, d.h. eingeschränkte Möglichkeit zur Nährstoffaufnahme sowie (ii) Akkumulation von Wurzeln in Poren durch relative Impermeabilität der Porenwand, somit erhöhte Wurzelkonkurrenz (Athmann et al., 2013).

Potenziell können Bioporen als präferenzielle Fließwege das Auswaschungsrisiko von N (Li und Ghodrati, 1994) und gelöstem P (Djodjic et al., 2004) erhöhen, vor allem, wenn hohe Nährstoffkonzentrationen im Boden vorliegen und Starkniederschlagsereignisse auftreten. Demgegenüber steht allerdings das Vermögen tief wurzelnder Pflanzen, die N-Vorräte bis in tiefe Bodenschichten auszus schöpfen und so der N-Auswaschung entgegenzuwirken (Thorup-Kristensen, 2001).

Die hier verfolgten Ziele könnten sich auch auf die C-Dynamik des Unterbodens auswirken: Im Allgemeinen wird Zwischenfrüchten ein vergleichsweise geringes Potenzial zur Steigerung des Gehalts organischer Bodensubstanz zugesprochen (Poeplau und Don, 2015). Der gezielte Anbau von Arten mit hoher Wurzelmasse könnte aber zu einer stärkeren Anreicherung organischer Substanz und damit erhöhter C-Sequestrierung auch im Unterboden führen.

Die wissenschaftlichen Grundlagen für ein fruchtfolgebasiertes Unterbodenmanagement sind gegeben. Aufgrund der komplementären Effekte von Vorfruchtarten mit intensivem homorhizem Wurzelsystem wie dem Rohrschwengel und Pfahlwurzelpflanzen wie Luzerne und Wegwarte zeichnet sich ab, dass die günstigsten Wirkungen auf die Bodenstruktur vermutlich durch Kombination von Pflanzen mit flachen, homorhizen Wurzelsystemen und tiefen Pfahlwurzelsystemen möglich sind. Auf diese Weise werden sowohl die Bedingungen für die Exploration des oberen Teils des Unterbodens verbessert als auch Zugangswege zu größeren Bodentiefen geschaffen, verbunden mit vermutlich größerer Ertragsstabilität. Wichtige Hinderungsgründe für die Implementierung in die Praxis sind jedoch fehlende praxistaugliche, standortangepasste Anbauoptionen insbesondere in Bezug auf Gemengepartner, die pflanzenbaulich positive Wirkungen auf die Bodenstruktur kombinieren und sich in bestehende Fruchtfolgen integrieren lassen. Hier soll das Projekt ansetzen.

2.4 Gemengeanbau zur Nutzung komplementärer Effekte auf Bodenstruktur und Nährstoffanlieferung für die Nachfrucht

Handelsübliche Standard-Kleegrasmischungen für den **mehnjährigen Feldfutterbau** kombinieren homorhize Weidelgräser mit allorhizem Rotklee – allerdings durchwurzeln beide Arten den Unterboden nicht besonders intensiv, so dass nur geringe Effekte auf die Bodenstruktur und folglich auch nur geringe strukturbedingte Effekte auf Wurzelwachstum und Nährstoffakquisition der Nachfrüchte

zu erwarten sind. Im Projekt werden daher mit Luzerne, Wegwarte und Rohrschwengel intensiv wurzelnde Arten kombiniert. Luzerne und Wegwarte zeichnen sich durch besonders tiefe Wurzelsysteme aus und können so vor allem in Trockenjahren stabile Erträge gewährleisten. Beide Kulturarten weisen außerdem einen hohen Futterwert auf. Luzerne übertraf Rot- und Weißklee in Anbauversuchen in Haus Riswick in Rohfaser- und Rohproteingehalten und stellt eine wertvolle Eiweiß- und Strukturergänzung in der Futtermischung dar (Berendonk 2013). Wegwarte zeichnet sich vor allem durch eine hohe Verdaulichkeit der Proteine und hohe Mineralstoffgehalte aus (Sanderson et al. 2003). Mit hoher Ertragsleistung vor allem auch auf trockenen Standorten ist der Wegwarte-Anbau zu Futterzwecken schon seit den 1980er Jahren in Neuseeland, Australien sowie Nord- und Südamerika verbreitet und resultierte im Vergleich zu anderen Futterpflanzen in hoher Tierleistung (Barry 1998). Vor dem Hintergrund des Klimawandels besteht zunehmend Interesse an der Ausweitung des Anbaus von Luzerne und Wegwarte in Deutschland, entsprechende Anbauversuche werden durchgeführt (Streit et al. 2017, Berendonk 2013). Rohrschwengel ist im Vergleich zu anderen Gräsern wie Weidelgras, Wiesenlieschgras und Wiesenschwengel trockenheitsresistenter. Vor dem Hintergrund überregional häufiger auftretender Vorsommertrockenheit bietet sich diese Art als Bestandteil trockenheitsresistenter Grünlandmischungen an und weist nach züchterischer Bearbeitung mittlerweile auch einen akzeptablen Futterwert auf (Kivelitz 2017). Mischbau mit Luzerne (Smith et al. 1991, Berendonk 2013) und Wegwarte (Hume et al. 1995) ist möglich und wird im Projekt geprüft.

Auch für den **Zwischenfruchtanbau** empfehlen sich Arten, die aufgrund ihres Wurzelwachstums ein hohes Potenzial bezüglich der hier verfolgten Strategien erwarten lassen: Ölrettich (*Raphanus sativus*) zeichnet sich durch rasches Tiefenwachstum aus und reduzierte in einer Untersuchung von Thorup-Kristensen (2001) den Nitratgehalt in Tiefen unter 1 m am stärksten. Dem seit kurzem auch in Deutschland angebotenen *Raphanus sativus* „Deeptill“ wird eine noch darüber hinausgehende Wurzeltiefe zugesprochen. Auch Phacelia (*Phacelia tanacetifolia*) durchwurzelte den Boden relativ rasch (Thorup-Kristensen 2001), die Dominanz der Pfahlwurzel ist dabei im Vergleich zum Ölrettich weniger ausgeprägt (Kutschera et al. 2009). Die Leguminose Blaue Lupine (*Lupinus angustifolius*) zeichnet sich ähnlich wie die Luzerne durch großes Tiefenstreben und ein hohes Vermögen zum Aufbrechen verdichteter Bodenschichten aus (Kutschera et al. 2009). Grünroggen (*Secale cereale*) und Sandhafer (*Avena strigosa*) vermögen als homorhize Arten den Oberboden und oberen Unterboden intensiv zu durchwurzeln. Sandhafer ist dabei ein ausgeprägter Flachwurzler, Roggen zeichnet sich im Vergleich zu anderen Getreidearten durch eine sehr hohe Gesamtwurzellänge aus (Kutschera et al. 2009). Neben der Reduktion von Nitrat aus großen Tiefen kann diese Fähigkeit homorhizer Vorfrüchte, Stickstoff im Oberboden zu konzentrieren, Ertragsvorteile für flach wurzelnde Nachfrüchte bieten (Thorup-Kristensen 2006). Inkarnatklee (*Trifolium incarnatum*) mit einem weit verzweigten, aber nicht sehr tiefen Wurzelnetz (Kutschera et al. 2009) wird aufgrund seiner im Vergleich zu anderen Leguminosen sehr raschen Abbaugeschwindigkeit (Döring et al. 2013) einbezogen, vor allem im Hinblick auf einen möglichen Einsatz im Gemenge: Durch die Produktion von Wurzelrückständen mit unterschiedlichen Inhaltsstoffprofilen (C/N-Verhältnis, Ligningehalte) bieten Gemenge die Möglichkeit, Abbauraten im Hinblick auf eine verbesserte Synchronisation zwischen Stickstofffreisetzung der Vorfrucht und Stickstoffbedarf der Nachfrucht zu optimieren (Cuttle 2006, Döring et al. 2013). Die neben den Reinsaaten getesteten Gemenge umfassen daher Mischungen aus Ölrettich und Grünroggen, Lupine und Grünroggen (jeweils eine Art mit intensiver Pfahlwurzel und eine homorhize Art) sowie Ölrettich, Inkarnatklee und Grünroggen (Pfahlwurzel/homorhiz/Art mit rascher Abbaubarkeit). Darüber hinaus wird auch die kommerziell erhältliche, speziell auf intensive Durchwurzelung des Unterbodens hin

optimierte Mischung „RigoITR“ mit „Rettich deeptill“ und neun Gemengepartnern (DSV-Saaten) getestet.

Mit Hilfe der Fourier-Transform-Infrarot Spektroskopie ist eine Bestimmung der relativen Wurzelanteile der Gemengepartner möglich. Dies ist u.a. für Mais und Hühnerhirse, Gerste und Wildhafer, Weizen und Ackerfuchsschwanz, Zuckerrübe und Gänsefuß (Meinen & Rauber 2012, 2015) sowie Hafer und Erbse (Naumann et al. 2010) nachgewiesen. Für die hier verwendeten Arten bzw. Kombinationen sind noch keine Artdifferenzierungen bekannt.

3 Material und Methoden

3.1 Arbeitspaket 1

3.1.1 Versuchsstandort (Meike Oltmanns)

Der Standort, Oberfeld (8°41'41" E 49°53'44" N) liegt 170 m. ü. NN und hat einen mittleren Jahresniederschlag von 692,5 mm und eine mittlere Jahrestemperatur von 10,6°C (langj. Mittel 1991-2020, Quelle DWD 2023). Der Betrieb wird seit über 15 Jahren biologisch-dynamisch bewirtschaftet. Der Boden ist als Pseudogley-Braunerde mit einer sandigen Textur (88,8 % Sand, 6,4 % Schluff und 4,8 % Ton), 0,78 % OBC, 0,06 % TBN, 18,6 mg P₂O₅/100 g Boden, sowie 9,2 mg K₂O/100g Boden in den obersten 30 cm klassifiziert.

Im Mai 2019 wurde eine eigene Wetterstation auf dem Versuchsgelände errichtet, weshalb in Abb. 1 nur die Daten ab Juni 2019 dargestellt sind. Von Juni bis Dezember 2019 war die Niederschlagssumme etwa um die Hälfte niedriger als der langjährige Durchschnitt. Die Vegetationsperiode war im Vergleich zum langjährigen Mittel überdurchschnittlich warm. Erst im Februar und März 2020 gab es höhere Niederschläge als üblich. Das Frühjahr war relativ warm, gefolgt von einem regnerischen Spätsommer (August bis Oktober 2020). Im Jahr 2021 verlief die Vegetationsperiode kühler und von Mai bis Juli fiel mehr Regen als im Durchschnitt der vergangenen Jahre. Der Winter von 2021/2022 war durchschnittlich um 1,5°C zu warm. Während der üblicherweise feuchten Monate März und Mai wurden deutlich niedrigere Niederschlagsmengen im Jahr 2022 im Vergleich zum langjährigen Mittel verzeichnet. Etwa ein Drittel der durchschnittlichen Regenmenge fiel in diesem Zeitraum.

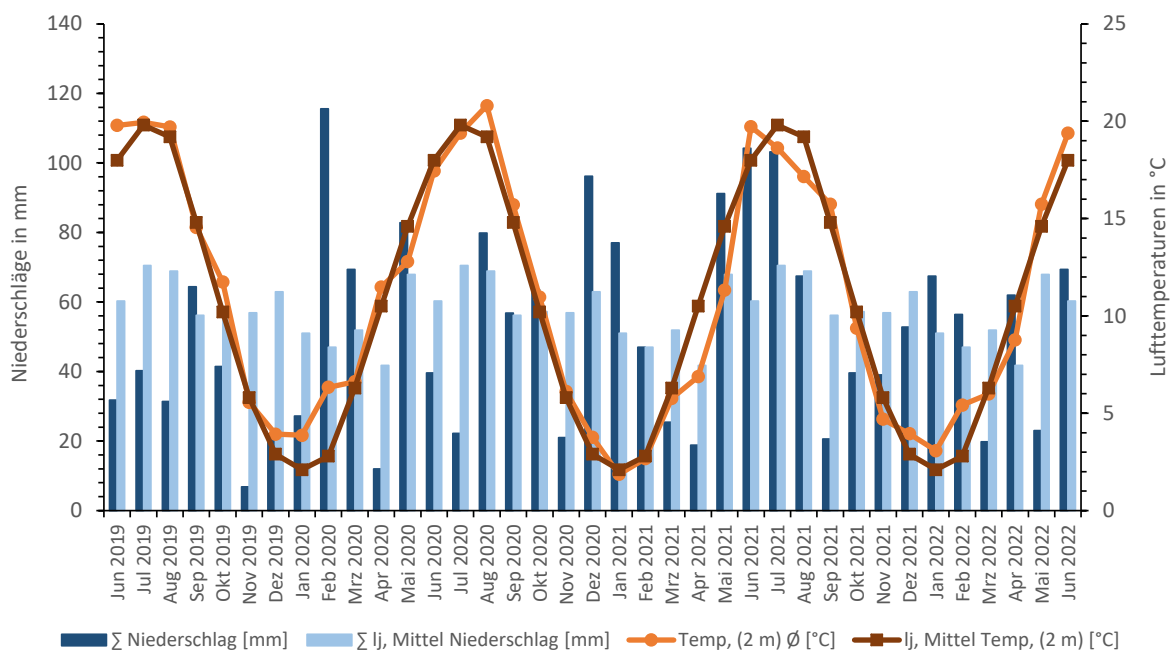


Abb. 1: Niederschlag [mm] und Temperatur [°C] der Versuchsjahre des Versuchsstandortes Oberfeld im Vergleich zum langjährigen Mittel in Darmstadt (1991-2020, DWD Wetterstation: Darmstadt: Geographische Länge: 8,6781 Breite: 49,8808 Höhe über NN: 162 m).

3.1.2 Versuchsanlage (Meike Oltmanns)

Die Anlage des Feldversuches für das AP 1 sollte bereits im Jahr 2018 erfolgen, aufgrund der extremen Trockenheit konnte der Versuch jedoch nicht erfolgreich etabliert werden und musste umgebrochen werden. Von einer Saat im Herbst 2018 musste aufgrund der anhaltenden Trockenheit auch abgesehen werden. Der Feldversuch konnte somit erst im Frühjahr 2019 erfolgreich etabliert werden. Der Versuch wurde gemäß einer randomisierten Blockanlage mit insgesamt 7 Varianten und jeweils 4 Wiederholungen angelegt. Die Parzellengröße war 1,5 m x 10 m. Folgende Varianten wurden in den Jahren 2019 bis 2020 getestet:

1. Luzerne
2. Wegwarte
3. Rohrschwengel
4. Luzerne + Rohrschwengel
5. Wegwarte + Rohrschwengel
6. Rotklee gras
7. Getreidefruchtfolge (Kontrolle)

Die Futterpflanzen-Varianten wurden am 28.03.2019 gesät und in 2019 und 2020 zwei- bis dreimal geschnitten. Mit einer Tröpfchenbewässerung wurde im Jahr 2019 28,5 mm bewässert. Im Jahr 2020 wurden 10,7 mm bewässert. Während der Etablierung der Pflanzen wurde sowohl mechanisch gehackt als auch von Hand gejätet, um das Auftreten von Unkraut zu minimieren, damit die Wurzeln den Futterpflanzen zugeordnet werden können.

Die Futterpflanzen wurden am 22.02.2021 mit einem Trefflergrubber umgebrochen. Die Nachfrucht Sommerweizen wurde mit 100 kg N ha⁻¹ über Rottemist gedüngt. Der Mist wurde mit einer Handfräse eingearbeitet und danach gepflügt und gefräst. Die Saat des Sommerweizens Quintus erfolgte am 09.03.2021, die Ernte am 02.08.2021. Es folgte ein Stoppelumbruch mit der Scheibenegge und dann zwei Wochen später mit dem Pflug. Der Winterroggen Firmament wurde am 29.09.2021 gesät. Die Abb. 2 erläutert die unterschiedlichen Fruchtfolge-Varianten.

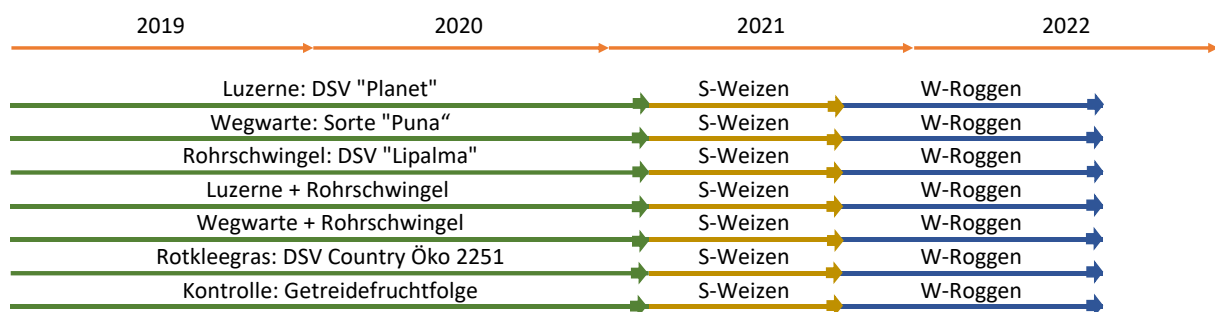


Abb. 2: Die sieben Versuchs-Varianten im mehrjährigen Feldfutterbau und den Nachfrüchten in der Zeitperiode 2019 bis 2022.

3.1.3 Sprossmasse, Nährstoffgehalte, mineralischer Bodenstickstoff, Bodenwassergehalt, Blattflächenindex (Meike Oltmanns, Sofia Hadir, Dr. Sabine Seidel)

In den Futterpflanzen-Varianten erfolgten in 2019 und 2020 zwei bzw. drei Schnitte. Die Sprossbiomasse der Futterpflanzen wurde bei jedem Schnitt auf 1,0 m² pro Parzelle geerntet. Die Biomasse der Futterpflanzenkombinationen wurde separat nach den einzelnen Pflanzenarten sortiert. Die Sprossbiomasse wurde danach bei 60 °C für 24 h und bei 105 °C für weitere 24 h getrocknet. Die Trockenmasseproben wurden mit einer Scheiben-Schwingmühle gemahlen und anschließend auf C-, N-, P- und K-Gehalt analysiert.

Bei den Nachfrüchten Sommerweizen und Winterroggen wurde in beiden Jahren eine Zeiternte zum Schossen und zur Blüte durchgeführt. Dabei wurde nach der Trockenmasseerfassung auf C- und N-Gehalt untersucht. Zur Kornreife wurde der Korn- und Strohertrag sowie die Ertragskomponenten erfasst.

Bodenproben für die Analyse des mineralischen Stickstoffs im Boden (N_{\min}), wurden in den Tiefen 0-30 cm, 30-60 cm und 60-90 cm mit einem Göttinger Bohrstock entnommen. Zu ausgewählten Terminen wurde der volumetrischer Bodenwassergehalt mittels FDR-Sonde bei den Nachfrüchten bestimmt.

Der Blattflächenindex (BFI) je Variante wurden am Standort Oberfeld in 2021 (Sommerweizen) und 2022 (Winterroggen) an jeweils zwei Terminen (Zeiternte 1 und 2) ermittelt. Hierfür wurde der BFI mit einem mobilen Gerät, dem SS1 SunScan (Delta-T Devices Ltd Cambridge, UK), in jeder Parzelle gemessen. Des Weiteren wurde an vier definierten Stellen der BFI gemessen, diese Fläche dann geschnitten und der BFI mit dem destruktiven, aber genaueren Gerät bestimmt (LI-3100C Area Meter, LI-COR Biosciences GmbH, Bad Homburg, Deutschland). Die Korrelation dieser Werte erlaubt eine Umrechnung (Kalibrierung) der im Feld gemessenen etwas ungenaueren BFI Werte.

3.1.4 Wurzelwachstum und Bioporen (Roman Kemper)

Die Wurzellängendichte der Futterpflanzen wurde mit der **Profilwandmethode** (Böhm 1979) im Herbst 2020 erhoben. Mit einem Bagger wurde dazu ein Graben mit einer Tiefe min. 150 cm quer zum kurzen Ende der Parzellen angelegt. Für jede Parzelle wurde eine 1 m breite Profilwand geglättet. Eine 5 mm dicke Bodenschicht wurde entfernt, um die Wurzeln freizulegen. Die Wurzellängen wurden in einem Metallrahmen mit einem Raster von 5 cm × 5 cm gezählt. Die Wurzellängendichte, d.h. die Wurzellänge pro Bodenvolumen, wurde für jedes Quadrat berechnet, indem die Wurzellänge durch 12,5 cm³ dividiert wurde. Darüber hinaus erfolgte neben der manuellen auch eine digitale Erfassung der Wurzellängendichte an der Profilwand. Details dazu finden sich in Han et al., 2021. In 2021 und 2022 wurde die Wurzellängendichte der Nachfrüchte Sommerweizen und Winterroggen ebenfalls mit der Profilwandmethode ermittelt.

An der bereits angelegten Profilwand wurden im September 2020 Bodenmonolithe nach der **Monolith-Methode** nach Böhm (1979) bis zu einer Bodentiefe von 150 cm entnommen. Die Entnahme der Monolithe erfolgte in 10 cm Tiefenstufen. Es wurden zwei Monolithe nebeneinander im Oberboden (0-30 cm) und drei Monolithe nebeneinander im Unterboden (30-150 cm) von 10 cm × 10 cm × 12,5 cm entnommen. Die Monolithe wurden in der Mitte der Parzelle genommen, um Randeffekte auszuschließen. Anschließend wurden die Wurzeln aus den Bodenmonolithen gewaschen. Details zur Methodik finden sich in Kemper et al. 2022. Gewaschene Wurzeln wurden mit einem Fotoscanner (Expression 12000XL, Epson, Suwa, Japan) bei 800 dpi gescannt und die Wurzellänge wurde mit der

Software WinRHIZO (Version WinRhizoPro 2019a 64bit, Regent Instruments, Quebec, Kanada) erfasst. Zur Bestimmung der Wurzelrockenmasse wurden die Wurzeln 48 Stunden lang bei 55 °C getrocknet.

Zur **Erfassung der Bioporendichte** wurden 0,25 m² Bodenfläche in 40 cm Tiefe im März 2022 freigelegt. Mit einem Spachtel wurde die Fläche aufgebrochen, loser Boden wurde abgesaugt. Mit einer Kamera (Nikon 7100D, 16 mm Brennweite, Blende 11) wurde die Fläche in einem abgedunkelten Rahmen in 60 cm Höhe fotografiert. Die Fotos wurden mit der Software Bersoft Image Measurement analysiert und Anzahl und Durchmesser der Bioporen wurden erfasst.

3.1.5 Wurzelartentrennung (Dr. Nicole Legner)

Die getrockneten Wurzelproben wurden mit einer ZM 200 Zentrifugalmühle (Retsch) vermahlen. Mit der Fourier-Transform-Infrarot Spektroskopie (Bruker Optics, Ettlingen) mit ATR-Einheit wurden getrocknete Wurzelproben jeweils 5 mal mit 32 Scans bei der Wellenzahl 400-4000 cm⁻¹ gemessen. Die daraus entstandenen Absorptionsspektren werden zur Unterscheidung der Arten verwendet. Die Software Opus (Version 7.2, Bruker Optics) wurde für die Spektrenaufnahme, die Erstellung der Clusteranalyse sowie für die Quantifizierung verwendet. Mit der Clusteranalyse (Softwarepaket Ident, Opus) kann berechnet werden, ob eine Artunterscheidung möglich ist. Für die Quantifizierung der Arten wird das Softwarepaket Quant2 von Opus verwendet.

3.1.6 Eindringwiderstand und Bodenwassergehalt (Dr. Oliver Schmittmann)

Zur Bestimmung der Bodendichtlagerung wird grundsätzlich die Stechzylindermethode als klassisches Verfahren empfohlen. Am Institut für Landtechnik (ILT) der Uni Bonn wurde ein Penetrometer mit einem ASABE-Normkonus entwickelt, mit dem sowohl der Eindringwiderstand als auch die volumetrische Bodenfeuchte mit einer Tiefenauflösung von 1 cm bestimmt werden kann. Details zum Penetrometer und der Wassermessung wurden unter Schmittmann et al. (2023) und Sun et al. (2006) veröffentlicht.

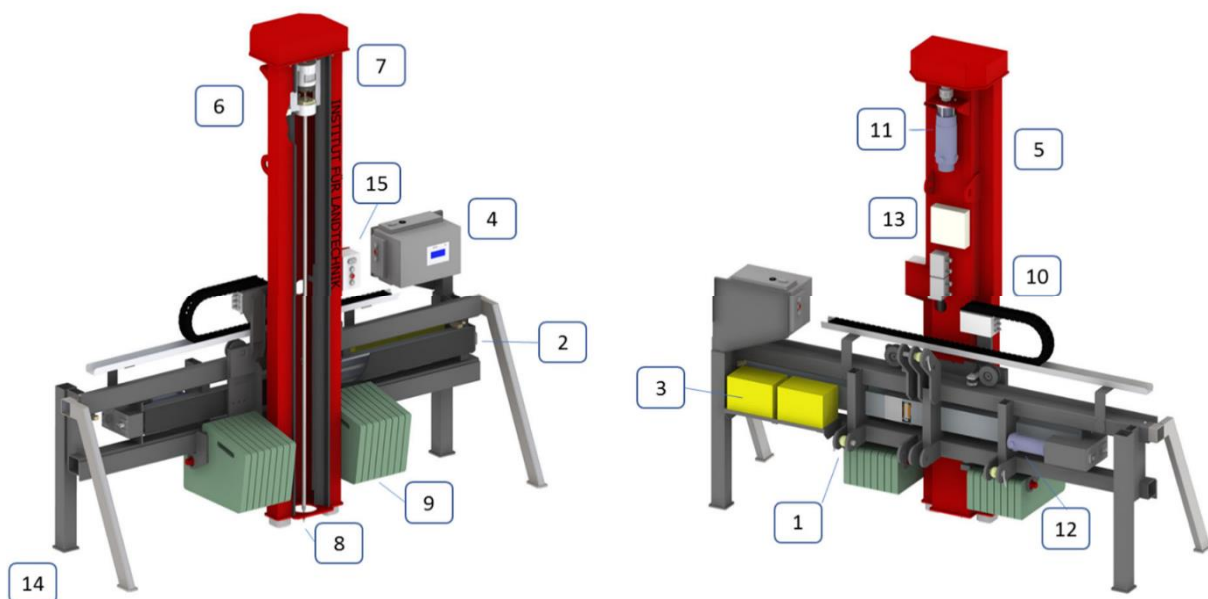


Abb. 3: Patentiertes Unterbodenpenetrometer; Schematische Darstellung in Vorder- und Rückansicht. 1. Traktor 3-Punkt-Anbau, 2. Querverstellung (2 m) mit Kugelgewindetrieb, 3. Stromversorgung, 4. Führungsschienen für Penetrometer, 2 m Abwärtshub, 6. Penetrometerstab mit Kugelumlaufspindel und Schlitten, 7. Wägezelle für Rohre, 8. Penetrometerspitze, 9. Gegenwaage (16 × 40 kg), 10. Verstärker, 11. für die Penetrometerstange, 12. elektrischer Antrieb für die Turmbewegung, 13. Antriebsregler, 14. Abstellstützen, 15. Bedienfeld, (nach Schmittmann et al., 2023).

Um den Bewuchs der Testparzellen nicht zu beeinflussen, wurde mit einem Schlepper rückwärts an den Bestand herangefahren. Das Penetrometer wurde abgesetzt und jeweils 10 Messungen parallel versetzt zueinander wurden durchgeführt. Fehlmessungen, beispielsweise durch Steine im Boden, wurden nach einer Sichtkontrolle eliminiert. Für die jeweiligen Tiefenstufen wurden Mittelwerte und Standardabweichungen des Eindringwiderstandes und des Wassergehaltes errechnet. Bei den Wassermessungen wurde zusätzlich die Differenz zwischen zwei Messterminen berechnet.

Zur Bestimmung signifikanter Unterschiede zwischen den Varianten bzw. Differenzen eines Messtermins und einer Tiefenstufe wurde der Scheffé-Test herangezogen (Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$). In den Darstellungen wurden sich unterscheidende homogene Untergruppen – wenn vorhanden – mit Buchstaben gekennzeichnet.

Die maximale Eindringtiefe des Penetrometers beträgt 2 m. Der Messkonus entspricht der ASABE-Norm und stellt somit die Vergleichbarkeit mit Standardpenetrometern sicher. Die tatsächliche Eindringtiefe hängt von der Beschaffenheit des Bodens, wie Dichtlagerung und Steinbesatz, ab und wird individuell festgelegt.

Im Arbeitspaket 1 wurden die Messungen im April und Oktober 2021 durchgeführt.

3.1.7 Bodenphysik (Dr. Marc-Oliver Göbel und Prof. Dr. Stephan Peth)

Im Rahmen des Arbeitspaketes 1 wurde auf dem Hofgut Oberfeld im März 2022 eine Probenahmekampagne durchgeführt, bei der für die 7 Anbauvarianten und 4 Feldwiederholungen in 3 Tiefen (15, 40, 60 cm) jeweils 4 ungestörte Bodenproben (100 cm³ Stechzylinder) entnommen wurden (insgesamt 336 Proben). An den Proben wurden die Korngrößenverteilung, die gesättigte Wasserleitfähigkeit, die Wasserretentionskurve (pF-Kurve) sowie weitere wichtige Kenngrößen des Luft- und Wasserhaushalts bestimmt. Leider konnten bis zum Zeitpunkt der Berichtserstellung die Wasserretentionsanalysen aufgrund technischer Probleme (siehe 7.4) nicht an allen Proben vollständig durchgeführt werden, so dass ein abschließender Vergleich zwischen den Varianten hinsichtlich ihres Wasserretentionsverhaltens (pF-Kurve und nutzbare Feldkapazität) für den Standort Oberfeld bisher noch nicht möglich war.

Die Korngrößenverteilung des Feinbodens (< 2 mm) wurde mittels kombinierter Sieb- und Sedimentationsmethode bestimmt (Hartge und Horn, 2009). Hierfür wurden 10 g Boden in 25 mL deionisiertem Wasser und 25 mL H₂O₂-Lösung (32%) suspendiert und für ca. 6 h in ein Wasserbad (90 °C) gestellt. Den abgekühlten Proben wurden 10 mL Dispergierungsmittel (0,05 M Na₄P₂O₇) hinzupipettiert und auf ein Gesamtvolumen von 200 mL mit deionisiertem Wasser aufgefüllt. Anschließend wurden die Proben für ca. 2 Stunden im Überkopfschüttler geschüttelt. Zur Gewinnung der Sandfraktionen (2000–630, 630–200, 200–63 µm) wurde die Suspension vollständig auf einen Siebsatz überspült und die gewonnenen Fraktionen im Trockenschrank bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Die Gewinnung der Schluff- und Tonfraktionen aus der restlichen Suspension erfolgte durch Entnahme von Teilproben nach einer korngrößenspezifischen und

temperaturabhängigen Sedimentationszeit und anschließender Trocknung bei 105 °C. Die Berechnung der Korngrößenanteile erfolgte nach Korrektur für den initialen Wassergehalt und den Gehalt an organischer Substanz (Vario ISOTOPE cube, Elementar Analysensysteme GmbH, Langenselbold, Deutschland).

Die Bestimmung der gesättigten Wasserleitfähigkeit erfolgte mittels Hauben-Permeameter (Eijkelkamp, Giesbeek, Niederlande) auf Basis der *falling head* Methode (Hartge und Horn, 2009). Dafür wurden die Stechzylinderproben langsam mit Leitungswasser von unten aufgesättigt und anschließend vorsichtig mit Wasser überstaut. Auf Basis des perkolierenden Wasservolumens pro Fließzeit wurde die hydraulische Leitfähigkeit (k_f -Wert) mit Hilfe der modifizierten Darcy-Gleichung berechnet, wobei pro Probe jeweils 3 Einzelmessungen durchgeführt wurden.

Zur Bestimmung der Wasserretentionskurve wurden die Stechzylinderproben zunächst mit Leitungswasser aufgesättigt und danach sequentiell bei ansteigenden Unterdruckstufen im Sandbad (-10, -30 hPa) und auf Keramikplatten (-60, -150, -300, -500 hPa) bis zur Gleichgewichtseinstellung entwässert und gewogen. Nach anschließender Trocknung bei 105 °C erfolgte die Bestimmung der Trockenmasse, die für die Berechnung der gravimetrischen Wassergehalte und der Lagerungsdichte (δB) verwendet wurde. Mittels Lagerungsdichte wurden die gravimetrischen Wassergehalte in volumetrische Wassergehalte (WG_{vol}) umgerechnet. Zur Bestimmung der Wassergehalte bei pF 4,2 wurden die Proben im Drucktopf bei 15850 hPa bis zur Gewichtskonstanz entwässert, gewogen und anschließend das Trockengewicht nach Trocknung bei 105 °C bestimmt. Unter Annahme einer Festsubstanzdichte von 2,65 g/cm³ wurde das Gesamtporenvolumen (GPV) aus der Lagerungsdichte berechnet: $GPV = 1 - (\delta B / 2,65) \cdot 100$. Die Luftkapazität (LK) und die nutzbare Feldkapazität (nFK) wurden mit Hilfe des Gesamtporenvolumens und der volumetrischen Wassergehalte bei pF 1,78 (-60 hPa) und pF 4,2 (-15850 hPa) wie folgt berechnet: $LK = GPV - WG_{vol}@pF_{1,78}$; $nFK = WG_{vol}@pF_{1,78} - WG_{vol}@pF_{4,2}$.

Vor der weiteren Analyse wurden die Messwerte zunächst mittels Q-Q-Plots auf Normalverteilung untersucht und bei Vorliegen einer log-Normalverteilung für die weitere statistische Analyse logarithmiert. Unterschiede zwischen verschiedenen Varianten wurden mittels Tukey-HSD post-hoc Test auf statistische Signifikanz getestet, wobei Unterschiede mit $p < 0,05$ als statistisch signifikant bezeichnet werden. Alle statistischen Analysen wurden mit der Software R (Version 4.2.1; R Core Team, 2022; Paket *multcompView*, Graves et al., 2019) durchgeführt. Bei der Erstellung der Abbildungen kam das R-Paket *ggplot2* (Wickham, 2016) zum Einsatz.

Die Ableitung der van Genuchten-Parameter (θ_s , θ_r , α , n ; siehe 3.4.2) zur Beschreibung der hydraulischen Bodeneigenschaften für die Modellierung, erfolgte durch Anpassung der im Labor bestimmten Wasserretentionsdaten (WG_{vol} vs. pF) an das van Genuchten-Modell (Gleichung 2, siehe 3.4.2; van Genuchten, 1980) mittels Levenberg-Marquardt Verfahren (R 4.2.1; R Core Team, 2022; Paket *minpack.lm*, Elzhov et al., 2023). Bei der Parameterableitung wurden für jede Anbauvariante und Tiefe die Mittelwerte über alle Replikate ($n = 4$) und Feldwiederholungen ($n = 4$) verwendet (d.h. insgesamt $n = 16$).

3.2 Arbeitspaket 2

3.2.1 Versuchsstandort (Roman Kemper)

Die Zwischenfrucht-Versuche wurden auf der Lehr- und Forschungsstation für Ökologischen Landbau Campus Wiesengut der Universität Bonn in Hennef durchgeführt. Das Wiesengut (50°48'N, 7°17'O)

liegt auf einer Höhe von 65 m ü. NN. in der Siegniederung. Der Boden am Standort ist ein Auenlehm mit der Textur schluffiger Lehm auf Kiesschichten mit einer Bodenmächtigkeit von 0,6 bis 2,0 m und schwankendem Grundwasserspiegel. Detaillierte Angaben zu den Bodenparametern sind den Tabellen 1 und 2 zu entnehmen.

Tabelle 1: Bodenparameter der Feldversuchsfläche im Oberboden (0-30 cm Tiefe) in den Jahren 2018/2019 und 2019/2020.

	2018/2019	2019/2020
pH (CaCl ₂)	6,2	6,3
P ₂ O ₅ [mg/100 g]	5	8
K ₂ O [mg/100 g]	21	15
MgO [mg/100 g]	12	10
gesamter organischer Kohlenstoff [%]	1,1	0,75
Gesamt-Stickstoff [%]	0,11	0,10

Tabelle 2: Mineralischer Boden-Stickstoff [kg/ha] zum Zeitpunkt der Aussaat in den Jahren 2018/2019 und 2019/2020.

	2018/2019	2019/2020
0–30 cm	17,1	53,9
30–60 cm	3,2	26,1
60–90 cm	3,4	11,7

Der mittlere Jahresniederschlag am Versuchsstandort beträgt 840 mm bei einer mittleren Temperatur von 10,3 C. Ein Vergleich des Wetters der Versuchsjahre mit dem langjährigen Mittel (1981-2010) an der nahegelegenen Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes am Flughafen Köln-Bonn (Abb. 4A) zeigt einen trockenen Sommer und Herbst im Jahr 2018 (Juli bis November), einen trockenen Sommer im Jahr 2019 (Juni und Juli) und eine Verlagerung der Niederschläge in den Winter (Dezember 2018, Januar 2019, Februar und März 2020). In 21 von 24 Monaten war es in den Versuchsjahren wärmer im Vergleich dem langjährigen Mittel. Die Wetteraufzeichnungen auf dem Versuchsfeld (Abb. 4B) sind vergleichbar mit den Wetterdaten der Wetterstation am Köln Bonn Airport mit trockenen Sommern und feuchten Wintern.

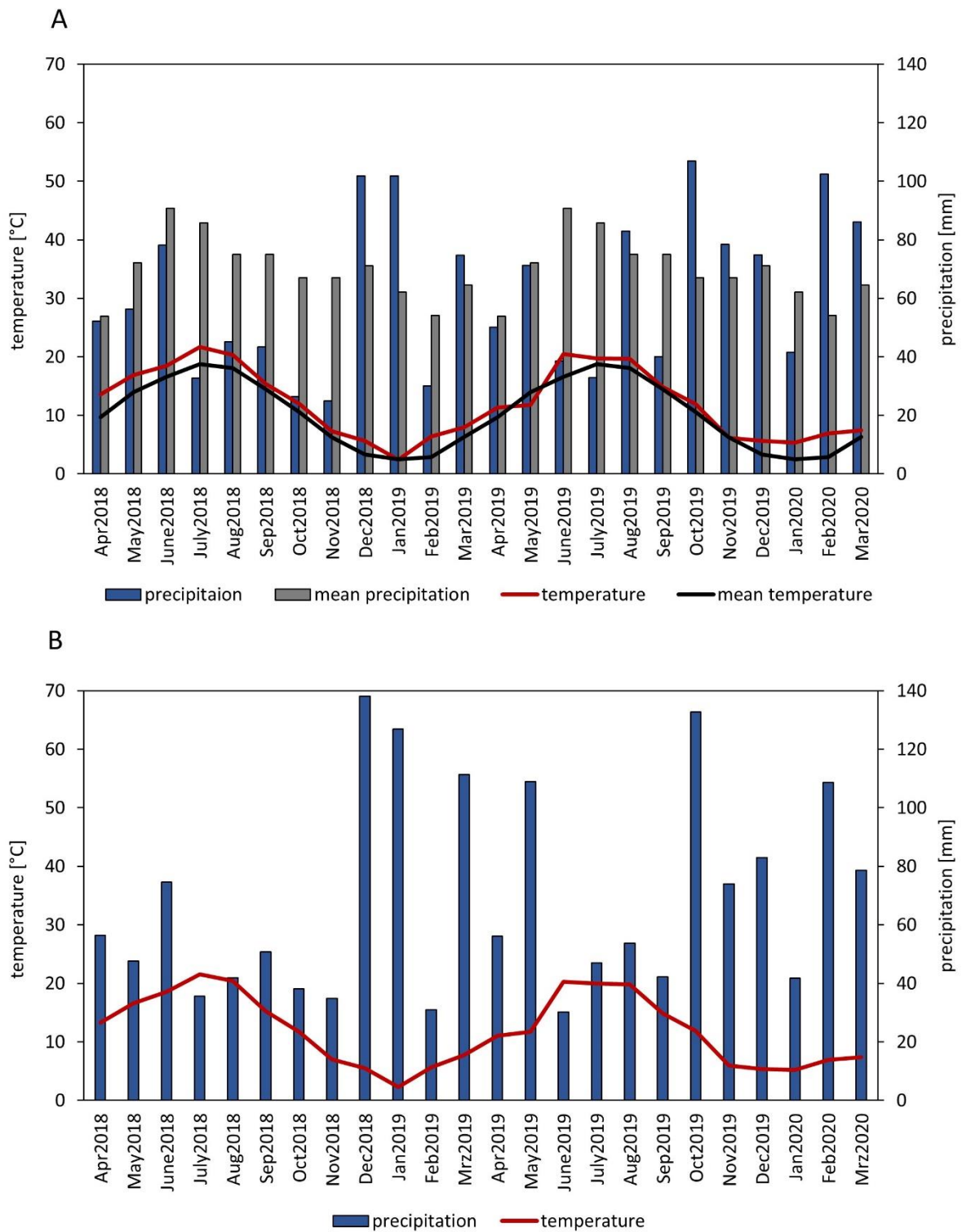


Abb. 4: Niederschlag [mm] und Temperatur [°C] der Versuchsjahre im Vergleich zum langjährigen Mittel (1981-2010) an der nahegelegenen (12 km) Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes am Flughafen Köln/Bonn (A), Niederschlag [mm] und Temperatur [°C] der Versuchsjahre an der Versuchsstation Wiesengut (B).

3.2.2 Versuchsanlage (Roman Kemper)

Die Feldversuche wurden in einem randomisierten vollständigen Blockversuch mit vier Blöcken und einer Parzellengröße von 1,5 m × 12,5 m in 2018/2019 und 1,5 m × 20 m in 2019/2020 durchgeführt. Das Versuchsfeld wechselte von 2018/2019 zu 2019/2020, da der Versuch innerhalb der Fruchtfolge des Versuchsbetriebs rotierte. Drei Blöcke wurden auf Wurzelmerkmale untersucht. Die Zwischenfrüchte wurden am 12. August 2018 und am 14. August 2019 in mit einer Parzellensämaschine mit einem Reihenabstand von 17 cm gesät. Die Zwischenfrucht-Varianten in den beiden Versuchsjahren sind Tabelle 3 zu entnehmen.

Tabelle 3: Versuchsvarianten der beiden Zwischenfrucht-Versuche am Wiesengut

2018/2019	2019/2020
Kontrolle (ohne Zwischenfrucht, unkrautfrei)	Kontrolle (ohne Zwischenfrucht, unkrautfrei)
Phacelia (Sorte Beehappy (DSV) - 12 kg/ha)	Phacelia (Sorte Beehappy (DSV) - 12 kg/ha)
Ölrettich (Sorte Silentina (Petersen) - 25 kg/ha)	Ölrettich (Sorte Silentina (Petersen) - 25 kg/ha)
Ölrettich (Sorte Deeptill (DSV) - 12 kg/ha)	
Winterrübsen (Sorte Jupiter (Petersen) - 15 kg/ha)	Winterrübsen (Sorte Jupiter (Petersen) - 15 kg/ha)
Sandhafer (Sorte Pratex (Petersen) - 80 kg/ha)	Sandhafer (Sorte Pratex (Petersen) - 80 kg/ha)
Grünroggen (Sorte Bonfire (DSV) - 120 kg/ha)	Grünroggen (Sorte Bonfire (DSV) - 120 kg/ha)
Blaue Lupine (Sorte Boruta (Bingenheimer) - 120 kg/ha)	Blaue Lupine (Sorte Boruta (Bingenheimer) - 120 kg/ha)
Inkarnatklée (Sorte Linakarus (DSV) - 30 kg/ha)	Inkarnatklée (Sorte Linakarus (DSV) - 30 kg/ha)
Ölrettich + Grünroggen (12,5 + 60 kg/ha)	Ölrettich + Grünroggen (12,5 + 60 kg/ha)
	Ölrettich + Inkarnatklée (6,25 + 22,5 kg/ha)
Blaue Lupine + Grünroggen (60 + 60 kg/ha)	Blaue Lupine + Grünroggen (60 + 60 kg/ha)
	Blaue Lupine + Grünroggen (90 + 30 kg/ha)
Ölrettich + Inkarnatklée + Grünroggen (8,5+ 10 + 40 kg/ha)	Ölrettich + Inkarnatklée + Grünroggen (8,5+ 10 + 40 kg/ha)
RigoITR (DSV) - 22 kg/ha	

Die Vorfrucht war in beiden Jahren Sommer-Ackerbohne (*Vicia faba* L.). Nach der Ernte der Ackerbohne wurde eine Grundbodenbearbeitung mit dem Pflug mit einer Arbeitstiefe von 23 cm durchgeführt. Im Jahr 2018 wurden alle Parzellen mit 50 mm in einer Anwendung vor der Aussaat und 54 mm in drei Anwendungen nach der Aussaat bewässert; im Jahr 2019 wurden 30 mm in einer Anwendung vor der Aussaat und 12 mm in einer Anwendung nach der Aussaat bewässert. Die Bewässerung erfolgte mit einem Kreisregner. Das Saatbett wurde mit einer Kreiselegge vorbereitet. Während der Etablierung der Pflanzen wurde sowohl mechanisch gehackt als auch von Hand gejätet, um das Auftreten von Unkraut zu minimieren, damit die Wurzeln den Zwischenfruchtarten zugeordnet werden konnten.

3.2.3 Sprossmasse, Nährstoffgehalte, mineralischer Bodenstickstoff (Roman Kemper)

Sprossbiomassen der Zwischenfrüchte wurden in beiden Jahren Mitte November vor dem ersten Frost und vor dem Umbruch im März auf 1,0 m² pro Parzelle geerntet und bei 60 °C für 24 h und bei 105 °C für weitere 24 h getrocknet. Die Trockenmasseproben wurden mit einer Scheiben-Schwingmühle gemahlen und anschließend auf C-, N-, P- und K-Gehalt analysiert.

In der Nachfrucht Sommerweizen wurde in beiden Jahren eine Zeiternte zum Schossen und zur Blüte durchgeführt. Dabei wurde nach Trockenmasseerfassung auf C- und N-Gehalt untersucht. Zur Kornreife wurden der Korn- und Strohertrag sowie die Ertragskomponenten erfasst.

Bodenproben für die Analyse des mineralischen Stickstoffs im Boden (N_{\min}) wurden mit einem Pürckhauer-Bohrer entnommen. Monatlich wurden Proben in der Tiefe 0-30 cm gezogen. Im November, im März und nach der Ernte der Nachfrucht wurden zusätzlich Proben in den Tiefen 30-60 cm und 60-90 cm entnommen. Nach Extraktion mit Kaliumsulfat wurden sowohl Nitrat als auch Ammonium bestimmt.

3.2.4 Wurzelwachstum und Bioporen (Roman Kemper)

Die Wurzellängendichte wurde mit der **Profilwandmethode** (Böhm 1979) vor dem Winter, sowie nach dem Winter erhoben. Mit einem Bagger wurde dazu ein Graben mit einer Tiefe von 120 cm quer zum kurzen Ende der Parzellen angelegt. Für jede Parzelle wurde eine 1 m breite Profilwand geglättet. Eine 5 mm dicke Bodenschicht wurde entfernt, um die Wurzeln freizulegen. Die Wurzellängen wurden in einem Metallrahmen mit einem Raster von 5 cm × 5 cm gezählt. Wurzellängeneinheiten in großen Bioporen >2 mm Durchmesser und im bulk-Boden wurden separat gezählt. Die Wurzellängendichte, d.h. die Wurzellänge pro Bodenvolumen, wurde für jedes Quadrat berechnet, indem die Wurzellänge durch 12,5 cm³ dividiert wurde. Details zur Profilwandmethode findet sich in Kemper et al. (2020).

An der bereits angelegten Profilwand wurden im Oktober 2018 und 2019 Bodenmonolithe nach der **Monolith-Methode** nach Böhm (1979) bis zu einer Bodentiefe von 60 bis 100 cm, je nach Kiesschicht. Die Monolithe wurden 10 cm Tiefenstufen entnommen. Im Jahr 2018 wurden zwei Monolithe nebeneinander von 10 cm × 10 cm × 20 cm und im Jahr 2019 zwei Monolithe nebeneinander im Oberboden (0-30 cm) und drei Monolithe nebeneinander im Unterboden (30-100 cm) von 10 cm × 10 cm × 17 cm entnommen. Die Monolithe wurde in der Mitte der Parzelle entnommen, um Randeffekte auszuschließen. Anschließend wurden die Wurzeln aus den Bodenmonolithen gewaschen. Details zur Methodik finden sich in Kemper et al. (2022). Gewaschene Wurzeln wurden mit einem Fotoscanner (Expression 12000XL, Epson, Suwa, Japan) bei 800 dpi gescannt und die Wurzellänge wurde mit der Software WinRHIZO (Version WinRhizoPro 2019a 64bit, Regent Instruments, Quebec, Kanada) erfasst. Zur Bestimmung der Wurzelrockenmasse wurden die Wurzeln 48 Stunden lang bei 55 °C getrocknet.

Zur **Erfassung der Bioporendichte** wurden 0,25 m² Bodenfläche in 40 cm Tiefe im März 2019 und August 2020 freigelegt. Mit einem Spachtel wurde die Fläche aufgebrochen, loser Boden wurde abgesaugt. Mit einer Kamera (Nikon 7100D, 16 mm Brennweite, Blende 11) wurde die Fläche in einem abgedunkelten Rahmen in 60 cm Höhe fotografiert. Die Fotos wurden mit der Software RootPainter (Smith et al., 2022) analysiert, die Anzahl und Durchmesser der Bioporen erfasst.

3.2.5 Wurzelartentrennung (Dr. Nicole Legner)

Siehe 3.1.5

3.2.6 Eindringwiderstand und Bodenwassergehalt (Dr. Oliver Schmittmann)

Die Bestimmung des Eindringwiderstandes und der Bodenfeuchte im Arbeitspaket 2 entsprach der in 3.1.6 beschriebenen Methode. Folgende Messtermine für den Zwischenfruchtversuch wurden durchgeführt:

- Für den Zwischenfruchtversuch im Jahr 2018/2019 Oktober 2018 und April 2019
- Für den Zwischenfruchtversuch im Jahr 2019/2020 Mai 2020 und Juni 2020
- Die für September 2019 geplante Statuserhebung für den Zwischenfruchtversuch konnte aus technischen Gründen nicht umgesetzt werden.

3.2.7 Bodenphysik (Dr. Marc-Oliver Göbel und Prof. Dr. Stephan Peth)

Im Rahmen des Arbeitspaketes 2 wurden auf dem Wiesengut Ende März 2019 (nach der Zwischenfruchtperiode) und Mitte August 2020 (nach der Weizenernte) Probenahmekampagnen durchgeführt, bei denen für die 13 Anbauvarianten und 4 Feldwiederholungen in 3 Tiefen (15, 40, 60 cm) jeweils 4 ungestörte Stechzylinderproben entnommen wurden. Eine Gesamtprobenzahl von 624 Stechzylindern konnte jedoch nur im Jahr 2020 realisiert werden, da eine Bodenentnahme in der untersten Beprobungstiefe im Jahr 2019 aufgrund einer vorhandenen Kiesschicht in einigen Bereichen nicht möglich war. Hier konnten daher nur insgesamt 556 Stechzylinder entnommen werden. An den Proben wurden die gesättigte Wasserleitfähigkeit, die Wasserretentionskurve sowie weitere wichtige Kenngrößen des Luft- und Wasserhaushalts bestimmt. Die Beschreibung der Methodik findet sich in Kapitel 3.1.7.

3.3 Arbeitspaket 3

3.3.1 Versuchsstandort (Roman Kemper)

Die Versuche wurden am Wiesengut in Hennef durchgeführt. Für Informationen zum Standort siehe Arbeitspaket 2.

3.3.2 Versuchsanlage (Roman Kemper)

Der Versuch wurde in das Vorgewende in einer Betriebsfläche des Wiesenguts gelegt. Mit einem Penetrometer wurde der Eindringwiderstand und somit die Hauptverdichtungszone in den Parzellen ermittelt (Abb. 5). So wurden alle Untersuchungen hinsichtlich Durchwurzelung und Bodenphysik im Bereich zwischen Meter 2 und 6 innerhalb der Parzellen und in der Hauptverdichtungszone zwischen 30 cm und 60 cm Bodentiefe durchgeführt.

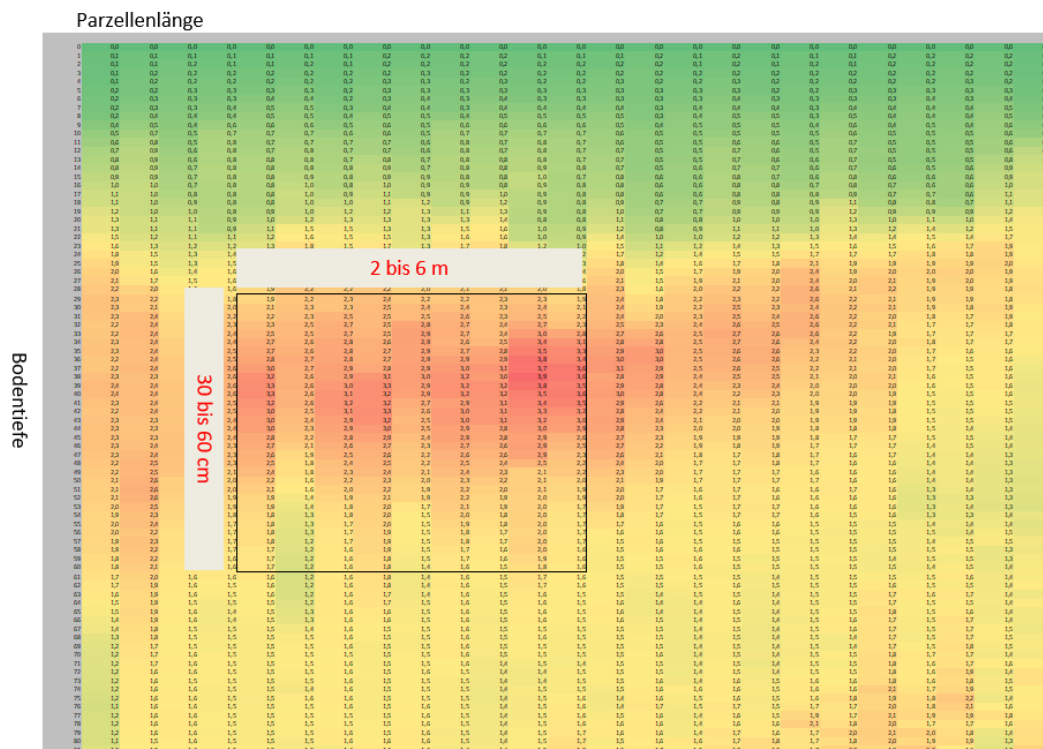


Abb. 5: Mittlerer Eindringwiderstand in MPa (rot = hoch, grün = gering) über die Parzellenlänge im Vorgewende und über die Bodentiefe mit der Hauptverdichtungszone zwischen 30 cm und 60 cm.

Der Versuch wurde als randomisierte Blockanlage mit vier Wiederholungen angelegt. Die Parzellen waren 3 m × 12 m groß. Die folgenden sieben Versuchsvarianten wurden angelegt:

1. Wegwarte
2. Wegwarte + Rohrschwengel
3. Wegwarte Spätsaat
4. Ölettrich
5. Tiefenrettich
6. Wegwarte als Zwischenfrucht
7. Kontrolle (Schwarzbrache)

Die Futterpflanzen-Varianten 1-3 wurden im Frühjahr 2019 angesät und in 2019 und 2020 zwei- bis dreimal geschnitten. In den Zwischenfrucht-Varianten 4-7 wurden in 2019 (Hafer) und 2020 (Winterackerbohne) Hauptfrüchte angebaut. Im Sommer 2020 erfolgte die Aussaat der Zwischenfrüchte bzw. es wurde eine Schwarzbrache angelegt (Variante 7). Sowohl die Futterpflanzen als auch die Zwischenfrüchte wurden im Frühjahr 2021 mit dem Pflug umgebrochen, es folgte Sommerweizen als erste Nachfrucht in 2021 und Winterroggen als zweite Nachfrucht in 2022. Die Abb. 1 erläutert die unterschiedlichen Fruchtfolge-Varianten.

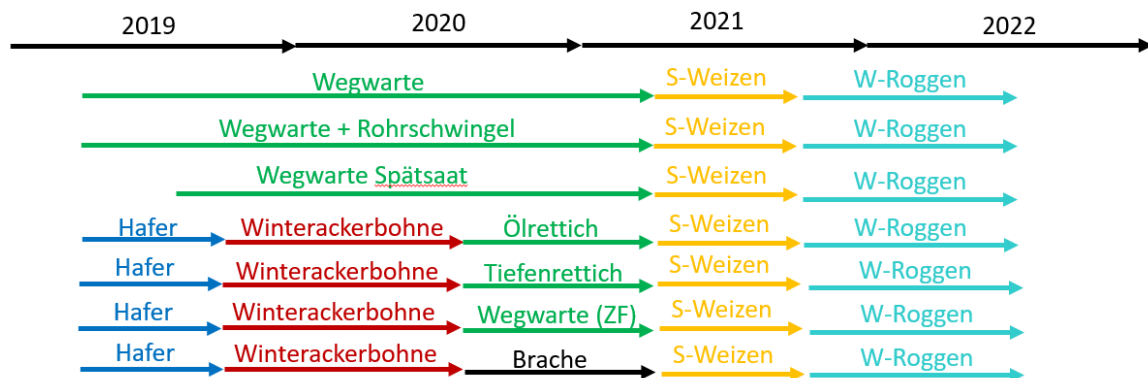


Abb. 6: Die sieben Versuchs-Varianten im Vorgewende-Versuch.

3.3.3 Sprossmasse, Nährstoffgehalte, mineralischer Bodenstickstoff, Bodenwassergehalt (Roman Kemper)

In den Futterpflanzen-Varianten erfolgten in 2019 und 2020 zwei bis drei Schnitte der Futterpflanzen. In den anderen Varianten erfolgte die Ernte der Hauptfrüchte Hafer und Winterackerbohne, begleitet von der Erfassung der Ertragskomponenten. Zusätzlich fand im Herbst 2020 eine Ernte der Biomasse der Zwischenfrüchte statt. In 2021 und 2022 erfolgten Zeiternten zum Schossen und zur Blüte, sowie die Erfassung von Ertrag und Ertragskomponenten der Nachfrüchte Sommerweizen und Winterroggen. Von den einzelnen Biomasseschnitten und Ernten wurden die Nährstoffgehalte wie in Arbeitspaket 2 analysiert. Zu ausgewählten Terminen wurden der volumetrische Bodenwassergehalt mittels FDR-Sonde und der mineralische Bodenstickstoff unter den Nachfrüchten in 2021 und 2022 erhoben.

3.3.4 Wurzelwachstum und Bioporen (Roman Kemper)

Mit der Profilwandmethode wurde im Oktober 2020 die Wurzellängendichte der Futterpflanzen und der Zwischenfrüchte wie oben beschrieben erfasst. Zusätzlich wurde die Wurzelmasse und der Wurzel-durchmesser von Futterpflanzen und Zwischenfrüchten mit der Monolith-Methode im Oktober 2020 in der Hauptverdichtungszone zwischen 30 und 60 cm wie oben beschrieben untersucht. Für die Nachfrüchte Sommerweizen im Jahr 2021 (zum Schossen und zur Blüte) und Winterroggen im Jahr 2022 (zur Blüte) wurde die Wurzellängendichte mit der Profilwandmethode erhoben. Im März 2022 wurde die Bioporendichte im Vorgewende-Versuch wie oben beschrieben erhoben.

3.3.5 Eindringwiderstand und Bodenwassergehalt (Dr. Oliver Schmittmann)

Die Bestimmung des Eindringwiderstandes und der Bodenfeuchte im Arbeitspaket 3 entsprach der in 3.1.6 beschriebenen Methode. Folgende Messtermine für den Vorgewende-Versuch wurden durchgeführt: März 2019, August 2020 und Februar 2021.

3.3.6 Bodenphysik (Dr. Marc-Oliver Göbel und Prof. Dr. Stephan Peth)

Im Rahmen des Arbeitspaketes 3 wurde auf dem Wiesengut im März 2022 eine Probenahmekampagne durchgeführt, bei der für die 7 Anbauvarianten und 4 Feldwiederholungen in 3 Tiefen (15, 40, 60 cm) jeweils 4 ungestörte Stechzylinderproben entnommen wurden (insgesamt 336 Proben). Leider konnten bis zum Zeitpunkt der Berichtserstellung die Wasserretentionsanalysen aufgrund technischer Probleme (siehe 7.4) nicht an allen Proben vollständig durchgeführt werden. Die Auswertungen werden vervollständigt sobald alle Messrohdaten vorhanden sind.

3.4 Arbeitspaket 4

3.4.1 Modellierung von Spross- und Wurzelwachstum sowie Ertragsbildung und Ertrag mit SIMPLACE (Sofia Hadir und Dr. Sabine Seidel)

Das Pflanzen- und Wurzelwachstum sowie die Stickstoffdynamik im Boden wurden mit Hilfe der Modellplattform SIMPLACE (Enders et al., 2023) modelliert. SIMPLACE verwendet einen modularen Ansatz, d.h. ein Modell besteht aus einer Kombination aus austauschbaren Submodellen, die als Softwareeinheiten namens SimComponents je nach Ansprüchen und Forschungsfragen zusammengestellt werden. SIMPLACE ermöglicht so die Integration vieler Modellkomponenten zur Simulation wesentlicher Prozesse des Agrarökosystems. In dieser Studie wird eine Kombination aus den Modellen LINTUL5 für die Simulation der Biomasse, SlimNPKDemand für Nährstoffdynamik im Boden, SOILCN für die Simulation von Flüssen von organischem C und N innerhalb des Agrarökosystems, Slimwater für die Simulation der Wasserdynamiken und SlimRoots für die Simulation des Wurzelwachstums verwendet. Eine Frost-Komponente wurde neu implementiert, um das Abfrieren der Zwischenfrüchten zu simulieren.

Die wesentlichen simulierten Prozesse sind:

1. Tägliches Pflanzenwachstum (Trockenmasse) von Zwischenfrüchten und Hauptfrüchten
2. Tägliche Bodenwasserdynamik (Bodenwassergehalt und Saugspannung)
3. Tägliche Veränderungen des organischen und mineralischen Stickstoffs im Boden in jeder Bodenschicht unter Berücksichtigung von:
 - Ausbringung von Nitrat- oder Ammoniumdünger und atmosphärischer N-Ablagerung
 - Auswaschung (Nitratverlust durch Versickern von Wasser durch die Bodenmatrix)
 - Zufuhr von Ammonium-N aus der Mineralisierung der organischen Bodensubstanz
 - Nitrifikation von Ammonium-N (abhängig von Bodentemperatur und Feuchtigkeit)
 - Tägliche N-Aufnahme durch Pflanzenwurzeln
4. Tägliche gasförmige N₂O-Verluste durch Denitrifikation in Abhängigkeit von Temperatur-, Nitrat- und Wassergehalt des Bodens.

Die wichtigsten Prozesse, Stickstoffpools und Flüsse, die in der Modellplattform SIMPLACE abgebildet werden, sind in Abb. 7 schematisch dargestellt.

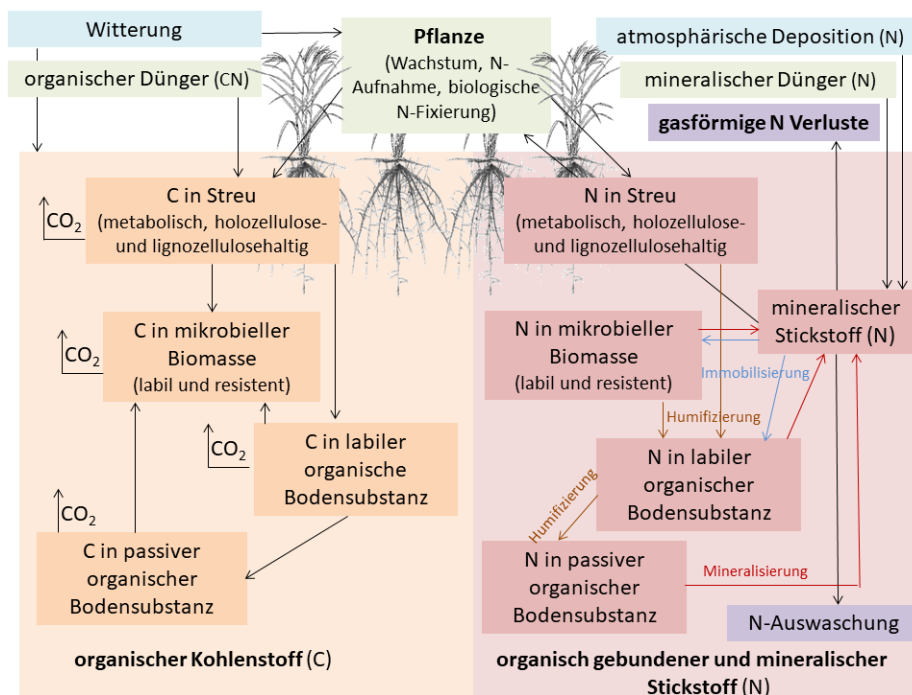


Abb. 7: Schematische Darstellung der wichtigsten Prozesse im Agrarökosystem einschließlich der Kohlenstoff- und Stickstoffpools und -flüsse, die von der Modellplattform SIMPLACE abgebildet werden können.

Die erhobenen Daten (Ertrag, Spross und Wurzelwachstum, Wetterdaten, Bodentextur, Stickstoffdaten und Makroporen sowie Bodenwasserhaushaltsdaten) aus den Kampagnen 2018-2019 und 2019-2020 (zwei verschiedene Felder) am Wiesengut wurden bereitgestellt, um SIMPLACE zu parametrisieren und kalibrieren. Die Kalibrierung der Modelle für den Standort Wiesengut wurde für die Zwischenfrüchte Ölrettich, Inkarnatklée, Sandhafer, Grünroggen, Winterrüben, Lupine und Brache sowie die Nachfrucht Sommerweizen durchgeführt. Der Fokus lag hierbei auf der N-Freisetzung durch die Vorfrucht Ackerbohne, der N-Aufnahme und dem Biomassezuwuchs der Zwischenfrüchte und der Hauptfrucht Sommerweizen sowie den N-Verlusten (gasförmig und Auswaschung). Als Validierungsdaten dienen die Daten von zwei Praxisbetrieben in NRW. Die Validierung des Modells mit diesen Daten ist aufgrund der Personalsituation (Mutterschutz der Mitarbeiterin) noch nicht vollständig abgeschlossen.

3.4.2 Modellierung des Bodenwasserhaushalts mit HYDRUS-1D (Dr. Marc-Oliver Göbel und Prof. Dr. Stephan Peth)

Um den Einfluss der Anbauvarianten mit verschiedenen Zwischenfrüchten und die dadurch verursachten Bodenstrukturveränderungen auf die Wasserhaushaltskomponenten Infiltration, Bodenwasserspeicher, Evapotranspiration und Sickerwasser abzuschätzen, wurde eine Modellierung mit dem eindimensionalen Finite-Elemente-Modell HYDRUS-1D durchgeführt (Šimůnek et al., 2013). Grundlage der Simulation mit Hydrus-1D ist die Richards-Gleichung, welche die Gesetze der Massen- und Energieerhaltung kombiniert und die Beschreibung instationärer Strömungsprozesse unter variabel gesättigten Verhältnissen ermöglicht (Richards, 1931). Ein Senkenterm integriert hierbei den Wasserentzug durch die Pflanzenwurzeln. Er repräsentiert das Wasservolumen, welches einem definierten Bodenvolumen pro Zeiteinheit entzogen wird. Für die Modellierung der Wurzelwasseraufnahme wird eine von Feddes et al. (1978) entwickelte Wasserstress-Reaktions-Funktion

(Reduktionsfunktion) verwendet, bei der der Senkenterm S mit der folgenden Wasserentzugsfunktion beschrieben wird:

$$S(\Psi_m) = \alpha(\Psi_m)S_p \quad (1)$$

mit: Ψ_m = Matrixpotential [L]
 $\alpha(\Psi_m)$ = Wasserstress-Reaktions-Funktion [-]; es gilt: $(0 < \alpha < 1)$
 S_p = potentielle Wasseraufnahmerate [L^3T^{-1}]

Die Reduktionsfunktion wird durch vier Wasserstressparameter (Matrixpotentiale) charakterisiert (Abb. 8). Für Matrixpotentiale unterhalb des permanenten Welkepunktes (Ψ_4) sowie bei fast gesättigten Verhältnissen (Ψ_1) ist die Wasseraufnahme durch die Wurzeln gleich null. Die optimalen Wasseraufnahmeverhältnisse herrschen bei Matrixpotentialen zwischen Ψ_2 und Ψ_3 , wenn $\alpha(\Psi_m) = 1$ ist. Die Wasseraufnahme entspricht dann S_p . Dabei wird von einer homogenen Verteilung der potentiellen Wasseraufnahmerate ausgegangen (Feddes et al., 1978).

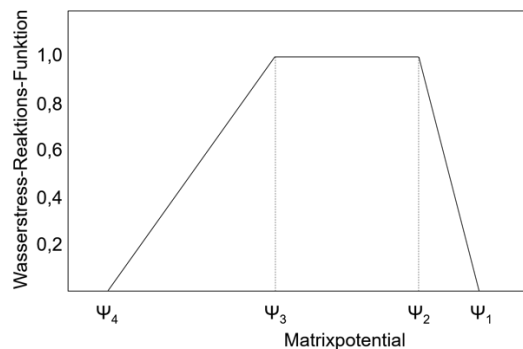


Abb. 8: Schematische Darstellung der Wasserstress-Reaktions-Funktion nach Feddes et al. (1978).

Zur Charakterisierung der hydraulischen Bodeneigenschaften wird ein von van Genuchten (1980) entwickeltes Parametermodell verwendet, das den Wassergehalt als eine stetig differenzierbare Funktion des Matrixpotentials beschreibt:

$$\theta(\Psi_m) = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha \cdot \Psi_m)^n]^m} \quad (2)$$

mit: θ_s = gesättigter Wassergehalt [L^3L^{-3}]
 θ_r = residualer Wassergehalt [L^3L^{-3}]
 α [L^{-1}], n , m [-] = empirische Anpassungsparameter [-]; wobei: $m = 1 - 1/n$

Der Parameter α korrespondiert mit der durchschnittlichen Porengröße, der Parameter n mit dem Uniformitätsgrad der Porengrößenverteilung. Mualem (1976) entwickelte ein auf der statistischen Verteilung der Porengrößen basierendes Modell zur Ableitung der relativen hydraulischen Leitfähigkeit aus der Retentionskurve und der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit. Van Genuchten (1980) kombinierte das Mualem-Modell mit seinem Modell zur Beschreibung der Wasserretentionskurve (Gl. 1). Die hydraulische Leitfähigkeit K kann danach als Funktion des Matrixpotentials beschrieben werden:

$$K(\Psi_m) = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (3)$$

mit: K_s = gesättigte hydraulische Leitfähigkeit [LT^{-1}]
 l = Parameter zur Beschreibung der Porenverbundenheit [-]
 S_e = effektiver Wassergehalt [-]:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (4)$$

Der Parameter l hat einen durchschnittlichen Wert von 0,5 (Mualem, 1976).

Eingangsparameter und Modellannahmen

Für die Beschreibung der hydraulischen Bodeneigenschaften der einzelnen Standorte wurden die mittels Parameterfitting ermittelten Kennwerte der Wasserretentionsfunktion (van Genuchten-Parameter) und die im Labor bestimmte gesättigte Wasserleitfähigkeit verwendet (für jede Anbauvariante und Tiefe gemittelt über alle Replikate und Feldwiederholungen; siehe 3.1.7). Entsprechend der drei Beprobungstiefen (15, 40, 60 cm) wurde die Modelldomäne in drei Kompartimente aufgeteilt, denen die entsprechenden hydraulischen Eigenschaften zugewiesen wurden. Bei einer gemessenen Wurzelverteilung bis 100 cm (Standort Wiesengut) wurden die Grenzen der Kompartimente bei 0–27,5 cm, 27,5–50 cm und 50–100 cm festgelegt. Bei einer gemessenen Wurzelverteilung bis 150 cm Tiefe (Standort Oberfeld) wurden die Kompartimentgrenzen entsprechend bei 0–27,5 cm, 27,5–50 cm und 50–150 cm festgelegt.

Als Grundlage für die Modellierung der Wasserentnahme durch die Pflanzenwurzeln dienten die von der Arbeitsgruppe INRES-AOL (Universität Bonn) ermittelten Wurzellängendichteverteilungen der Futterpflanzen (Standort Oberfeld) und Zwischenfrüchte (Standort Wiesengut). Neben der Berücksichtigung im Feld gemessener Wurzeldaten in Form von Wurzellängendichteverteilungen bietet das Modell HYDRUS-1D auch die Möglichkeit, das Wurzelwachstum zu simulieren. Eine Kombination, bei der sowohl gemessene Wurzellängendichten als auch deren dynamische Veränderung als Funktion der Zeit berücksichtigt werden, ist mit HYDRUS-1D jedoch nicht möglich. Aus diesem Grund wurden die Simulationen grundsätzlich unter Annahme eines statischen Wurzelsystems durchgeführt. Um explizit den spezifischen Einfluss der Wurzellängendichteverteilung bzw. der hydraulischen Eigenschaften zu untersuchen, wurden darüber hinaus auch Simulationsläufe durchgeführt, bei denen die hydraulischen Bodeneigenschaften bzw. die Wurzellängendichteverteilung für alle Anbauvarianten konstant gehalten wurden. Für diese Simulationsläufe wurden die entsprechenden mittleren hydraulischen Eigenschaften bzw. Wurzellängendichteverteilungen verwendet. Für den überwiegenden Teil der untersuchten Pflanzen liegen keine publizierten Werte für die Wasserstressparameter vor. Daher wurde die Simulation für alle Anbauvarianten mit konstanten Werten ($\Psi_1 = 0$ hPa, $\Psi_2 = -1$ hPa, $\Psi_3 = -300/-1000$ hPa, $\Psi_4 = -16000$ hPa) durchgeführt.

Da der Blattflächenindex (BFI) und die Bestandeshöhe als wichtige Eingangsgrößen für die Modellierung der Wurzelwasseraufnahme durch die Futterpflanzen und Zwischenfrüchte nicht experimentell bestimmt wurden, war eine Abschätzung dieser Größen notwendig. Aus diesem Grund wurde eine Literaturrecherche mit dem Ziel durchgeführt, realistische Werte für diese Parameter im Laufe der Vegetationsperiode zu ermitteln. Die hierbei gewonnenen Informationen stammen jedoch von Standorten, die sich sowohl klimatisch als auch pedologisch stark unterscheiden und zudem eine große Bandbreite an Wachstumsbedingungen aufweisen, so dass die für die einzelnen Pflanzenarten

ermittelten Werte nicht miteinander vergleichbar sind, sondern vielmehr ein Spektrum möglicher Werte darstellen. Da die Verwendung solcher Werte im Rahmen der Simulation mit großen Unsicherheiten behaftet ist, erschien die Verwendung von konstanten Werten über die Zeit und über alle Anbauvarianten hinweg am sinnvollsten. Die Simulationen wurden daher standardmäßig mit einem BFI von 3 und einer Bestandeshöhe von 80 cm durchgeführt. Um den Einfluss des BFI und der Bestandeshöhe auf die Wurzelwasserentnahme und den Bodenwasserhaushalt zu untersuchen, wurden darüber hinaus auch Simulationsläufe mit einem BFI von 5 und einer Bestandeshöhe von 120 cm durchgeführt.

Die am jeweiligen Standort gemessenen hochaufgelösten Wetterdaten (15-Minuten-Intervalle) wurden zur Berechnung von Tagesniederschlagssumme, Tagesmaximumtemperatur, Tagesminimumtemperatur sowie der durchschnittlichen täglichen Windgeschwindigkeit, relativen Luftfeuchte und Solarstrahlung verwendet. Diese standortspezifischen Tagesdaten wurden als obere (atmosphärische) Randbedingung für die Modellierung verwendet. Als untere Randbedingung des Modells wurde freie Drainage angenommen. Da keine Informationen zum in situ Matrixpotential vorlagen, wurde generell Feldkapazität als Anfangsbedingung angenommen.

Simulationsvarianten

Zur Ermittlung der Effekte der Anbauvarianten auf die Komponenten des Bodenwasserhaushalts wurden für alle untersuchten Varianten jeweils die folgenden Simulationsläufe durchgeführt (Tabelle 4): Standardvariante (**1**), bei der die im Feld bestimmten Wurzellängendichteverteilungen und aus den Wasserretentionsdaten abgeleiteten hydraulischen Eigenschaften differenziert für die jeweilige Anbauvariante und Tiefe berücksichtigt wurden (BFI: 3, Bestandeshöhe: 80 cm; nur für den Standort Hennef möglich, siehe unten); Varianten, bei denen mit veränderten BFI und Bestandeshöhen simuliert wurde (**2** und **3**); Varianten, bei denen entweder (**4**) mit einer durchschnittlichen Wurzelverteilung (gemittelt über alle Varianten) oder (**5**) mit durchschnittlichen hydraulischen Bodeneigenschaften (gemittelt über alle Varianten) simuliert wurde. Standardmäßig wurde dabei über einen 6-Monatszeitraum von Anfang Juni bis Ende November simuliert, wobei die Wetterdaten der Jahre 2020 (**1–5**) und 2021 (Oberfeld) bzw. 2022 (Wiesengut) (**6**) verwendet wurden. Die Beschränkung auf diesen Simulationszeitraum begründet sich in der Tatsache, dass durch den Ausschluss des Winters und Frühjahres unrealistische Annahmen hinsichtlich des BFI und der Bestandeshöhen vermieden werden. Darüber hinaus ermöglichte die Beschränkung auf diesen Zeitraum einen Vergleich verschiedener Jahre für den Standort Wiesengut, da es in den anderen Zeiträumen teilweise zu Ausfällen in der Wetterdatenaufzeichnung kam.

Tabelle 4: Realisierte Simulationsvarianten.

Simulationsvariante	Hydraulische Parameter	Wurzelverteilung	BFI	Bestandeshöhe (cm)	Simulationsjahr
1	pflanzen- und tiefenspezifisch	pflanzenspezifisch	3	80	2020
2	pflanzen- und tiefenspezifisch	pflanzenspezifisch	5	80	2020
3	pflanzen- und tiefenspezifisch	pflanzenspezifisch	5	120	2020
4	pflanzen- und tiefenspezifisch	konstant ^a	3	80	2020
5	nur tiefenspezifisch ^b	pflanzenspezifisch	3	80	2020
6	pflanzen- und tiefenspezifisch	pflanzenspezifisch	3	80	2021/2022 ^c

^a Verwendung einer mittleren Wurzellängendichteverteilung; ^b Verwendung tiefenspezifischer, mittlerer hydraulischer Eigenschaften.

^c Verwendung der Wetterdaten aus dem Jahr 2021 (Standort Oberfeld) bzw. 2022 (Standort Wiesengut).

Die in Tabelle 4 dargestellten Simulationsvarianten wurden mit Ausnahme des Standortes Oberfeld für alle untersuchten Anbauvarianten realisiert. Aufgrund der noch fehlenden Wasserretentionsdaten für den Standort Oberfeld (siehe 3.1.7 und 7.4) konnten die hydraulischen Eigenschaften hier nicht spezifisch für jede Anbauvariante berücksichtigt werden. Die Simulationen wurden daher in einem ersten Ansatz ausschließlich tiefenspezifisch mit durchschnittlichen hydraulischen Bodeneigenschaften (gemittelt über die vorhandenen Anbauvarianten) durchgeführt. Insgesamt wurden für Arbeitspaket 1 $n = 28$ (7×4), für Arbeitspaket 2 $n = 138$ (23×6) und für Arbeitspaket 3 $n = 42$ (7×6) Simulationen durchgeführt.

3.4.3 Modellierung der Humusbildung mit HUMOD (Dr. Christopher Brock)

Im Projekt wurde für die Humusbilanzierung das Modell HU-MOD (Brock et al. 2012, Knebl et al. 2015) eingesetzt. Das Modell wurde von Wissenschaftler*innen der Universitäten Gießen und Freising-Weihenstephan entwickelt. Es stellt eine Weiterentwicklung der Humusbilanzmethode von Hülsbergen (2003) dar, die im bekannten REPRO-Modell und im DLG-Nachhaltigkeitszertifikat angewendet wird. Beide Humusbilanzmethoden basieren auf dem Ansatz von Leithold (1991), der eine funktionale Beziehung definierte, um den Bedarf an organischer Substanz in unterschiedlichen Fruchtfolgen zu berechnen. Leithold verwendete die Stickstoffaufnahme der Kulturpflanzen als Indikator für die Inanspruchnahme von mineralisiertem N aus der organischen Bodensubstanz und berechnete auf dieser Grundlage den Ersatzbedarf an organischer Substanz. Andere N-Quellen (mineralische Düngung, atmosphärische Deposition und – bei Leguminosen- symbiotische Fixierung) müssen dabei natürlich berücksichtigt werden (Abb. 9).

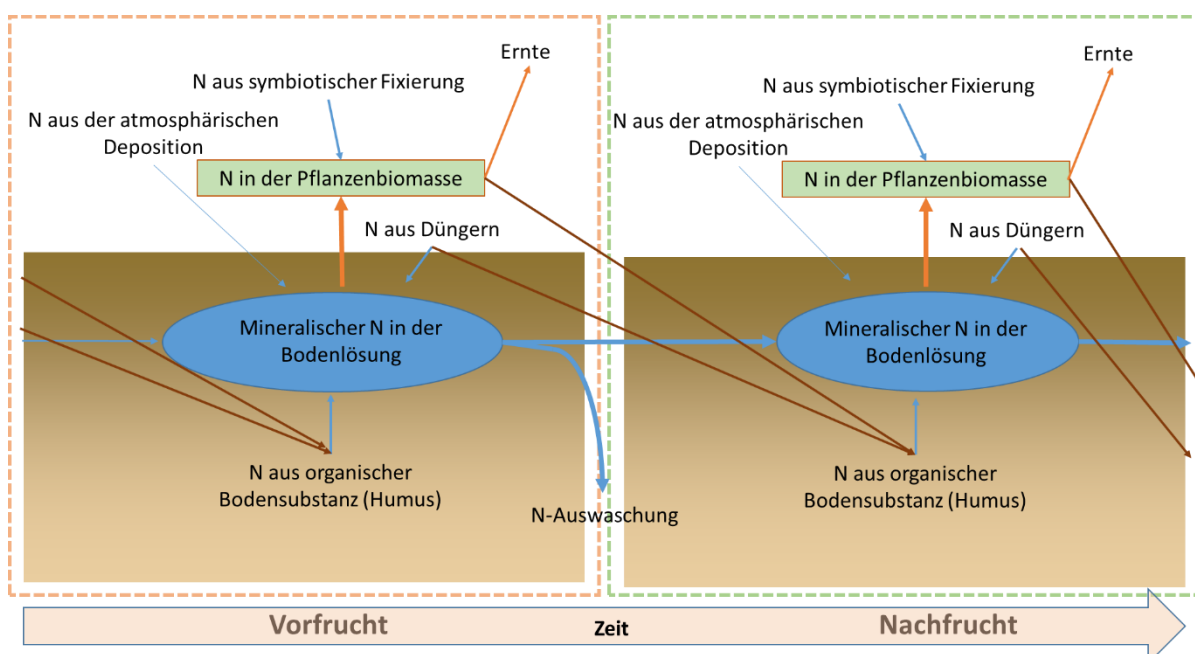


Abb. 9: N-Bilanz im System Boden-Pflanze als Grundlage der Humusbilanzierung.

Der Vorteil gegenüber einer auf den Kohlenstoff bezogenen Bilanz ist, dass die N-bezogene Bilanzierung die Notwendigkeit einer Bewertung von Umsatzfaktoren der organischen Bodensubstanz am Standort umgeht und stattdessen eine einfach zu erhebende Größe als Bezug verwendet, die einen

Rückschluss auf das Umsatzgeschehen zulässt. Für die Praxisanwendung ist der N-bezogene Ansatz daher klar vorzuziehen.

Die Anwendbarkeit des Modells HU-MOD wurde in einer regulären Validierung bestätigt. Tatsächlich gehört das HU-MOD damit zur sehr kleinen Gruppe validierter Humusbilanzmodelle (vgl. Review von Brock et al. 2013). Allerdings hat sich gezeigt, dass das Modell in mineraldüngerbasierten Systemen weniger gut funktioniert. Dies liegt vermutlich daran, dass für eine korrekte Einschätzung der N-Flüsse im Boden bei schnell verfügbaren N-Quellen eine genauere Parametrisierung von Bodenfaktoren notwendig wäre, die im Modell im Sinne der Praxisanwendbarkeit bisher vermieden wird.

3.4.3.1 Modellbeschreibung

Das Modell HU-MOD berechnet Mengenänderungen der organischen Bodensubstanz an einem Standort unter Nutzung der N-Aufnahme in den Kulturpflanzen als Response-Indikator des spezifischen Umsatzes der organischen Bodensubstanz unter den gegebenen Bedingungen. Auf diese Weise wird die Notwendigkeit einer Parametrisierung der ökologischen Faktoren des Umsatzes der organischen Substanz im Boden umgangen. Allerdings müssen die Beiträge sonstiger Quellen (insbesondere biologische N-Fixierung und Düngung) an der N-Versorgung und Auswaschungsverluste von mineralisiertem Stickstoff berücksichtigt werden. Der Aufbau neuer organischer Bodensubstanz wird anhand der C- und N-Inputs mit Pflanzenbiomasse (Grün- und Strohdüngung, Ernte- und Wurzelrückstände) und aus organischen Düngern berechnet, wobei Verluste wiederum berücksichtigt werden.

Abbau organischer Bodensubstanz

Der Abbau organischer Bodensubstanz (SOMLOSS) ist im Modell die Summe von N-Aufnahme der Pflanzen und unproduktiven N-Verlusten. Berücksichtigt werden dabei a) der Beitrag anderer Quellen zur N-Versorgung der Pflanzen, sowie b) Standorteinflüsse auf die N-Auswaschung.

$$\text{SOMLOSS} = (\text{NPB} - \text{NBNF} - \text{NFTLZ} - \text{NDEP} + \text{NLOSS}) * \text{SITECN}$$

SOMLOSS: Abbau organischer Bodensubstanz (kg Boden-C); NPB: N in Pflanzenbiomasse (kg N); NBNF: N aus biologischer N-Fixierung (kg N); NFTLZ: N aus Düngern (kg N); NDEP: N aus atmosphärischer Deposition (kg N); NLOSS: N-Verluste aus dem Boden (kg N); SITECN: C:N-Verhältnis im bewerteten Bodenvolumen.

NPB ist hier die Summe der N-Mengen in ober- und unterirdischer Biomasse. Unterschieden werden die Fraktionen Hauptprodukt (pflanzenartspezifisches Ernteprodukt), Nebenprodukt (optionales Ernteprodukt wie Stroh, Rübenblatt, usw.), Streu (oberirdischer Bestandsabfall während der Vegetationsperiode), Stoppel (Wurzelstock mit Stängelbasis und Wurzeln (Wurzelmasse einschließlich Exsudaten).

$$\text{NPB} = \text{NMP} + \text{NSP} + \text{NLIT} + \text{NSTB} + \text{NRTS}$$

NPB: N in der Pflanzenbiomasse (kg N); NMP: N im Hauptprodukt (kg N); NSP: N im Nebenprodukt (kg N); NLIT: N in der Streu/im Bestandsabfall (kg N); NSTB: N in der Stoppel (kg N); NRTS: N in Wurzeln (kg N).

Die N-Mengen in den einzelnen Fraktionen werden auf Grundlage der spezifischen Gehalte in der Trockenmasse berechnet:

$$N [MP,SP,LIT,STB,RTS] = FM[MP,SP,LIT,STB,RTS] * DMCONT[MP,SP,LIT,STB,RTS] * NCONT[MP,SP,LIT,STB,RTS]$$

N [MP,SP,LIT,STB,RTS]: N-Menge in Hauptprodukt, Nebenprodukt, Streu, Stoppel, Wurzeln (kg N); FM[...]: Frischmasse der Fraktionen (kg FM); DMCONT[...]: Trockenmassegehalt der Fraktionen; NCONT[...]: N-Gehalt in der Trockenmasse der Fraktionen.

DM- und N-Gehalte können ebenso wie die Massen der einzelnen Fraktionen im Modell eingegeben werden, falls die entsprechenden Daten vorliegen. Andernfalls werden die Massen über Allokationsfaktoren auf Grundlage der Trockenmasse des Ernteproduktes berechnet.

$$DM[SP,LIT,STB,RTS] = DMMP * AF[SP,LIT,STB,RTS]$$

DM[SP,LIT,STB,RTS]: s. oben; DMMP: Trockenmassegehalt im Hauptprodukt; AF[...]: Allokationsfaktoren der Fraktionen.

Die Allokationsfaktoren sind jeweils als Quotient aus Fraktionsmenge (SP,LIT,STB,RTS) und Hauptproduktmenge angegeben. Die Multiplikation der Hauptproduktmenge (Trockenmasse) mit dem jeweiligen Allokationsfaktor ergibt daher die jeweilige Fraktionsmenge.

Auch die Trockenmasse des Hauptproduktes ist für alle Pflanzenarten im Modell hinterlegt, falls entsprechende Daten nicht verfügbar sind.

Die N-Menge in NPB aus biologischer Fixierung wird auf Grundlage literaturbezogener Faktoren berechnet. Diese Faktoren werden bisher auf NPB und damit auf die gesamte Pflanze bezogen. Eine Differenzierung der N-Anteile aus BNF in den verschiedenen Pflanzenfraktionen findet bisher in Ermangelung einer ausreichenden Datengrundlage nicht statt, ist aber grundsätzlich denkbar. Falls Daten zum Anteil von BNF in NPB vorliegen, können diese eingegeben werden.

Die biologische Fixierung von N ist negativ mit der Verfügbarkeit von N im Boden korreliert. In Anlehnung an Ergebnisse von Möller (2008) wird im Modell vereinfachend angenommen, dass die N-Fixierung mengenmäßig proportional zum Angebot an N aus anderen Quellen abnimmt.

$$NBNF = NPB * BNF - NFTLZ - NADEP$$

NBNF: N aus biologischer Fixierung (kg N); NPB: s. oben; BNF: Anteil von N aus biologischer Fixierung an NPB (Faktor); NFTLZ, NADEP: s. oben.

Die Aufnahme von Dünger-N wird berechnet auf Grundlage der im Anwendungsjahr verfügbaren N-Mengen aus den applizierten Düngern unter Berücksichtigung von Auswaschungsverlusten.

$$NFTLZ = FMFTLZ * FTLZTM * FTLZN * FTLZNAV * FTLZNUE$$

NFTLZ: s. oben; FMFTLZ: Düngermenge (kg FM); FTLZDM: Trockenmassegehalt des Düngers (Faktor); FTLZN: N-Gehalt des Düngers in der Trockenmasse (Faktor); FTLZNAV: Anteil an im Anwendungsjahr mineralisiertem N von FTLZN (Faktor); FTLZNUE: Nutzung von mineralisiertem N durch die Pflanzen (Faktor).

Der verfügbare Anteil des in den Düngern enthaltenen N wird dabei in Abhängigkeit vom C:N-Verhältnis der Dünger berechnet.

$$FTLZNAV = 1,6674 * FTLZCN - 0,768$$

FTLZNAV: s. oben; FTLZCN: C:N-Verhältnis des Düngers.

Die Parameter der Funktion zur Berechnung von FTLZNAV wurden definiert auf Grundlage der Angaben bei Gutser & Ebertseder (2005).

Bezüglich der Nutzungseffizienz des verfügbaren N wird im Modell vereinfachend angenommen, dass N-Auswaschungsverluste nur in vegetationsfreien Zeiten auftreten. Die Nutzungseffizienz ist daher

$$\text{FTLZNUE} = 1 - \text{NLOSS}$$

Hierbei wird NLOSS nach Burns (1976) auf Grundlage von Porenvolumen und Niederschlagssumme berechnet:

$$\text{NLOSS} = [\text{PRECIP} / (\text{PRECIP} + \text{PV})] d$$

FTLZNUE: Ausnutzungsrates für Dünger-N (Faktor); NLOSS: N-Auswaschungsverluste (kg N); PRECIP: Niederschlag in der vegetationsfreien Zeit (cm m⁻¹); PV: Porenvolumen des Bodens (dezimal); d=Referenz-Bodentiefe, hier 90 cm-30 cm Einarbeitungshorizont = 60 cm

Als Grenz-Bodentiefe werden im Modell standardmäßig 90 cm angenommen, d.h. NLOSS bezieht sich auf den tiefer als 90 cm verlagerten N. Die Grenz-Bodentiefe kann nach Bedarf bzw. bei entsprechender Datenlage angepasst werden. Die eingehende Niederschlagsmenge kann bei Vorlage entsprechender Wetterdaten exakt angegeben werden und bezieht sich auf die Niederschlagssumme zwischen der Ausbringung des Düngers und der Ausbildung einer ausreichenden Wurzelarchitektur der bewerteten Fruchtart. Da hierzu in der Regel keine Daten vorliegen, wird die Niederschlagssumme vereinfachend als Jahresniederschlag * 0,5 berücksichtigt. Werden Zwischenfrüchte angebaut, wird vereinfachend ein NLOSS von 0 angenommen.

Die Umrechnung von kg N in kg Boden-C erfolgt auf Grundlage des C:N-Verhältnisses im Oberboden der bewerteten Fläche. Berechnungen im Modell werden standardmäßig auf die Fläche von 1 ha bezogen.

Aufbau organischer Bodensubstanz

Der Aufbau organischer Substanz aus Pflanzenbiomasse bzw. Pflanzenrückständen und Düngern wird berechnet als:

$$\text{SOMSUP} = \text{MINIMUM} [\text{CSUP}; \text{NSUP} * \text{SITECN}]$$

SOMSUP: Aufbau organischer Bodensubstanz (kg C); CSUP: C-Nachlieferung (kg C); NSUP: N-Nachlieferung (kg N); SITECN: s. oben.

Damit wird dem Umstand Rechnung getragen, dass sowohl C, wie auch N den Aufbau organischer Substanz limitieren können (Schimel & Weintraub 2003). Da sich das C:N-Verhältnis im Feinboden von Ackerböden an einem Standort in der Regel nur geringfügig und über längere Zeiträume ändert, ist der maximale Aufbau organischer Bodensubstanz im Modell die Menge an C und N, die eine Konstanz des C:N-Verhältnisses im Boden am bewerteten Standort gewährleistet.

Der Eintrag an C entspricht im Modell der Gesamtmasse an C aus der Fläche verbleibender Pflanzenbiomasse und Düngern:

$$\text{CSUP} = \text{CMP} + \text{CSP} + \text{CLIT} + \text{CSTB} + \text{CRTS} + \text{CFTLZ}$$

CSUP: s. oben; CMP: C-Input aus dem Hauptprodukt/Gründüngung (kg C); CSP: C-Input aus dem Nebenprodukt/Stroh (kg C); CLIT: C-Input aus Streu (kg C); CSTB: C-Input aus Stoppeln (kg C); CRTS: C-Input aus Wurzeln (kg C); CFTLZ: C-Input aus Düngern (kg C).

CMP und CSP können dabei jeweils den Wert 0 annehmen, wenn Hauptprodukt (MP) oder Nebenprodukt (SP) geborgen wurden. Die C-Mengen berechnen sich im Einzelnen wie folgt:

$$C[\text{MP,SP,LIT,STB,RTS}] = \text{FM}[\text{MP,SP,LIT,STB,RTS}] * \text{DMCONT}[\text{MP,SP,LIT,STB,RTS}] * \text{CCONT}[\text{MP,SP,LIT,STB,RTS}]$$

und

$$\text{CFTLZ} = \text{FMFTLZ} * \text{DMCONTFTLZ} * \text{CCONTFTLZ}$$

C[MP...]: s. oben; FM[MP...]: Frischmasse der Fraktionen (kg); DMCONT[MP...]: Trockenmassegehalt der Fraktionen (Faktor); CCONT[MP...]: C-Gehalte der Fraktionen (Faktor); CFTLZ: s. oben; FMFTLZ: Frischmasse der org. Dünger (kg); CMCONTFTLZ: Trockenmassegehalte der org. Dünger (Faktor); CCONTFTLZ: C-Gehalte der org. Dünger (Faktor)

Die N-Inputs werden auf Grundlage der N-Mengen aus der SOMLOSS-Berechnung geschätzt:

$$\text{NSUP} = \text{NLIT} + \text{NSTB} + \text{NRTS} + \text{NREM}$$

NSUP: s. oben; NLIT: N-Input aus Streu (kg N); NSTB: N-Input aus Stoppeln (kg N); NRTS: N-Input aus Wurzeln (kg N); NREM: N-Input aus organischen Düngern einschl. Gründüngung und Stroh (kg N).

Falls Pflanzen als Gründüngung verwendet werden, oder falls das Nebenprodukt auf der Fläche verbleibt, wird dies jeweils als Dünger bei der Folgefrucht angerechnet und ist dann dort in NREM enthalten:

$$\text{NREM} = \text{NSUPFTLZ} - \text{NAVFTLZ}$$

NREM: s. oben; NSUPFTLZ: Gesamt-N-Input mit organischen Düngern (kg N); NAVFTLZ: im Anwendungsjahr mineralisierte N-Menge (kg N).

Dabei ist NSUPFTLZ der Gesamt-N-Input mit dem spezifischen Dünger:

$$\text{NSUPFTLZ} = \text{FMFTLZ} * \text{DMCONTFTLZ} * \text{FTLZN}$$

und NAVFTLZ die Menge des aus dem Dünger mineralisierten N:

$$\text{NAVFTLZ} = \text{FMFTLZ} * \text{DMCONTFTLZ} * \text{FTLZN} * \text{FTLZNAV}$$

NSUPFTLZ, FMFTLZ, DMCONTFTLZ: s. oben; FTLZN: N-Gehalt der organischen Dünger (Faktor); FTLZNAV: Anteil des im Anwendungsjahr mineralisierten N aus org. Düngern (Faktor).

Dünger sind in diesem Sinne alle organischen Dünger, Gründüngung, Stroh und N-Mineraldünger.

Bilanz

Die Bilanz der organischen Substanz im Boden (Humusbilanz) wird mit Bezug auf C und auf N ausgegeben:

$$\text{SOMBALC} = \text{SOMSUP} - \text{SOMLOSS}$$

SOMBALC: Humusbilanz in kg OBS-C ha⁻¹; SOMSUP, SOMLOSS: s. oben.

$SOMBALN = SOMSUP / SITECN - SOMLOSS / SITECN$

SOMBALN: Humusbilanz in kg OBS-N ha⁻¹; SOMSUP, SOMLOSS: s. oben.

3.4.3.2 Parametrisierung

Für die Berechnung der Humusbilanzen im Feldversuch wurde das Modell auf Grundlage der erhobenen Daten gemäß Tabellen A1 und A2 (Anhang) parametrisiert.

4 Ausführliche Darstellung der wichtigsten Ergebnisse

4.1 Arbeitspaket 1

4.1.1 Spross- und Wurzelmasse sowie Nährstoff-Aufnahmen der Futterpflanzen (Roman Kemper)

In den zwei Nutzungsjahren wurden insgesamt maximal fünf Schnitte erzielt. Aufgrund der Trockenheit und es insgesamt geringen Aufwuchses wurden nicht alle Varianten zu jedem Termin geschnitten. Die mit Abstand höchsten Spross-Trockenmassen erreichten die Luzerne-Reinsaat und die Luzerne-Rohrschwengel-Mischung (Abb. 10). Die geringste Sprossmasse wurde in der Rohrschwengel-Reinsaat geerntet. In allen Varianten wurde eine gleich hohe oder höhere Wurzelmasse als Sprossmasse ermittelt. Dabei erreichten wiederum die Luzerne und die Luzerne-Rohrschwengel-Mischung die höchsten Wurzel-Trockenmassen. Die im Vergleich zum Spross hohe Wurzelmasse des Rohrschwengels führt zu einem sehr hohen Wurzel-Spross-Verhältnis. Sowohl für Spross als auch Wurzel ist die Rotklee-Gras-Mischung deutlich schwächer als die Mischung mit Luzerne. Die Varianten mit Wegwarte erreichen sowohl für Spross als auch Wurzel mittlere Trockenmassen.

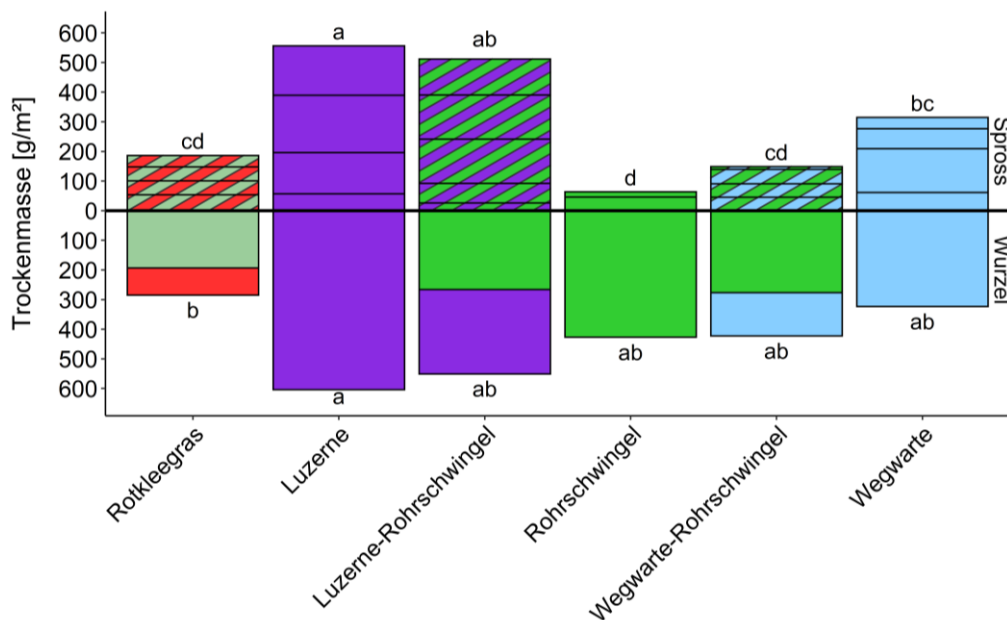


Abb. 10: Mittelwerte der Spross- (n=4) und Wurzelmasse (n=3) von Futterpflanzen 18 Monate nach Ansaat. Sprossmassen sind nicht nach Mischungspartnern getrennt. Sprossmassen sind in einzelne Ernteschnitte unterteilt. Unterschiedliche Farben kennzeichnen die verschiedenen Futterpflanzen: mintgrün=Weidelgras, rot=Rotklee, violett=Luzerne, grasgrün=Rohrschwengel, blau=Wegwarte. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$ HSD-Test) zwischen den Varianten für jeweils Spross und Wurzel.

Die Mengen von gebundenem Kohlenstoff spiegeln die Spross- und Wurzel-Trockenmassen wider (Abb. 11). In der Luzerne-Variante wurden maximal ca. 250 g/m² Kohlenstoff, sowohl in der oberirdischen Biomasse als auch in den Wurzeln gebunden. Für die Stickstoff-Aufnahme ergaben sich große Unterschiede (Abb. 12). Die höchsten N-Aufnahmen erreichten sowohl in Spross und Wurzel die Luzerne-Reinsaat und die Luzerne-Rohrschwengel-Mischung. Die Luzerne hat im Spross im Mittel 16 g/m² und in der Wurzel 12 g/m² Stickstoff aufgenommen.

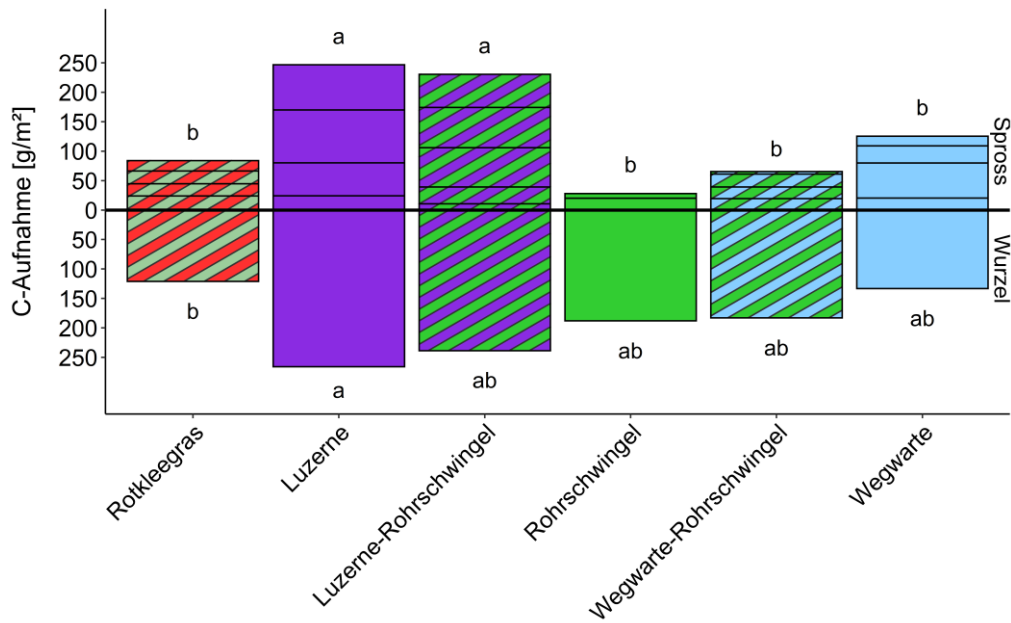


Abb. 11: Mittelwerte der Kohlenstoff-Aufnahme in Spross- (n=4) und Wurzel (n=3) von Futterpflanzen 18 Monate nach Ansaat. Sprossmassen sind nicht nach Mischungspartnern getrennt. Kohlenstoff-Aufnahme im Spross ist in einzelne Ernteschnitte unterteilt. Unterschiedliche Farben kennzeichnen die verschiedenen Futterpflanzen: mintgrün=Weidelgras, rot=Rotklee, violett=Luzerne, grasgrün=Rohrschwengel, blau=Wegwarte. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$ HSD-Test) zwischen den Varianten für jeweils Spross und Wurzel.

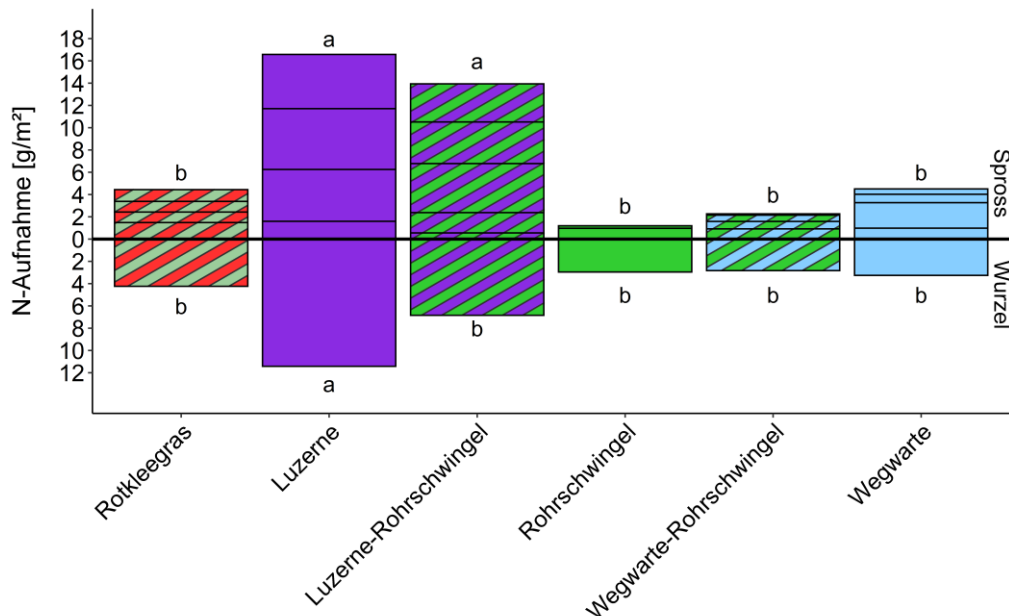


Abb. 12: Mittelwerte der Stickstoff-Aufnahme in Spross- (n=4) und Wurzel (n=3) von Futterpflanzen 18 Monate nach Ansaat. Sprossmassen sind nicht nach Mischungspartnern getrennt. Stickstoff-Aufnahme im Spross ist in einzelne Ernteschnitte unterteilt. Unterschiedliche Farben kennzeichnen die verschiedenen Futterpflanzen: mintgrün=Weidelgras, rot=Rotklee, violett=Luzerne, grasgrün=Rohrschwengel, blau=Wegwarte. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$ HSD-Test) zwischen den Varianten für jeweils Spross und Wurzel.

4.1.2 Wurzellängendichte, Wurzelmasse und Wurzelmasseverteilung in den Mischungen sowie Bioporendichte und Abschätzung des Bioporengenesepotential mittels Wurzelstücken (Roman Kemper)

Bei den Gräsern und Gräser-Mischungen waren hohe Wurzellängendichten (WLD) im Oberboden zu finden (Abb. 13). In den obersten 10 cm wurden Werte von bis 35 cm/cm³ gefunden. Deutlich geringe Werte im Oberboden wiesen die Pfahlwurzler Wegwarte und Luzerne auf. Im oberen Unterboden (35-65 cm) hatte die Luzerne-Rohrschwengel-Mischung signifikant höhere WLD als Wegwarte, die anderen Varianten lagen dazwischen. Im tiefen Unterboden gab es keine signifikanten Unterschiede, jedoch wurden die höchste Werte tendenziell bei der Luzerne gefunden.

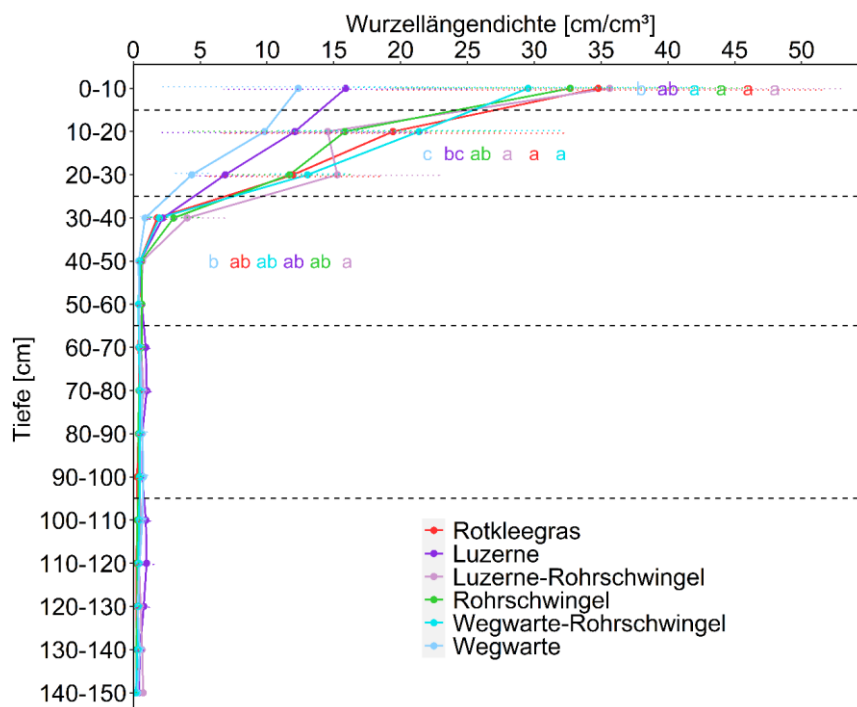


Abb. 13: Mittelwerte und Standardabweichung der Wurzellängendichte (n=3) von Futterpflanzen 18 Monate nach Ansaat. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$ HSD-Test) zwischen den Varianten innerhalb einer Tiefenstufe.

Im Vergleich zur Wurzellängendichte sind die Werte der Wurzelmasse im Oberboden weniger stark differenziert (Abb. 14). Die höchsten Werte im Oberboden erreichten die Luzerne und die Luzerne-Rohrschwengel-Mischung. Die geringsten Wurzelmasseindichten wurden bei der Wegwarte-Reinsaat gefunden. Im tiefen Unterboden fallen die im Vergleich zum Rotklee gras und ab einer Tiefe von 110 cm auch im Vergleich zu Wegwarte, Rohrschwengel und Wegwarte-Rohrschwengel signifikant höheren Werte der Luzerne auf.

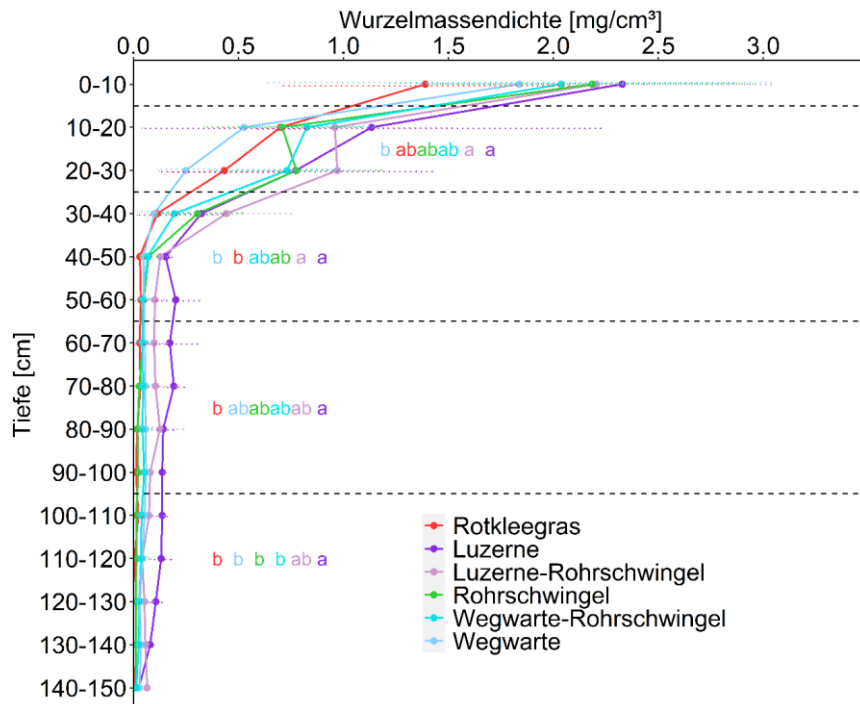


Abb. 14: Mittelwerte und Standardabweichung der Wurzelmasse (n=3) von Futterpflanzen 18 Monate nach Ansaat. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$ HSD-Test) zwischen den Varianten innerhalb einer Tiefenstufe.

Die Ergebnisse aus der FTIR-Analyse ergaben für die Luzerne-Rohrschwengel-Mischung Wurzelanteile von jeweils ca. 50 % von Luzerne und Rohrschwengel im Oberboden (Abb. 15). Zwischen 20 cm und 40 cm Bodentiefe erreichte der Rohrschwengel signifikant höhere Anteile als die Luzerne. Im Unterboden erreichte die Luzerne Wurzelmassenanteile über 70 %, der Rohrschwengelanteil nahm nach unten immer weiter ab.

Für die Wegwarte-Rohrschwengel-Mischung zeigten sich signifikant höhere Rohrschwengelanteile als Wegwarteanteile im Oberboden, in einigen Tiefenstufen bis über 80% (Abb. 16). Im Unterboden hingegen waren deutlich höhere Wegwarteanteile, meist über 50%, zu finden. Der Rohrschwengelanteil nahm mit der Tiefe ab.

Für die Rotklee-Mischung wurden im Oberboden signifikant höhere Weidelgrasanteile als Rotkleeanteile gefunden (Abb. 17). Über das gesamte Profil wichen die Wurzelmassenanteile von Rotklee und Weidelgras nicht stark von den Saatanteilen von 30 % und 70 % ab.

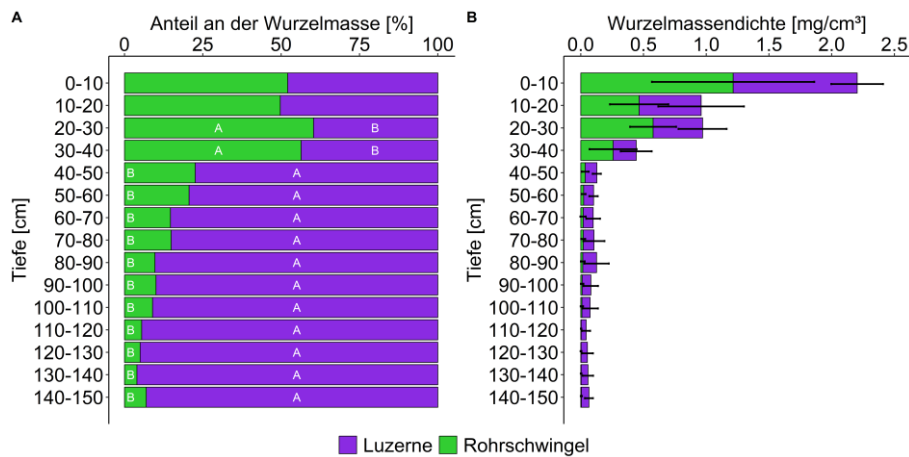


Abb. 15: Mittelwerte (n=3) der Anteile an der Wurzelmasse (A) sowie Mittelwerte und Standardabweichung (n=3) der Wurzelmasse (B) von Luzerne und Rohrschwengel in einer 50:50 Mischung in unterschiedlichen Bodentiefen. Unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$, t-Test) zwischen dem Anteil der Wurzelmasse von Luzerne und Rohrschwengel innerhalb einer Bodentiefe.

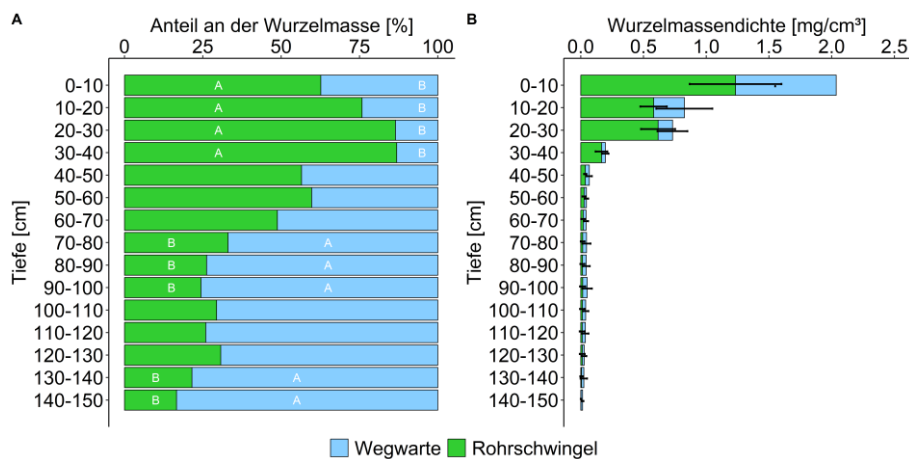


Abb. 16: Mittelwerte (n=3) der Anteile an der Wurzelmasse (A) sowie Mittelwerte und Standardabweichung (n=3) der Wurzelmasse (B) von Luzerne und Rohrschwengel in einer 50:50 Mischung in unterschiedlichen Bodentiefen. Unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$, t-Test) zwischen dem Anteil der Wurzelmasse von Luzerne und Rohrschwengel innerhalb einer Bodentiefe.

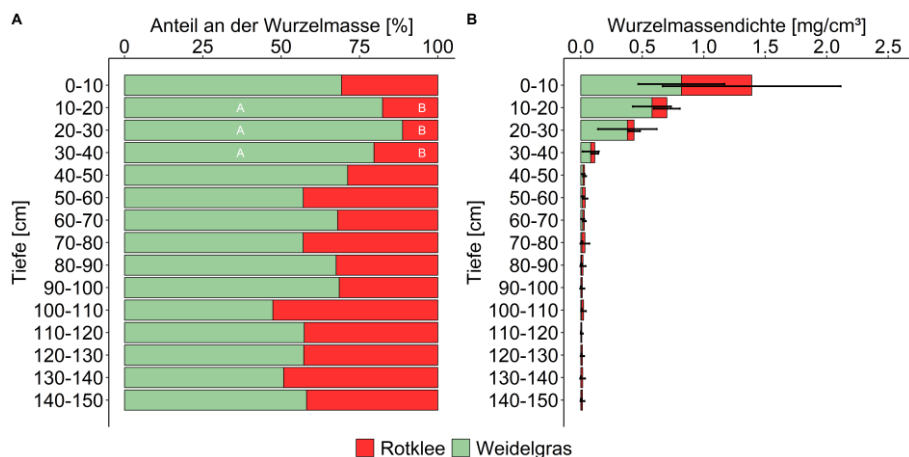


Abb. 17: Mittelwerte (n=3) der Anteile an der Wurzelmasse (A) sowie Mittelwerte und Standardabweichung (n=3) der Wurzelmasse (B) von Luzerne und Rohrschwengel in einer 50:50 Mischung in unterschiedlichen Bodentiefen. Unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$, t-Test) zwischen dem Anteil der Wurzelmasse von Luzerne und Rohrschwengel innerhalb einer Bodentiefe.

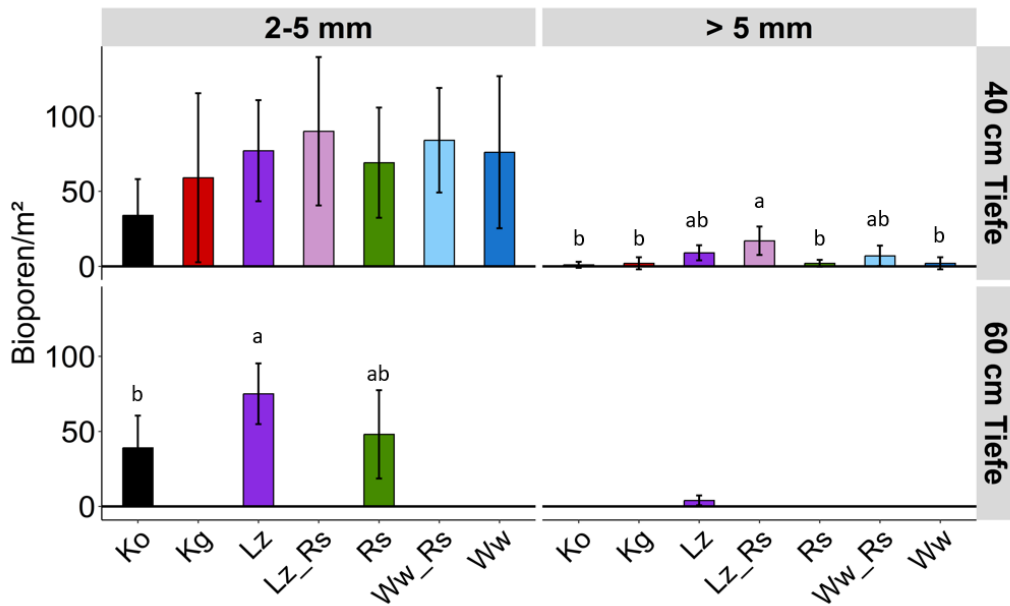


Abb. 18: Bioporendichte in Bioporen/m² 1 Jahr nach dem Umbruch der Futterpflanzen in 40 cm und 60 cm Bodentiefe für die Durchmesserklassen 2-5 mm und > 5 mm. Für die Bodentiefe 60 cm wurden nur die Varianten Kontrolle, Luzerne und Rohrschwengel untersucht. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Vorfrucht-Varianten innerhalb einer Durchmesserklasse und einer Tiefenstufe ($p \leq 0,05$ HSD-Test).

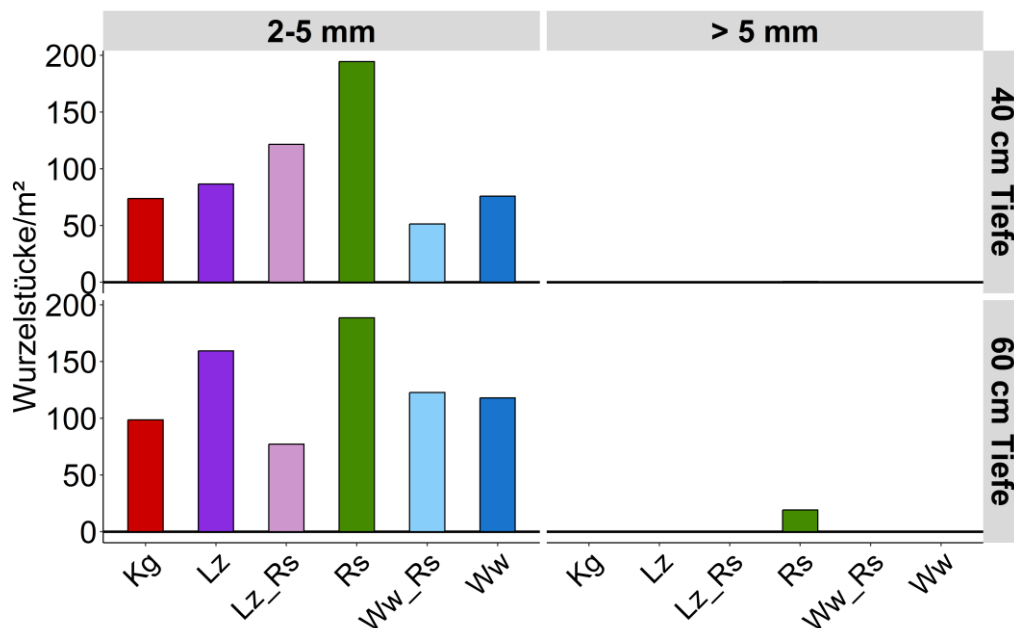


Abb. 19: Berechnete Wurzelstücke je m² der Futterpflanzen in zwei Durchmesserklassen in 40 und 60 cm Tiefe.

Für die Durchmesserklasse 2-5 mm in der Tief 40 cm lag die Bioporendichte in der Futterpflanzen-Varianten im Mittel zwischen 50 und 100 Bioporen/m² (Abb. 18). Die davon nicht signifikant verschiedene Bioporendichte der Kontroll-Variante ohne Futterbau lag im Mittel < 50 Bioporen/m². In der Durchmesserklasse > 5 mm waren die Werte deutlich geringer. Die höchsten Werte erreichte die Luzerne-Rohrschwengel-Mischung und unterschied sich signifikant von der Kontrolle, dem Rotkleegras, dem Rohrschwengel und der Wegwarte. In 60 cm Tiefe erreichte die Luzerne eine signifikant höhere

Bioporendichte als die Kontrolle für die Durchmesserklasse 2-5 mm. Für Durchmesser > 5 mm wurden von den drei untersuchten Varianten nur in der Variante mit Luzerne Bioporen gefunden.

Die aus den Wurzellängen für die entsprechenden Durchmesserklassen berechneten Wurzelstücke/m² zeigten für beide Tiefen Werte zwischen 50 und 200 für Durchmesser von 2-5 mm und damit ein deutliches Bioporengenesepotential (Abb. 19). Statistisch signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen Futterpflanzen gab es nicht. Für die Durchmesserklasse > 5 mm gab es bis auf Rohrschwengel in 60 cm Tiefe keine Wurzelstücke.

4.1.3 Mineralischer Bodenstickstoff unter den Nachfrüchten (Roman Kemper)

Unter dem Sommerweizen zeigen sich signifikante Unterschiede im mineralischen Bodenstickstoffgehalt (N_{min}) in der Tiefe 0-30 cm (Abb. 20). Zur Saat im März wies die Luzerne-Variante einen höheren N_{min} -Gehalt um etwa 10 kg/ha auf als die Varianten Rohrschwengel und Wegwarte-Rohrschwengel. Im Juni war der Gehalt in der Luzerne-Variante um ca. 15 kg/ha höher als in der Kontrolle, der Wegwarte und der Wegwarte-Rohrschwengel-Mischung. Im Juli betrug der Unterschied etwa 10 kg/ha zwischen der Luzerne-Variante, der Kontrolle, der Wegwarte und dem Rohrschwengel. In der Tiefe 30-60 cm zeigten sich leicht und teilweise signifikante erhöhte N_{min} -Gehalte in den Varianten mit legumen Vorfrüchten (Abb. 21). Dieser Trend war auch in der Tiefe 60-90 cm zu finden (Abb. 22), wobei die höchsten Gehalte in der Luzerne-Variante zu finden waren.

Unter der zweiten Nachfrucht Winterroggen gab es zu keinem Zeitpunkt signifikante Unterschiede im mineralischen Bodenstickstoffgehalt zwischen den verschiedenen Vorfrucht-Varianten (Abb. 20, Abb. 21, Abb. 22).

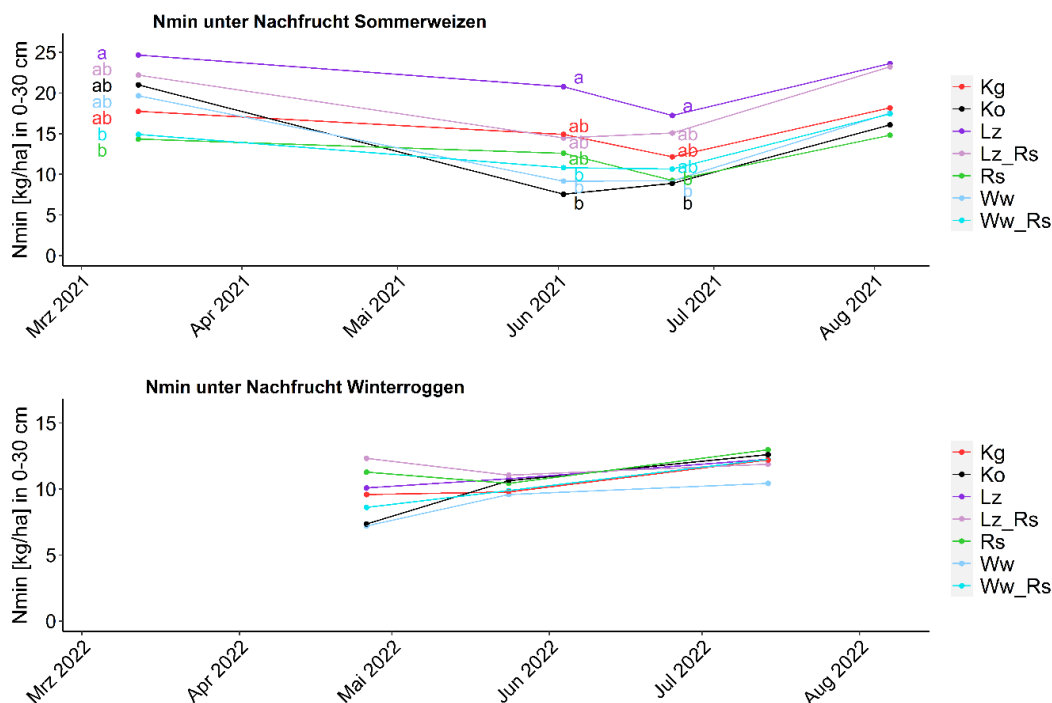


Abb. 20: Mineralischer Bodenstickstoffgehalt (N_{min}) unter den Nachfrüchten Sommerweizen in 2021 und Winterroggen in 2022 in 0-30 cm Bodentiefe in Abhängigkeit von der Vorfrucht (Ko = Kontrolle, Kg = Rotkleegras, Lz = Luzerne, Lz_Rs = Luzerne-Rohrschwengel, Rs = Rohrschwengel, Ww_Rs = Wegwarte-Rohrschwengel, Ww = Wegwarte). Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$ HSD-Test) zum jeweiligen Termin.

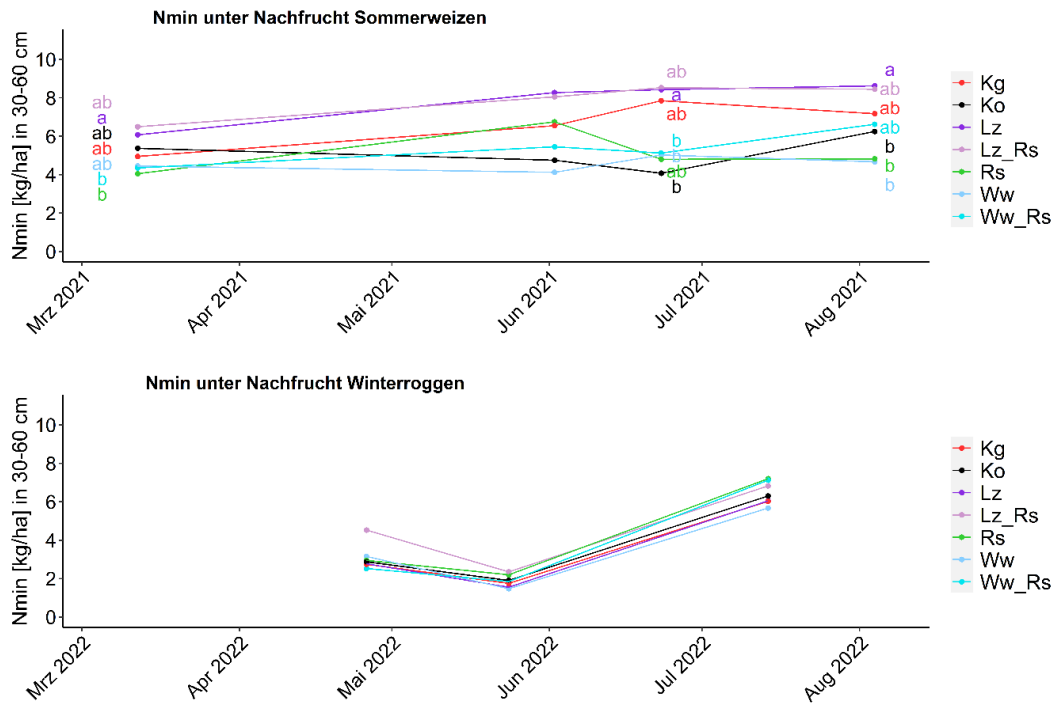


Abb. 21: Mineralischer Bodenstickstoffgehalt (N_{min}) unter den Nachfrüchten Sommerweizen in 2021 und Winterroggen in 2022 in 30-60 cm Bodentiefe in Abhängigkeit von der Vorfrucht (Ko = Kontrolle, Kg = Rotklee gras, Lz = Luzerne, Lz_Rs = Luzerne-Rohrschwinger, Rs = Rohrschwinger, Ww_Rs = Wegwarte-Rohrschwinger, Ww = Wegwarte). Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$ HSD-Test) zum jeweiligen Termin.

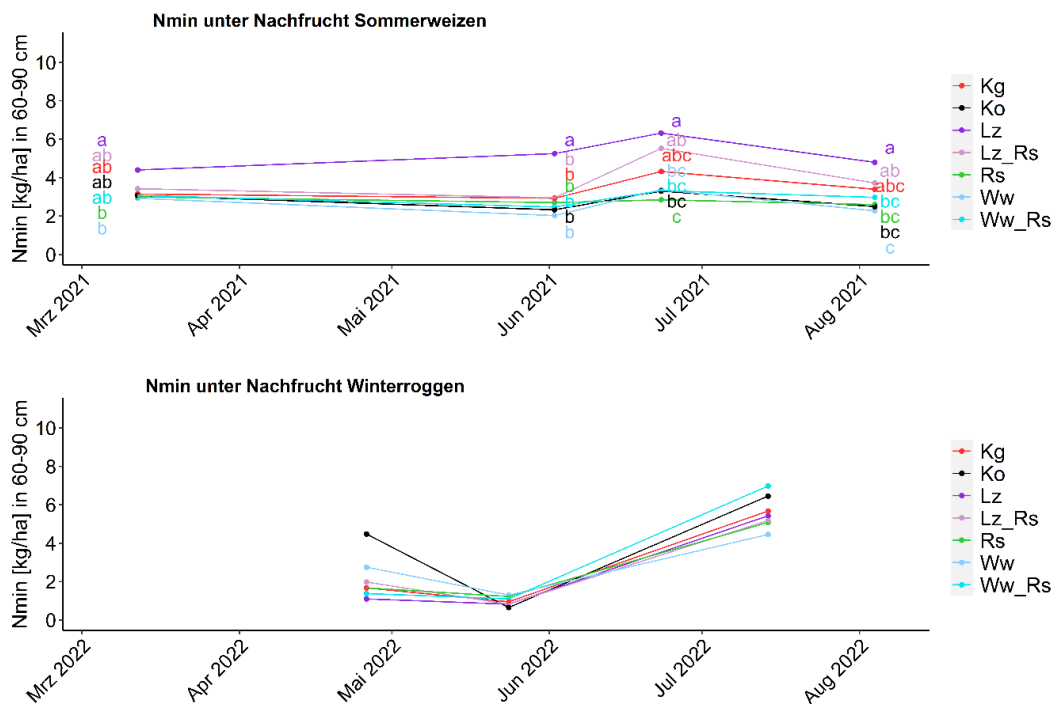


Abb. 22: Mineralischer Bodenstickstoffgehalt (N_{min}) unter den Nachfrüchten Sommerweizen in 2021 und Winterroggen in 2022 in 60-90 cm Bodentiefe in Abhängigkeit von der Vorfrucht (Ko = Kontrolle, Kg = Rotklee gras, Lz = Luzerne, Lz_Rs = Luzerne-Rohrschwinger, Rs = Rohrschwinger, Ww_Rs = Wegwarte-Rohrschwinger, Ww = Wegwarte). Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$ HSD-Test) zum jeweiligen Termin.

4.1.4 Effekte auf die Nachfrucht (Roman Kemper)

Die Kornerträge der ersten Nachfrucht Sommerweizen waren mit 1-2 t/ha insgesamt sehr gering (Abb. 23). Der höchste Kornertrag wurden nach Luzerne erreicht, dieser unterschied sich signifikant von den Weizenerträgen nach Rotklee gras, Rohrschwingel und der Wegwarte-Rohrschwingel-Mischung. Im zweiten Nachfruchtjahr erreichten die Roggenparzellen nach Luzerne und der Luzerne-Rohrschwingel-Mischung mit etwas über 2t/ha die höchsten Kornerträge, welche sich signifikant von der Kontroll-Variante unterschieden.

Die Stickstoff-Aufnahmen im gesamten oberirdischen Sommerweizen-Bestand zum Zeitpunkt der Ernte des zeigten deutliche Unterschiede mit den höchsten N-Aufnahmen nach Luzerne, welche sich signifikant von den N-Aufnahmen im Weizen nach Kontrolle, Rotklee gras und den nicht-legumen Vorfrüchten unterschied (Abb. 24). In der zweiten Nachfrucht Winterroggen wurden die höchsten N-Aufnahmen nach den legumen Vorfrüchten und Rohrschwingel gefunden, welche signifikant von der N-Aufnahme im Winterroggen in der Kontroll-Variante abwichen.

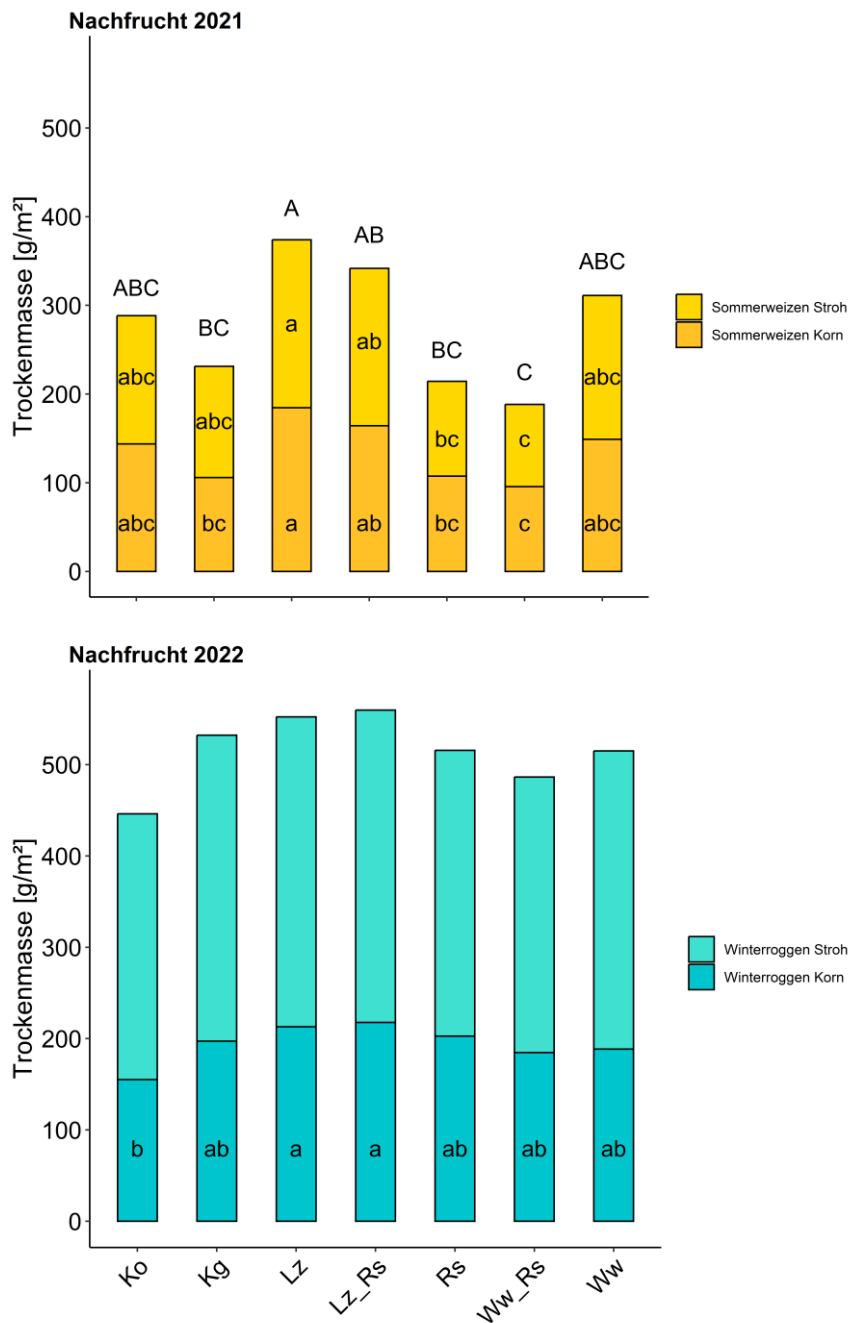


Abb. 23: Mittelwerte der Spross-Trockenmasse (n=4) der Nachfrüchte Sommerweizen in 2021 und Winterroggen in 2022 in Abhängigkeit von der Vorfrucht (Ko = Kontrolle, Kg = Rotkleegras, Lz = Luzerne, Lz_Rs = Luzerne-Rohrschwengel, Rs = Rohrschwengel, Ww_Rs = Wegwarte-Rohrschwengel, Ww = Wegwarte). Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$ HSD-Test) zwischen den Varianten innerhalb der Erntefraktion Korn oder Stroh. Unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$ HSD-Test) der Gesamttrockenmasse zwischen den Varianten.

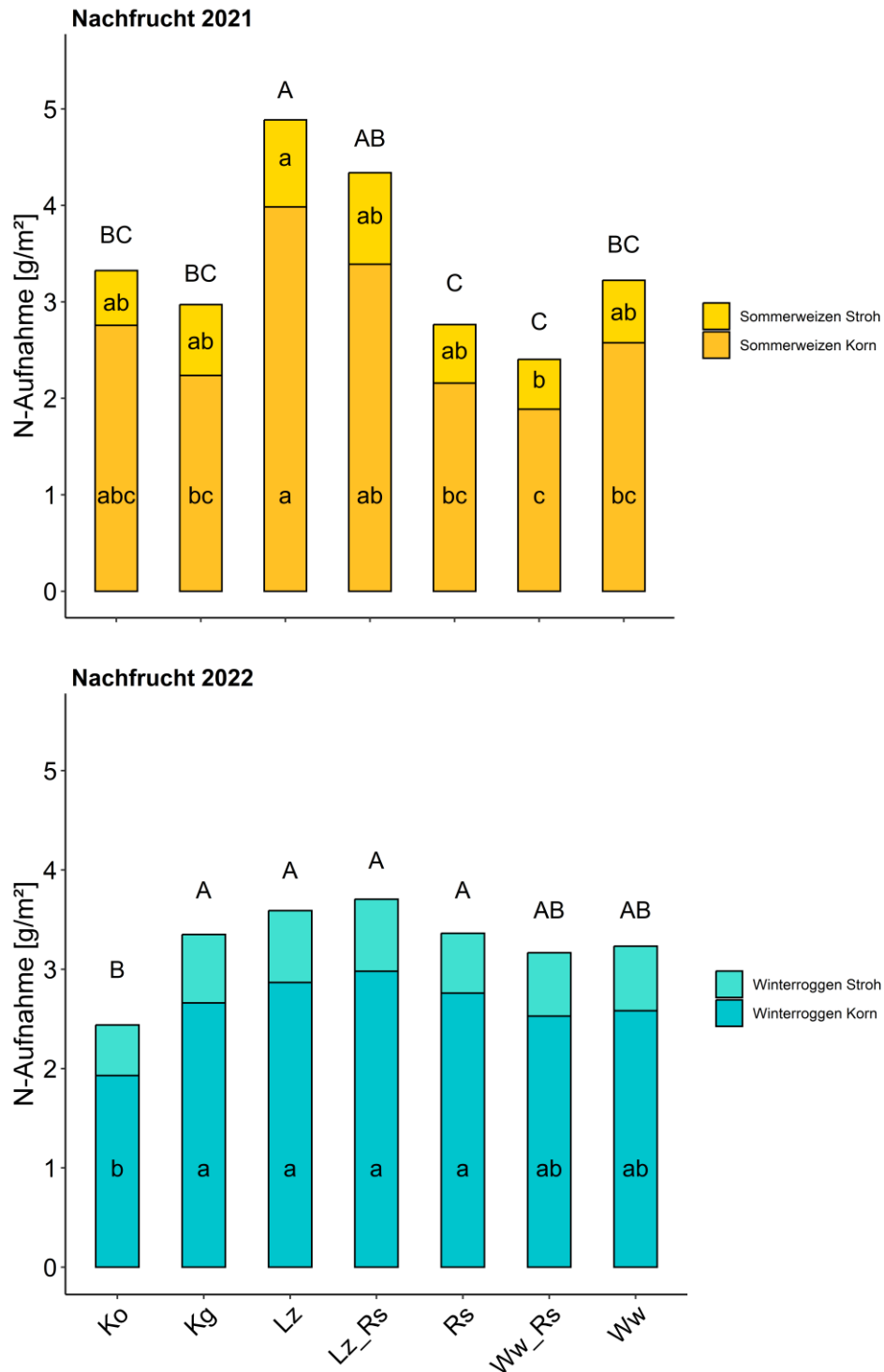


Abb. 24: Mittelwerte der N-Aufnahme im Spross (n=4) der Nachfrüchte Sommerweizen in 2021 und Winterroggen in 2022 in Abhängigkeit von der Vorfrucht (Ko = Kontrolle, Kg = Rotkleegrass, Lz = Luzerne, Lz_Rs = Luzerne-Rohrschwinger, Rs = Rohrschwinger, Ww_Rs = Wegwarte-Rohrschwinger, Ww = Wegwarte). Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$ HSD-Test) zwischen den Varianten innerhalb der Erntefraktion Korn oder Stroh. Unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$ HSD-Test) der gesamten N-Aufnahme im Spross zwischen den Varianten.

Tabelle 5: Feldaufgang, Ertragskomponenten sowie Blattflächenindex (BFI) der Nachfrüchte Sommerweizen und Winterroggen in Abhängigkeit von der Vorfrucht (Ko = Kontrolle, Kg = Rotklee gras, Lz = Luzerne, Lz_Rs = Luzerne-Rohrschwingel, Rs = Rohrschwingel, Ww_Rs = Wegwarte-Rohrschwingel, Ww = Wegwarte). Unterschiedliche Kleinbuchstaben Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$ HSD-Test) zwischen den Varianten innerhalb eines Jahres.

Jahr	Nachfrucht	Vorfrucht	Feldaufgang (Pflanzen/m ²)	ährentragende Halme/m ²	TKM (g) bei 86% TS	Körner/Ähre	BFI zum Schossen	BFI zur Blüte
2021	SW	Ko	414	397	37,8 ab	9,7 abc	0,66 ab	0,55 bcd
2021	SW	Kg	410	342	36,6 ab	8,6 abc	0,81 a	0,57 bcd
2021	SW	Lz	397	383	40,2 a	11,9 a	0,81 a	0,69 a
2021	SW	Lz_Rs	395	389	38,8 ab	10,9 ab	0,73 ab	0,61 ab
2021	SW	Rs	415	379	36,5 ab	7,8 bc	0,61 ab	0,49 d
2021	SW	Ww_Rs	431	383	36,0 b	6,9 c	0,53 b	0,52 cd
2021	SW	Ww	409	395	38,8 ab	9,8 abc	0,69 ab	0,59 bc
2022	WR	Ko	501	471	26,5	12,6	0,95	1,23
2022	WR	Kg	533	571	28,0	12,8	1,21	1,52
2022	WR	Lz	535	513	27,3	15,4	0,95	1,52
2022	WR	Lz_Rs	523	540	27,5	14,7	1,07	1,35
2022	WR	Rs	504	541	27,9	13,5	0,93	1,37
2022	WR	Ww_Rs	509	551	27,6	12,5	0,92	1,27
2022	WR	Ww	474	528	27,1	13,2	0,97	1,27

Beim Sommerweizen gab es signifikante Unterschiede in den Ertragskomponenten Tausendkornmasse und den Körnern/Ähre sowie signifikante Unterschiede im Blattflächenindex (Tabelle 5). Höchste Werte wurden hierbei für die Luzerne- und die Luzerne-Rohrschwingel-Variante, niedrigste Werte für die Rohrschwingel- und die Wegwarte-Rohrschwingel-Variante gefunden. Beim BFI hatte die Klee grasvariante genau so hohe Werte wie die Luzernevariante, blieb aber bei den anderen in der Tabelle aufgeführten ertragsbestimmenden Parameter hinter den Varianten mit Luzerne zurück. Für die zweite Nachfrucht Winterroggen gab es keine signifikanten Unterschiede für die in Tabelle 5 dargestellten Parameter.

Für die Wurzellänge der Nachfrucht Winterroggen zeigten sich zum Schossen höhere Werte im Oberboden nach Vorfrüchten mit Rohrschwingel und in der Wegwarte-Variante (Abb. 25). Im Unterboden wurden die höchsten Wurzellängen nach Luzerne und der Kontrolle gefunden. Zur Blüte (Abb. 26) wurden im Oberboden die höchsten Werte nach den Mischungen von Luzerne oder Wegwarte mit Rohrschwingel und die geringsten nach Rotklee gras erfasst. Im Unterboden erreichte der Roggen nach der Luzerne-Variante und der Luzerne-Rohrschwingel-Variante die höchsten Wurzellängen, die geringsten Werte in der Wegwarte-Rohrschwingel-Variante. Nur hier konnten signifikante Unterschiede in der Wurzellänge des Roggens in Abhängigkeit von der Vorfrucht, zwischen der Luzerne- und der Wegwarte-Rohrschwingel-Variante, gefunden werden.

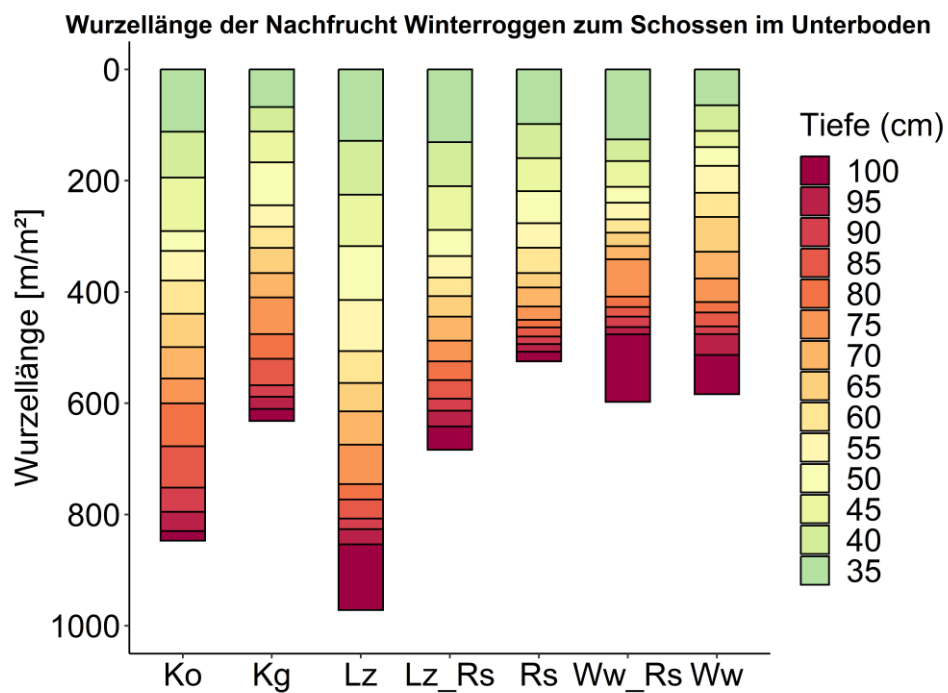
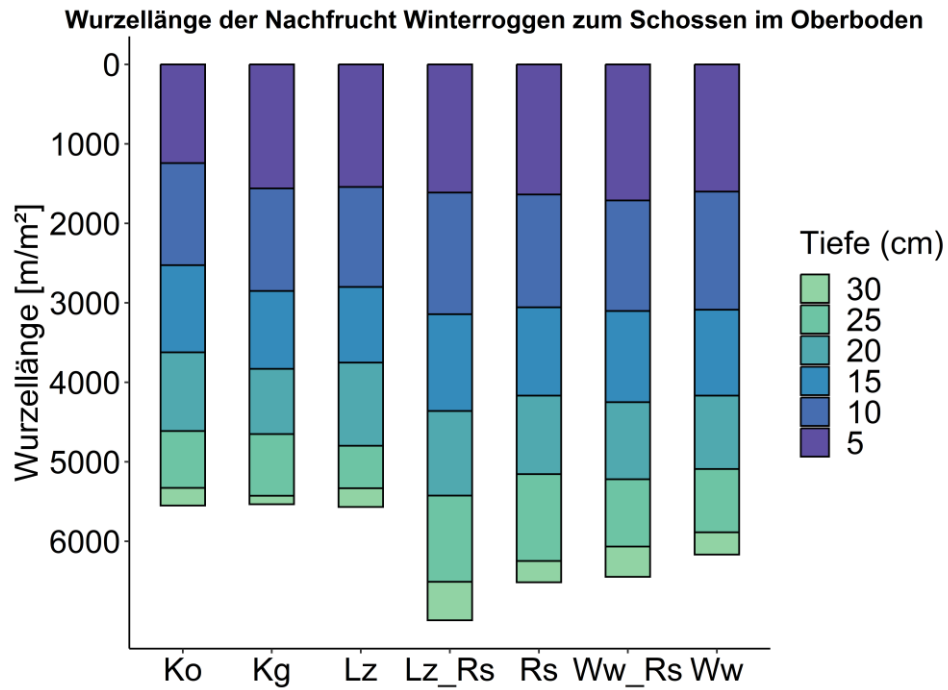


Abb. 25: Wurzellänge der Nachfrucht Winterroggen in 2022 zum Schossen im Oberboden (oben) und im Unterboden (unten) in 5 cm Tiefenschritten in Abhängigkeit von der Vorrucht (Ko = Kontrolle, Kg = Rotklee gras, Lz = Luzerne, Lz_Rs = Luzerne-Rohrschwinger, Rs = Rohrschwinger, Ww_Rs = Wegwarte-Rohrschwinger, Ww = Wegwarte). Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$ HSD-Test) zwischen den Varianten für die gesamte Wurzellänge.

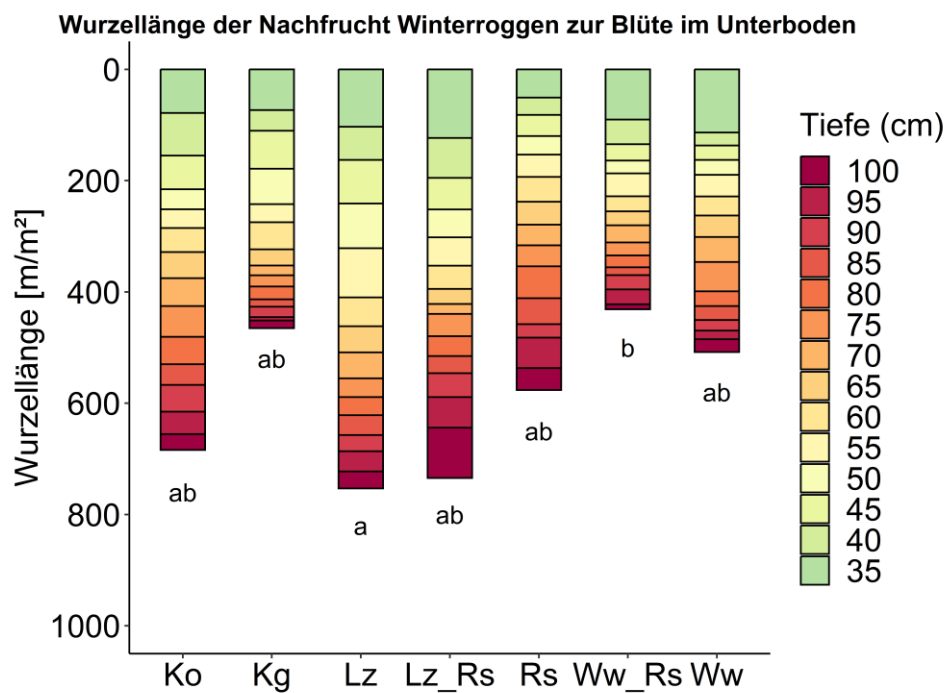
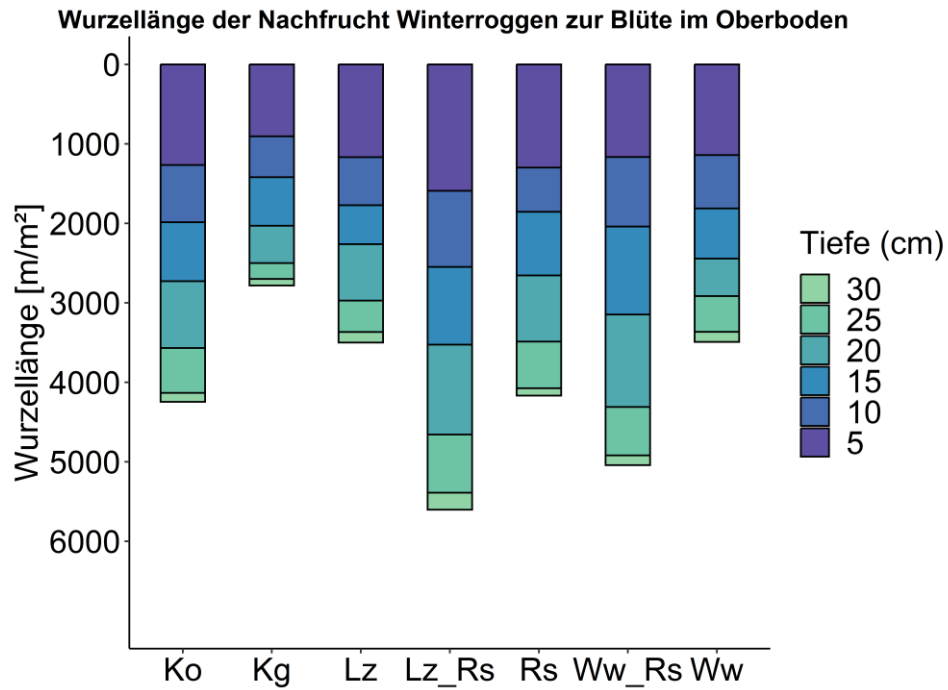


Abb. 26: Wurzellänge der Nachfrucht Winterroggen in 2022 zur Blüte im Oberboden (oben) und im Unterboden (unten) in 5 cm Tiefenschritten in Abhängigkeit von der Vorfrucht (Ko = Kontrolle, Kg = Rotklee gras, Lz = Luzerne, Lz_Rs = Luzerne-Rohrschwengel, Rs = Rohrschwengel, Ww_Rs = Wegwarte-Rohrschwengel, Ww = Wegwarte). Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$ HSD-Test) zwischen den Varianten für die gesamte Wurzellänge.

4.1.5 Wurzelartentrennung (Dr. Nicole Legner)

Die Endergebnisse der Wurzelartentrennung wurden bereits im Kapitel 4.1.1 dargestellt. Hier werden die methodischen Teilergebnisse im Detail beschrieben. Wurzelproben der Reinsaatens Rohrschwengel, Luzerne, Wegwarte, Rotklee, Deutsches Weidelgras, Welsches Weidelgras und Bastardweidelgras, sowie der Gemenge Rohrschwengel-Luzerne, Rohrschwengel-Wegwarte sowie Rotklee-Weidelgras (alle drei Arten) wurden mit einer Zentrifugalmühle vermahlen (Retsch, ZM 200). Die vermahlenden Proben wurden mit dem Fourier-Transform-Infrarot (FTIR) Spektrometer mit ATR-Einheit (Bruker Optics, Ettlingen) weiter analysiert. Jede Probe wurde mit dem FTIR-ATR Spektrometer fünf Mal mit jeweils 32 Scans bei den Wellenzahlen 4000-400 cm^{-1} gemessen (Software Opus, Version 7.2, Bruker Optics).

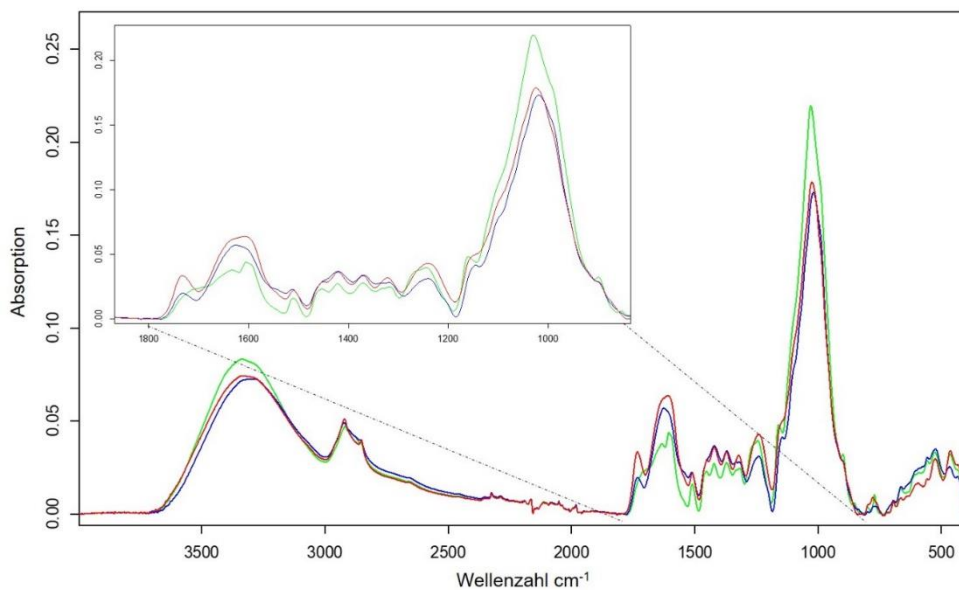


Abb. 27 : FTIR-ATR-Spektren der getrockneten und vermahlenden Wurzelproben der Reinsaatens Rohrschwengel (grün), Luzerne (blau) und Wegwarte (rot). Mittelwertspektren wurden grundlinienkorrigiert (Gummibandmethode).

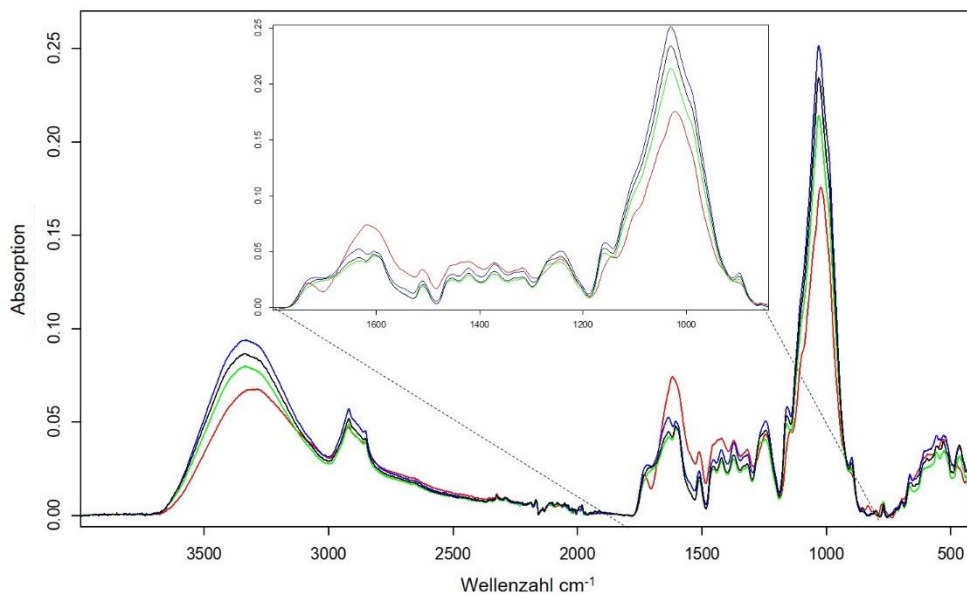


Abb. 28: FTIR-ATR-Spektren der getrockneten und vermahlenden Wurzelproben der Reinsaatens Rotklee (rot), Deutsches Weidelgras (grün), Welsches Weidelgras (blau) und Bastardweidelgras (schwarz). Mittelwertspektren wurden grundlinienkorrigiert (Gummibandmethode).

Die Absorptionshöhe und die Peakform der Spektren unterscheiden sich bei den Arten (Abb. 27 und Abb. 28). Rohrschwengel zeigt einen deutlich höheren Peak bei der Wellenzahl 3340 und 1030 cm^{-1} , während der Peak bei 1730 cm^{-1} im Gegensatz zu den beiden anderen Arten nicht vorhanden ist (Abb. 27). Luzerne und Wegwarte zeigen einen Peak bei 1627 cm^{-1} bzw. 1610 cm^{-1} , währenddessen Rohrschwengel an dieser Stelle zwei Peaks zeigt (1634 und 1600 cm^{-1}). Bei Luzerne und Wegwarte ist der größte Peak leicht versetzt mit 1019 cm^{-1} bzw. 1024 cm^{-1} im Vergleich zu dem Peak von Rohrschwengel (Abb. 27). Die Peakform der Arten unterscheidet sich besonders bei den Wellenzahlen 1700 bis 800 cm^{-1} (Zoombereich in Abb. 27). Bei Rotklee und den drei Grasarten (Abb. 28) sieht man deutlich, dass sich der Rotklee stark von den Grasarten unterscheidet. Rotklee weist bei 1700 cm^{-1} ein deutliches "Tal" auf, das die drei Grasarten nicht zeigen. Der Peak bei 1620 cm^{-1} ist auch nur beim Rotklee vertreten, während die drei Grasarten dies nicht zeigen (Abb. 28).

Die Spektren der Reinsaaten wurden mit Hilfe der Auswertung "Clusteranalysen" auf Heterogenität geprüft. Die Clusteranalysen belegen, dass man die Arten sehr gut voneinander unterscheiden kann (Abb. 29 bis Abb. 31). Die interspezifische Heterogenität ist deutlich höher als die intraspezifische Heterogenität und dies lässt eine Artunterscheidung im Gemenge zu. Bei Rohrschwengel und Luzerne (Abb. 29) ist die interspezifische Heterogenität mit 64,72 sehr hoch. Die intraspezifische Heterogenität liegt bei 1,95 für Rohrschwengel und 9,42 für Luzerne. Rohrschwengel und Wegwarte weisen eine interspezifische Heterogenität von 49,93 und eine intraspezifische von 1,95 (Luzerne) und 5,04 (Wegwarte) auf (Abb. 30). Bei der Klee-gras-Mischung (Abb. 31) ist die interspezifische Heterogenität mit 8,16 deutlich niedriger, was an der geringeren Probenanzahl liegt. Aber auch hier ist die intraspezifische Heterogenität viel niedriger mit 0,86 bei Rotklee, 0,305 beim Deutschen Weidelgras, 0,301 beim Bastard-Weidelgras und 0,157 beim Welschen Weidelgras (Abb. 31). Die Arten Rohrschwengel und Luzerne, Rohrschwengel und Wegwarte sowie Rotklee und die drei Grasarten lassen sich sehr gut voneinander trennen.

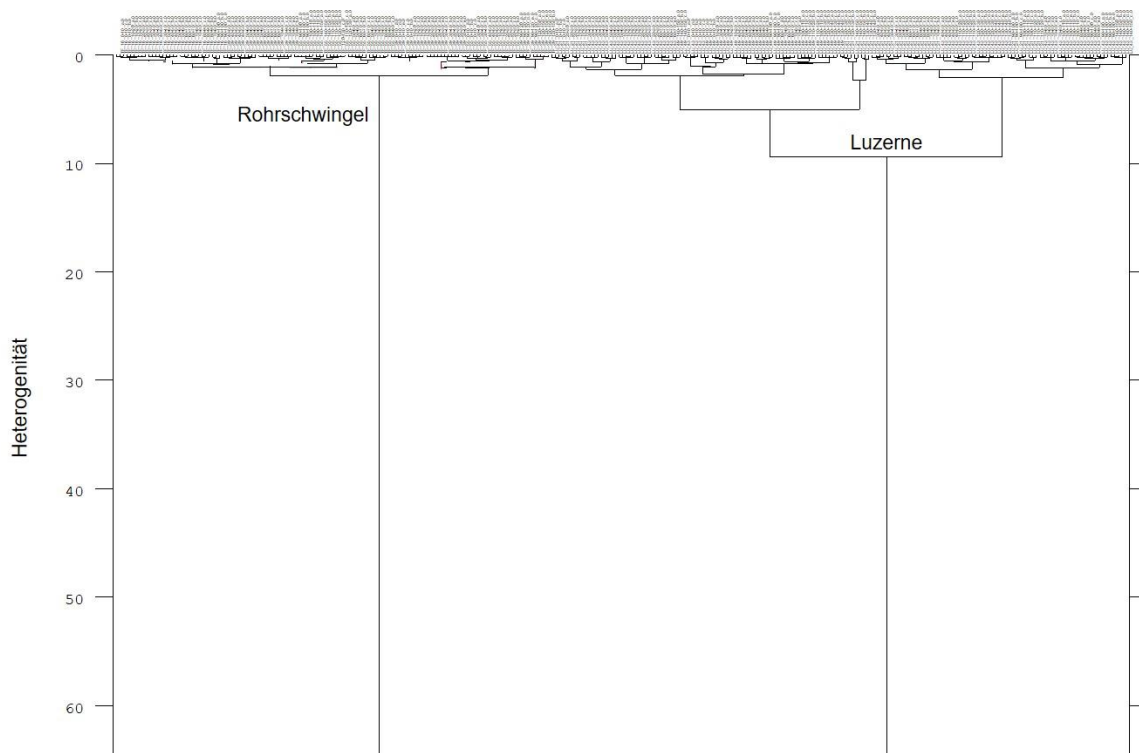


Abb. 29: Clusteranalysen der Reinsaat-Spektren von Rohrschwengel und Luzerne, die mit der 2. Ableitung und Vektornormierung, sowie Ward's Algorithmus und Euklidische Distanz bei reduziertem Frequenzbereich ($3750-2750\text{cm}^{-1}$, $1800-850\text{cm}^{-1}$) berechnet wurden.

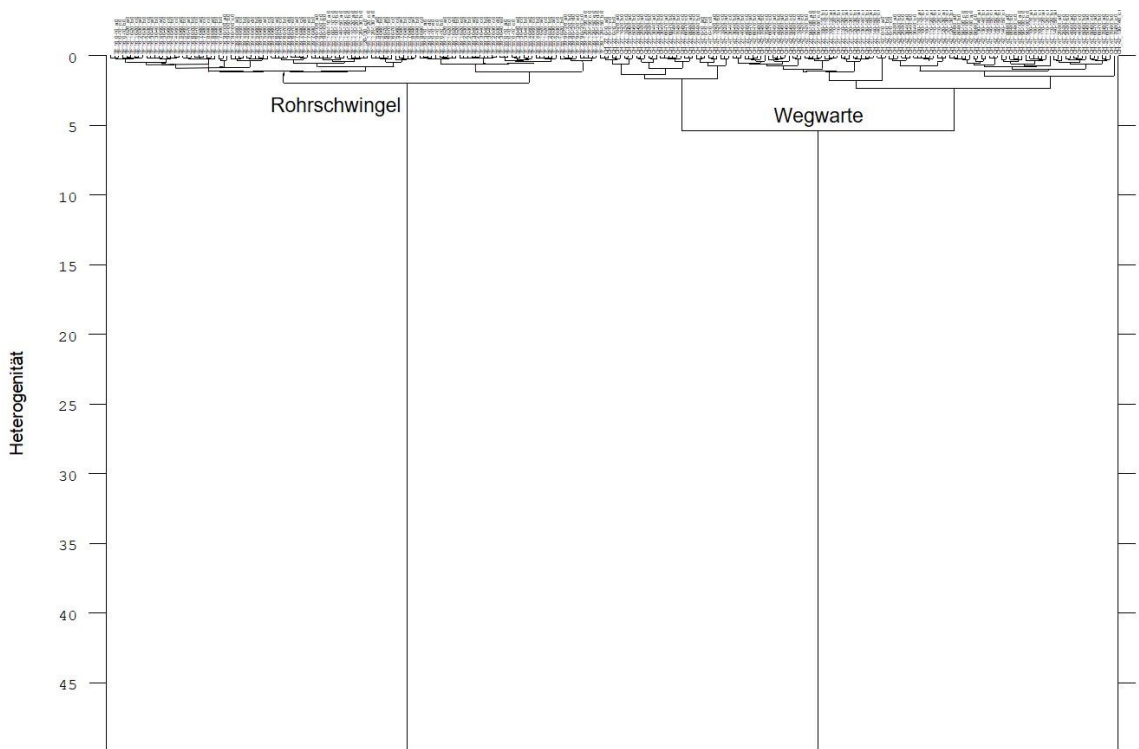


Abb. 30: Clusteranalysen der Reinsaat-Spektren von Rohrschwengel und Wegwarte, die mit der 2. Ableitung und Vektornormierung, sowie Ward's Algorithmus und Euklidische Distanz bei reduziertem Frequenzbereich ($3750-2750\text{cm}^{-1}$, $1800-850\text{cm}^{-1}$) berechnet wurden.

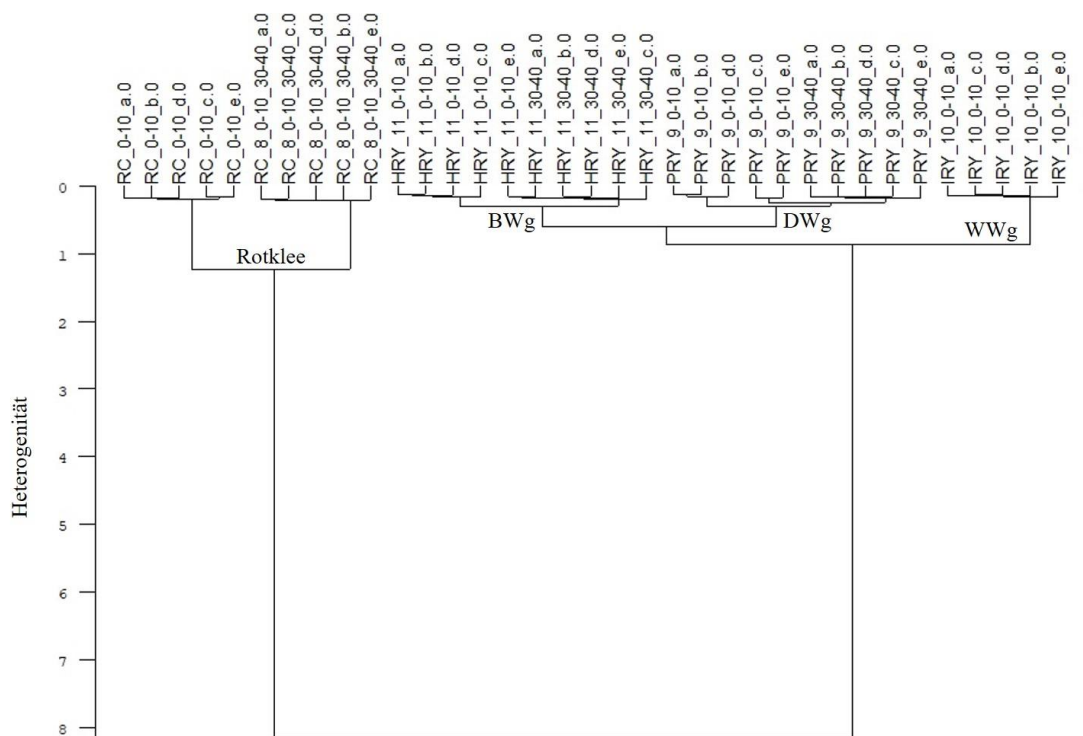


Abb. 31: Clusteranalysen der Reinsaat-Spektren von Rotklee, Deutsches Weidelgras (DWg), Welsches Weidelgras (WWg) und Bastardweidelgras (BWg), die mit der 2. Ableitung und Vektornormierung, sowie Ward's Algorithmus und Euklidische Distanz bei reduziertem Frequenzbereich ($3750-2750\text{cm}^{-1}$, $1800-850\text{cm}^{-1}$) berechnet wurden.

Für die Quantifizierung der Wurzeln im Gemenge benutzt man die Reinsaaten um "künstliche Mischungen" der Gemenge-Partner zu erstellen. Für ein 2-Art-Gemenge werden 55 künstliche Mischungen erstellt, von denen 35 in die Kalibrierung und interne Kreuzvalidierung eingehen. Die restlichen 20 Mischungen werden für eine externe Validierung verwendet. Die Kalibrationsmischungen umfassen den Bereich von 0% bis 100% Anteile für jede Art, dadurch wird der Kalibrationsbereich vollständig abgedeckt. Mit den Kalibrationsmischungen wird ein Model mit Quant 2 (Opus, Bruker Optics, Ettlingen) erstellt. Diese von Quant 2 erstellten Modelle basieren auf multivariaten Kalibrationen und der Methode der PLS-Regression (partial least square). Dadurch werden Korrelationen zwischen der Absorption der Infrarotstrahlen und der Konzentration einer Komponente im Mehrkomponentensystem erstellt. Die Modelle können mit der Quant 2 Software durch die Optimierungsfunktion verbessert werden. Die Optimierung sucht diejenige Datenvorbehandlung und diejenigen Wellenzahlbereiche für das Model, die am besten die tatsächlichen Mischungen der Kalibrationsproben erklären. Es werden sechs bis zwölf vorgeschlagene Modelle zusätzlich mit einer externen Validierung überprüft (auch diese bestehen aus künstlichen Mischungen, deren Mischungsverhältnis bekannt ist). Bei beiden Validierungen, der internen Kreuzvalidierung und der externen Validierung, werden statistische Werte ausgegeben anhand derer die Qualität der Modelle verglichen werden können.

Zur Beurteilung werden folgende Größen betrachtet:

- RPD: residual prediction deviation – Verhältnis der Standardabweichung und Standardfehler der Vorhersage → je höher desto besser, wobei Werte zwischen 3 bis 5 als zufriedenstellend und Werte zwischen 5 und 10 als gut bis sehr gut gelten
- RMSEP bzw. RMSECV: root mean square error of prediction bzw. root mean square error of cross validation – Wurzel des mittleren Fehlerquadrates der Vorhersage bzw. der Kreuzvalidierung → je niedriger desto besser
- Bias: Durchschnittswert der Abweichung, auch 'systematischer Fehler' → je kleiner desto besser, möglichst nahe bei 0
- Rang: Anzahl der PLS-Faktoren → je niedriger desto besser
- R^2 : Bestimmungskoeffizient in % – gibt an, wie groß die Abweichung zwischen den wahren und den vorhergesagten Komponentenwerten ist → je näher an 100% desto besser
- Steigung: Steigung der Gerade der Grafik 'Vorhersage vs Wahr' → je näher an 1 desto besser

Des Weiteren ist es möglich, die Qualität der Modelle anhand der Auswertung der Gemenge-Spektren (Artanteile unbekannt) zu überprüfen. Werden die Gemenge-Spektren in "Quant 2 Analyse" mit den ausgewählten Modellen berechnet, entsteht eine Liste mit prozentualen Angaben für jede Art des Gemenges. Die Software markiert dabei Werte, die außerhalb des Kalibrationsbereiches ("Außen") liegen und Werte, die aufgrund spektraler Ausreißer ("Ausreißer") auffallen.

Alle berechneten Modelle haben einen sehr hohen R^2 bei geringem Bias, mit Steigungen nahe an 1 und guten bis sehr guten R^2 und RPD-Werten (Tabelle 6).

Tabelle 6: Details und statistische Werte der Modelle für Rohschwingel-Luzerne, Rohschwingel-Wegwarte und die Kleegrasmischung für das Jahr 2021. Abkürzungen: RS – Rohschwingel, LU – Luzerne, WW – Wegwarte, RK – Rotklee, GR – Gras (stellvertretend für die drei Grasarten Deutsches Weidelgras, Welchesches Weidelgras und Bastard-Weidelgras), 1Ab – 1. Ableitung, MSC – multiplikative Streukorrektur, SNV – Vektornormierung, Außen – Außenwerte (in % von der Summe der zugehörigen gemessenen Spektren angegeben), Ausreißer – spektrale Ausreißer (in % von der Summe der zugehörigen gemessenen Spektren angegeben). Bedeutung und Abkürzungen der statistischen Werte werden im Text erläutert.

		RS - LU	RS - WW	RK - GR
Datenvorbehandlung		MSC	MSC	1Ab + SNV
Frequenzbereiche [cm ⁻¹]		3702 - 3328	3702 - 3328	3330 - 2779
		1781 - 1545	3020 - 2779	1782 - 1018
		1202 - 1018	1782 - 1545	
			1302 - 1018	
Kalibrierung/	Rang	3	1	7
interne Validierung	R ²	98.42	98.33	98.76
	RPD	7.96	7.74	9.00
	RMSECV	3.75	3.85	3.32
	Offset a	0.809	1.181	0.911
	Offset b	0.916	1.133	0.764
	Steigung	0.98	0.977	0.983
externe Validierung	RPD	6.14	7.10	8.24
	RMSEP	4.62	3.76	3.13
	Offset a	0.876	0.378	-0.189
	Offset b	0.693	1.28	-0.029
	Steigung	1.006	0.983	1.002
Gemenge	Außen	8.78	0	23.03
	Ausreißer	50.73	8.54	70.79

Die Grafik Vorhersage vs. Wahr zeigt bei allen Modellen deutlich die sehr gute Übereinstimmung der vorgesagten Werte zu den wahren Werten (als Beispiel Rohschwingel-Luzerne Gemenge, Abb. 32, Modelldetails in Tabelle 6). Die entsprechenden Grafiken der anderen Modelle bzw. Gemengepartner sind in einem vergleichbaren Zustand.

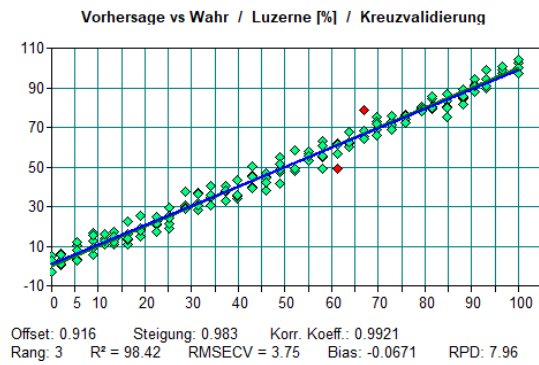
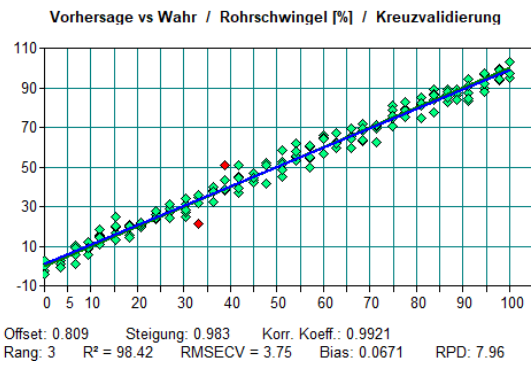


Abb. 32: Vorhersage zu tatsächlichen Werten der künstlichen Mischungen des Rohrschwinger- Luzerne-Model von 2021 (in %). Die tatsächlichen Werte bzw. Regression sind in grün dargestellt, die vorhergesagte Regression in blau.

Es konnten alle Gemengeproben ausgewertet werden. Diese Ergebnisse geben in % den Anteil der Arten pro Tiefenschicht im Gemenge an und wurden an die Arbeitsgruppe INRES (AOL) der Universität Bonn zur weiteren Auswertung verschickt.

4.1.6 Eindringwiderstand und Bodenwassergehalt (Dr. Oliver Schmittmann)

Der Versuch in Darmstadt wurde an zwei Terminen beprobt.

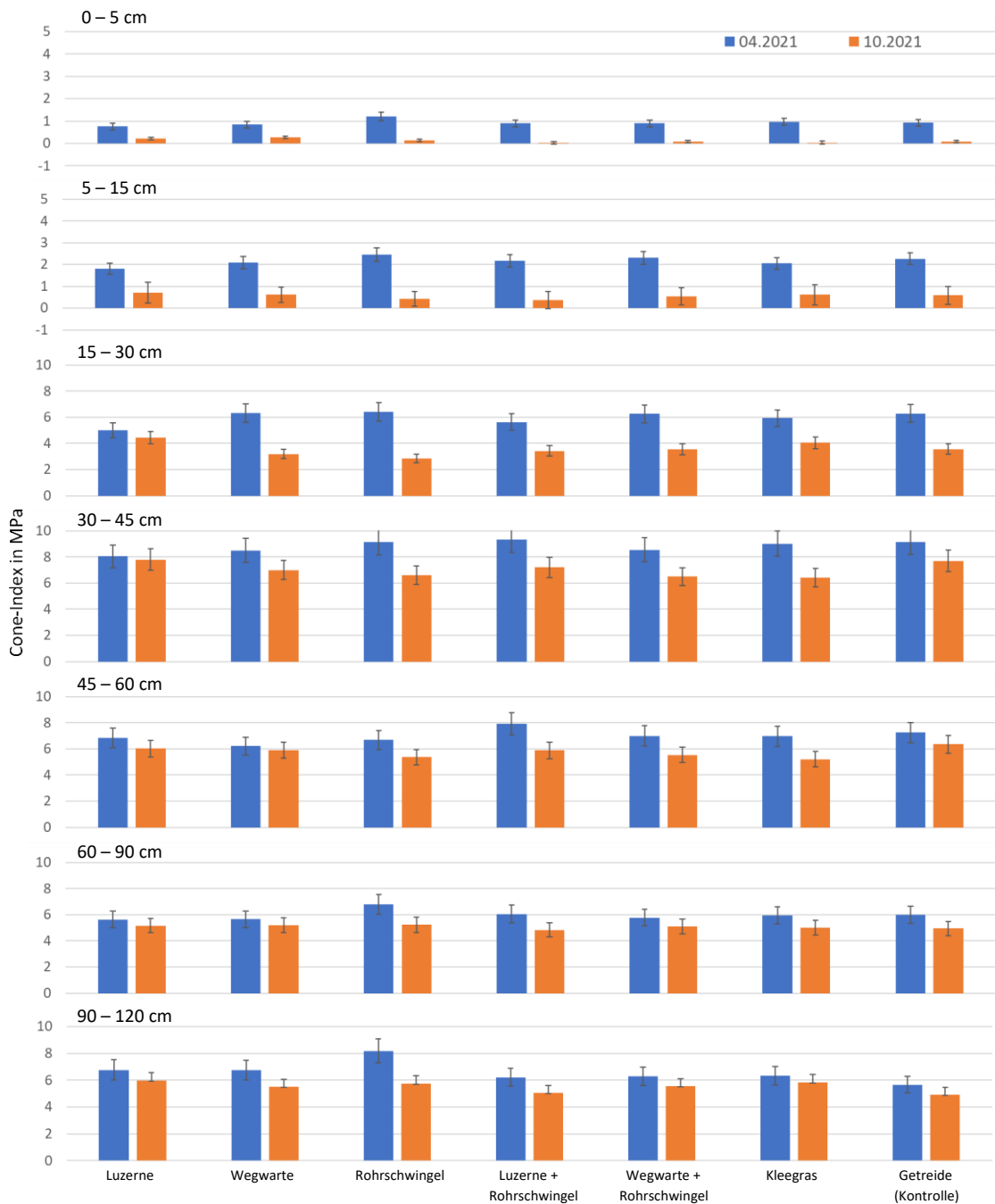


Abb. 33: Vertikale Verteilung der Eindringwiderstände als Cone-Index im Feldversuch in Darmstadt in den Tiefenstufen 0 - 5 cm, 5 - 15 cm, 15 – 30 cm, 30 – 45 cm, 45 – 60 cm 60 – 90 cm und 90 – 120 cm. Bestimmt im April und Oktober 2021.

Die Eindringwiderstände (Abb. 33) bei allen Varianten variieren im Bereich bis 15 cm Tiefe gering. Im Bereich 15 bis 60 cm sind deutliche, aber nicht statistisch signifikante Unterschiede innerhalb der Varianten zu erkennen. In der Luzerne-Variante wurden im Bereich bis 60 cm im Frühjahr (blau) die geringsten Eindringwiderstände festgestellt. In der Rohrschwengel-Parzelle waren im Frühjahr die Eindringwiderstände im Vergleich zu den anderen Varianten in allen Tiefenstufen am höchsten. Im Herbst waren die Eindringwiderstände im Bereich 15 – 120 cm am höchsten (Ausnahme 60 – 90 cm). Bei der Erhebung im Herbst war der Eindringwiderstand in fast allen Tiefen geringer als im Frühjahr.

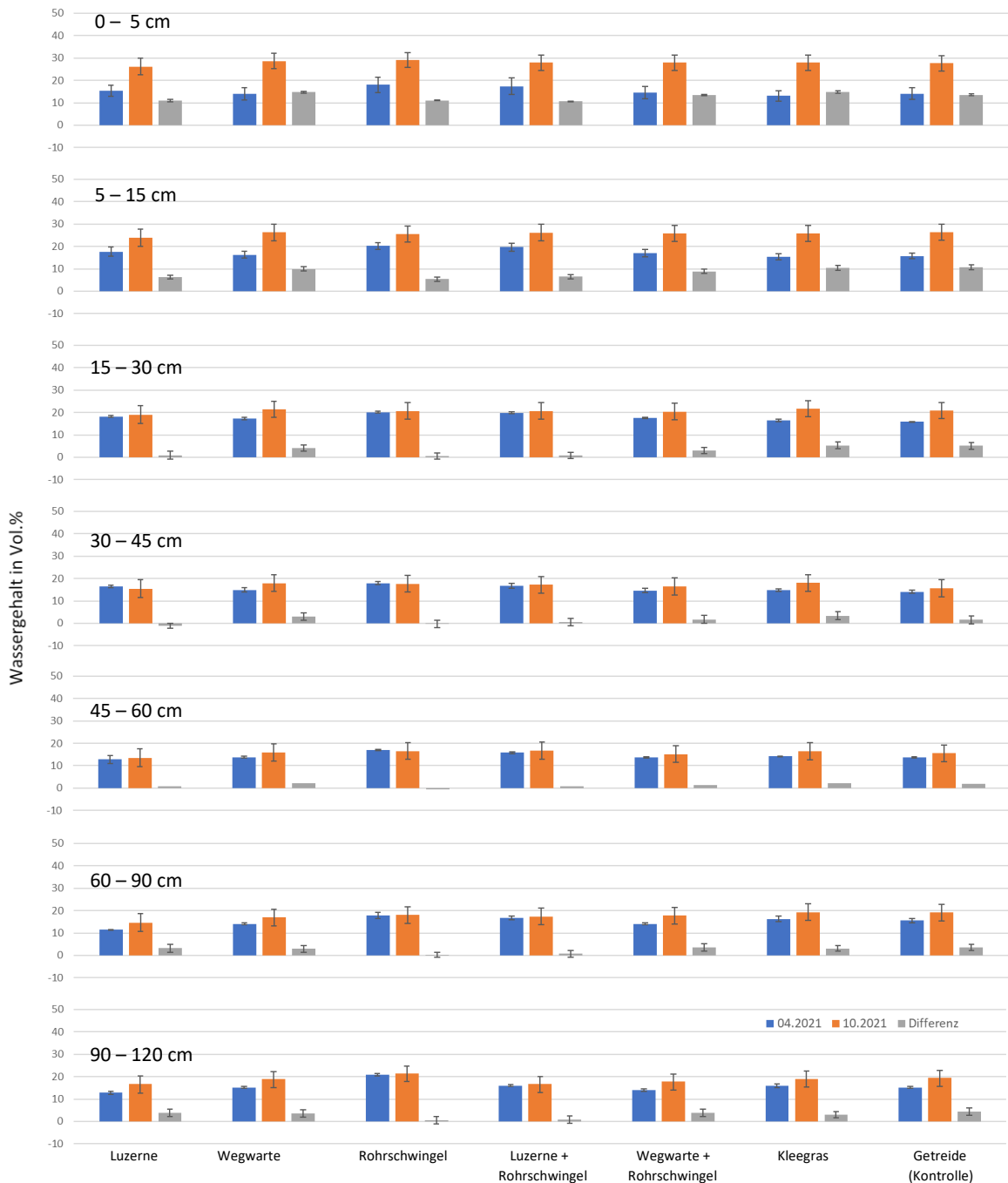


Abb. 34: Vertikale Verteilung des volumetrischen Wassergehaltes und deren Differenz im Feldversuch in Darmstadt in den Tiefenstufen 0 - 5 cm, 5 - 15 cm, 15 - 30 cm, 30 - 45 cm, 45 - 60 cm, 60 - 90 cm und 90 - 120 cm. Bestimmt im April und Oktober 2021.

In allen Varianten und Tiefenzonen hatte der Wassergehalt (Abb. 34) zwischen April und Oktober 2021 zugenommen (Ausnahme: Luzerne in Zone 30 - 45 cm). Bis ca. 45 cm war der Unterschied der Wassergehalte zwischen den Varianten relativ gering und schwankte zwischen 2 und 3 Volumen-%.

4.1.7 Bodenphysik (Dr. Marc-Oliver Göbel und Prof. Dr. Stephan Peth)

Die Analyse der Korngrößenverteilung zeigt für alle Anbauvarianten des Standortes Oberfeld konsistent mit der Tiefe zunehmende Sandgehalte sowie abnehmende Schluff- und Tongehalte (Abb. 35).

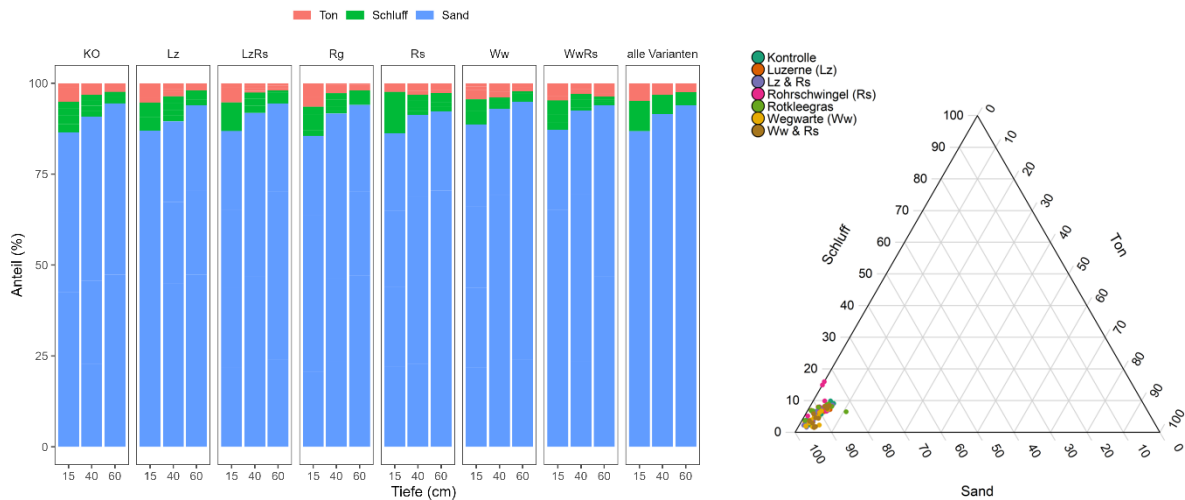


Abb. 35: Korngrößenverteilung für den Standort Oberfeld, differenziert nach Anbauvariante und Bodentiefe (links) und Darstellung im Körnungsdreieck (rechts).

Die Sandgehalte der untersuchten Bodenproben liegen generell $> 80\%$. Damit lässt sich die Bodenart als reiner Sand (Ss) bzw. als schwach lehmiger (Sl2) bis schwach toniger Sand (St2) bezeichnen (Abb. 35) (Ad-hoc-AG Boden, 2005). Insgesamt ergeben sich für die Parzellen aller Anbauvarianten relativ homogene Texturverhältnisse.

Die Analysen der ungestörten Bodenproben deuten auf eine verdichtete Schicht in ca. 40 cm Tiefe hin, die in allen Anbauvarianten anzutreffen ist. Die verdichtete Schicht zeigt generell eine signifikant ($p < 0,05$) höhere Lagerungsdichte als der Oberboden (15 cm) und im Falle der meisten Varianten auch als die untere Bodentiefe (Abb. 36, oben). Allerdings lassen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Parzellen der Anbauvarianten und der Kontrolle feststellen.

Die Luftkapazität (LK) zeigt keinen klaren Zusammenhang mit der Lagerungsdichte und im Gegensatz zu dieser deutliche Unterschiede zwischen den Varianten. Im Oberboden führt der Anbau von Wegwarte und in 60 cm Tiefe der Anbau von Luzerne zu einer signifikant ($p < 0,05$) geringeren LK im Vergleich zur Kontrolle.

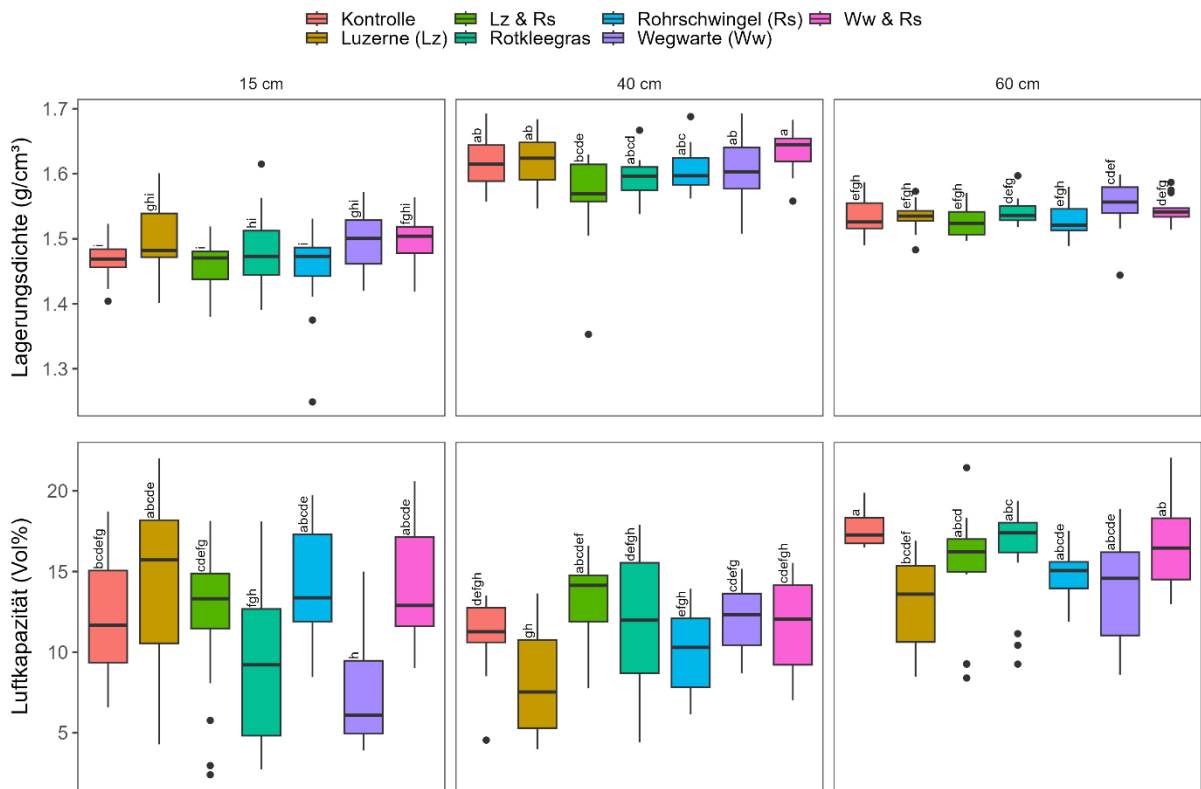


Abb. 36: Lagerungsdichte (oben) und Luftkapazität (unten) der am Standort Oberfeld entnommenen Bodenproben, differenziert nach Anbauvariante und Bodentiefe. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten und Tiefen ($p < 0,05$; Tukey-HSD-Test).

Die gesättigte Wasserleitfähigkeit in 60 cm Tiefe ist bei allen Varianten signifikant ($p < 0,05$) höher als in 15 und 40 cm Tiefe. Es lassen sich jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Anbauvarianten und der Kontrolle beobachten.

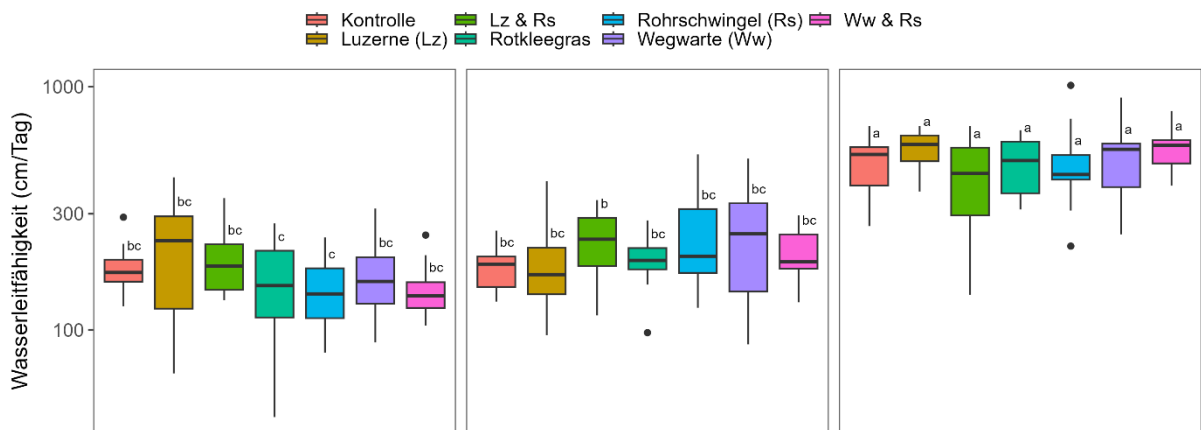


Abb. 37: Gesättigte Wasserleitfähigkeit der am Standort Oberfeld entnommenen Bodenproben, differenziert nach Anbauvariante und Bodentiefe. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten und Tiefen ($p < 0,05$; Tukey-HSD-Test; Durchführung des HSD-Tests für die Wasserleitfähigkeit an log-transformierten Daten)

4.2 Arbeitspaket 2

4.2.1 Spross- und Wurzelwachstum sowie Bioporen (Roman Kemper)

Die Erhebungen mit der Profilwandmethode zeigen für die Zwischenfrüchte deutliche verschiedene Wurzelprofile (Abb. 38). Im Oberboden zeigt sich eine intensive Durchwurzelung von Grünroggen. Im Unterboden wiesen Ölrettich, Winterrüben und Phacelia die höchsten Wurzellängendichten (WLD) auf. Sowohl im Ober- als auch im Unterboden war die WLD der Lupine sehr gering. Über den Winter nahmen die winterharten Zwischenfrüchte, insbesondere Grünroggen und Inkarnatklee, im Vergleich zu den abfrierenden Zwischenfrüchten an Wurzellänge zu.

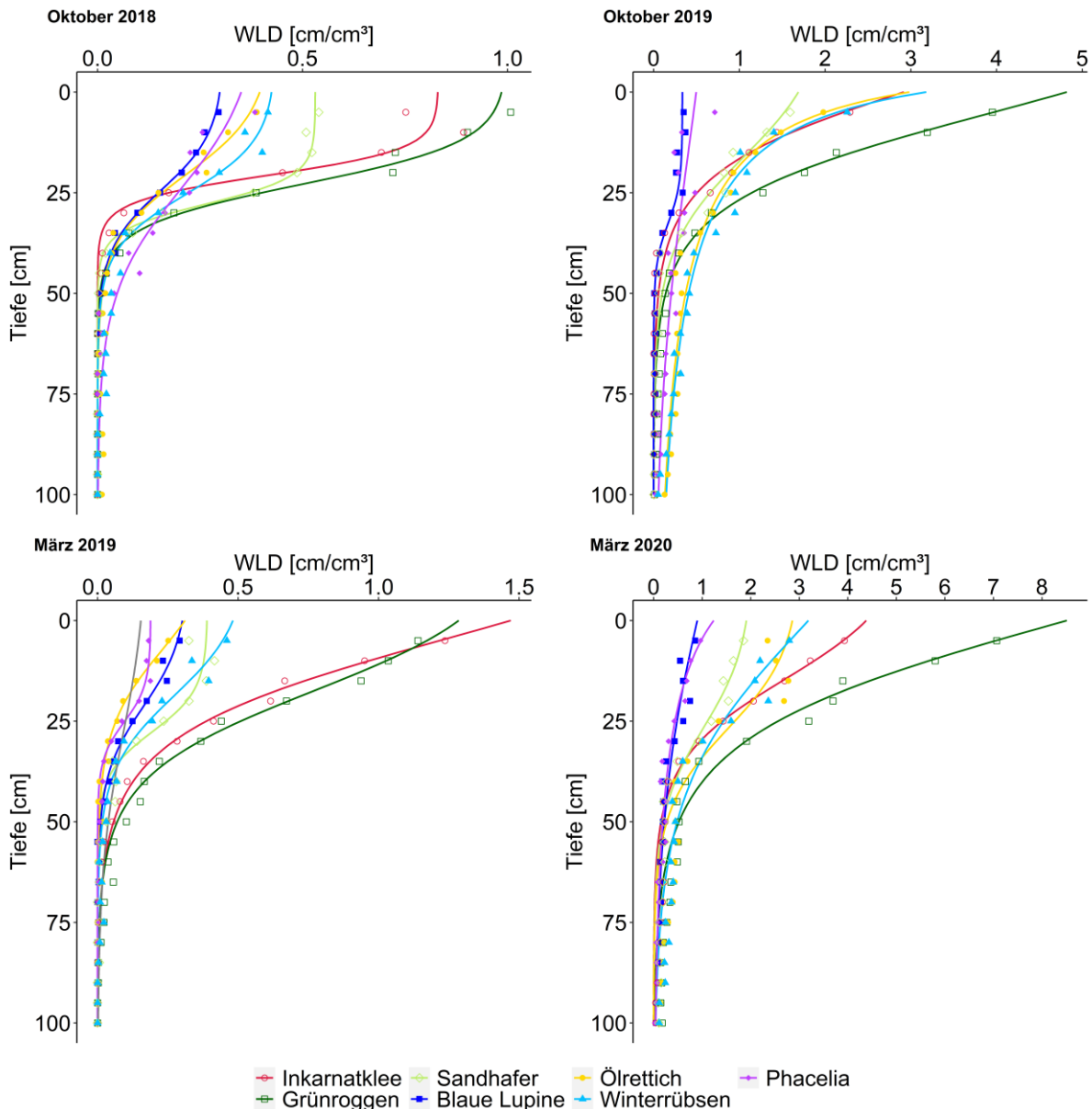


Abb. 38: Wurzellängendichten (WLD) von Zwischenfrüchten in verschiedenen Bodentiefen vor dem Winter (Oktober) und nach dem Winter (März) in den Winterhalbjahren 2018/2019 und 2019/2020. Die WLD wurde durch eine nichtlineare Regression mit einer logistischen Funktion mit drei Parametern angepasst. Die Symbole zeigen die Mittelwerte der gemessenen Werte (n=3). Die Abbildung basiert auf Kemper et al., 2020.

An der Profilwand wurde die Wurzellänge differenziert nach Wurzellänge im bulk-Boden und in den Bioporen erfasst. So konnte der Anteil der Wurzellänge in den Bioporen ermittelt werden (Tabelle 7). Nur im Oktober 2019 gab es signifikante Unterschiede, höhere Anteile an Wurzellänge in Bioporen bei der Phacelia im Vergleich zu den beiden legumenen Zwischenfrüchten. Insgesamt fielen hohe Anteile an Wurzellänge in großlumigen Bioporen für Ölrettich, Winterrübsen, Phacelia und teilweise Sandhafer auf.

Tabelle 7: Mittelwerte \pm Standardabweichung (n=3) des Anteils der Wurzellänge in groß-lumigen Bioporen im Unterboden (30-90 cm) für verschiedene Zwischenfrüchte vor (Oktober) und nach dem Winter (März) in Jahren (2018/2019 und 2019/2020). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($\alpha=0,05$) für den Anteil der Wurzellänge in groß-lumigen Bioporen innerhalb eines Datums. Die Tabelle basiert auf Kemper et al., 2020.

Termin	Zwischenfrucht	Anteil der Wurzellänge in groß-lumigen Bioporen (%)	
		2018/2019	2019/2020
Oktober	Inkarnatklee	0,0 \pm 0,0	4,6 \pm 8,0 b
	Grünroggen	5,2 \pm 6,6	8,4 \pm 8,5 ab
	Sandhafer	0,0 \pm 0,0	17,5 \pm 12,7 ab
	Blaue Lupine	15,0 \pm 22,7	2,1 \pm 2,2 b
	Ölrettich	22,2 \pm 25,6	14,8 \pm 4,1 ab
	Winterrübsen	9,7 \pm 11,4	11,3 \pm 4,9 ab
	Phacelia	4,0 \pm 3,9	31,3 \pm 17,3 a
März	Inkarnatklee	2,4 \pm 4,2	6,1 \pm 1,1
	Grünroggen	1,8 \pm 1,6	6,2 \pm 4,9
	Sandhafer	9,6 \pm 8,5	5,6 \pm 4,4
	Blaue Lupine	0,0 \pm 0,0	4,9 \pm 1,9
	Ölrettich	9,7 \pm 13,4	21,8 \pm 8,2
	Winterrübsen	7,4 \pm 8,0	16,3 \pm 4,4
	Phacelia	4,8 \pm 8,4	31,7 \pm 31,3

Die Trockenmasseerhebung im November zeigte für Grünroggen und Lupine sowie deren Mischungen in beiden Jahren keine signifikanten Unterschiede in der Sprossmasse (Abb. 39). Für die Wurzelmasse gab es 2019 signifikante Unterschiede, der Grünroggen wies eine höhere Wurzelmasse als die Blaue Lupine auf. Bei den Wurzel-Spross-Verhältnissen wies der Grünroggen ebenfalls signifikant höhere Wert als die Lupine in beiden Jahren auf. Die Vergleiche zwischen Erwartungswert und den Zwischenfruchtmischungen zeigten keine signifikanten Unterschiede und damit keine Mischungseffekte für die Trockenmassen. Deutlich wurden jedoch die Abweichungen der Mischungspartner vom Erwartungswert. Der erhöhte Grünroggenanteil und der verringerte Lupinenanteil in Spross und Wurzel zeigten, dass der Grünroggen die Lupine deutlich dominierte.

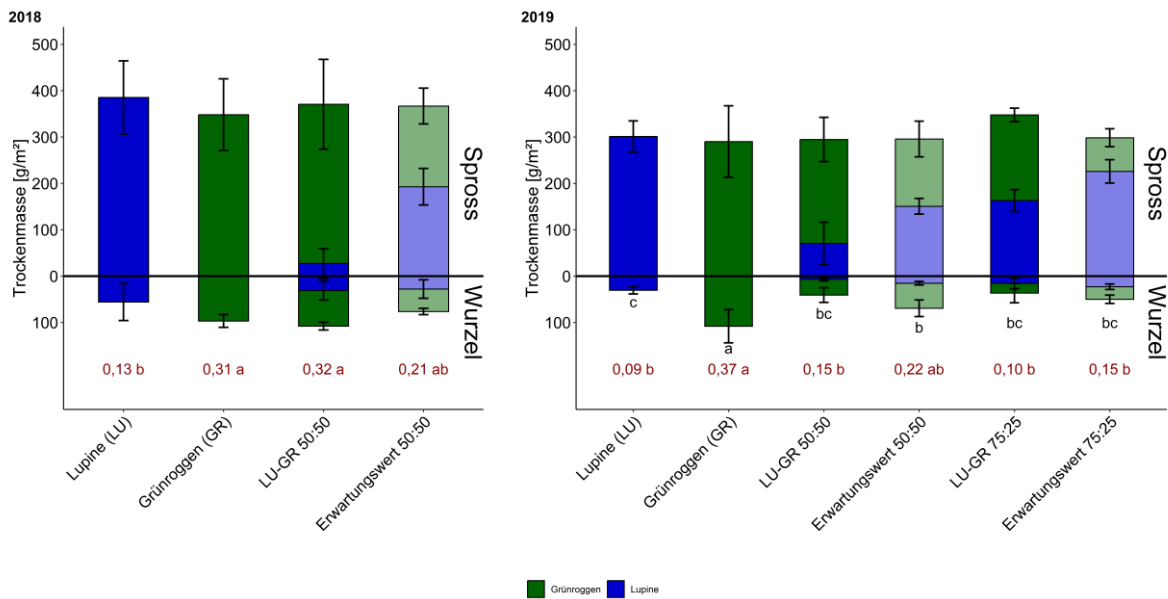


Abb. 39: Mittelwerte \pm Standardabweichung der Spross- ($n = 4$) und Wurzeltrockenmasse ($n = 3$) [g/m^2] und des Wurzel-Spross-Verhältnisses ($n = 3$) der Reinsaaten Blaue Lupine, Grünroggen, 50:50- und 75:25-Zwischenfruchtmischungen aus Blauer Lupine und Grünroggen sowie den Erwartungswerten (entsprechende Anteile der Reinsaaten) im Jahr 2018 und 2019. Balken über 0 zeigen die Spross-Trockenmasse, Balken unter 0 die Wurzel-Trockenmasse. Die Farben repräsentieren die Arten: grün für Roggen, blau für Lupine. Transparente Balken zeigen die Erwartungswerte. Rote Zahlen unter den Balken stellen das Wurzel-Spross-Verhältnis dar. Unterschiedliche Kleinbuchstaben weisen auf signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$, HSD Tukey-Test) zwischen verschiedenen Zwischenfrüchten für die Gesamttrockenmasse von Spross oder Wurzel oder das Wurzel-Spross-Verhältnis innerhalb eines Jahres hin. Unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$, t-Test) zwischen der beobachteten und der erwarteten Trockenmasse für Spross oder Wurzel des Zwischenfruchtpartners innerhalb eines Jahres. Die Abbildung basiert auf Kemper et al., 2022.

Für Ölrettich, Inkarnatkle, Grünroggen sowie deren beide Mischungen gab es im November 2018 weder für Spross noch Wurzel signifikante Unterschiede in der Trockenmasse (Abb. 40). 2019 zeigten sich für die Trockenmassen signifikante Unterschiede. Der Ölrettich und die vom Ölrettich dominierten Mischungen wiesen hohe Sprossmassen auf, der Grünroggen hohe Wurzelmassen, der Inkarnatkle zeigte geringe Spross- und Wurzelmasse. 2019 gab es auch signifikante Unterschiede im Wurzel-Spross-Verhältnis, mit hohen Werten für Grünroggen und geringen für die anderen Zwischenfrüchte. Die Vergleiche zwischen Mischungen und Erwartungswert zeigen keine signifikanten Unterschiede, aber in der Tendenz positive Mischungseffekte in der Sprossmasse und negative in der Wurzelmasse. Zudem wurde deutlich, dass Ölrettich den Grünroggen, v.a. in 2019, und den Inkarnatkle in beiden Jahren dominierte.

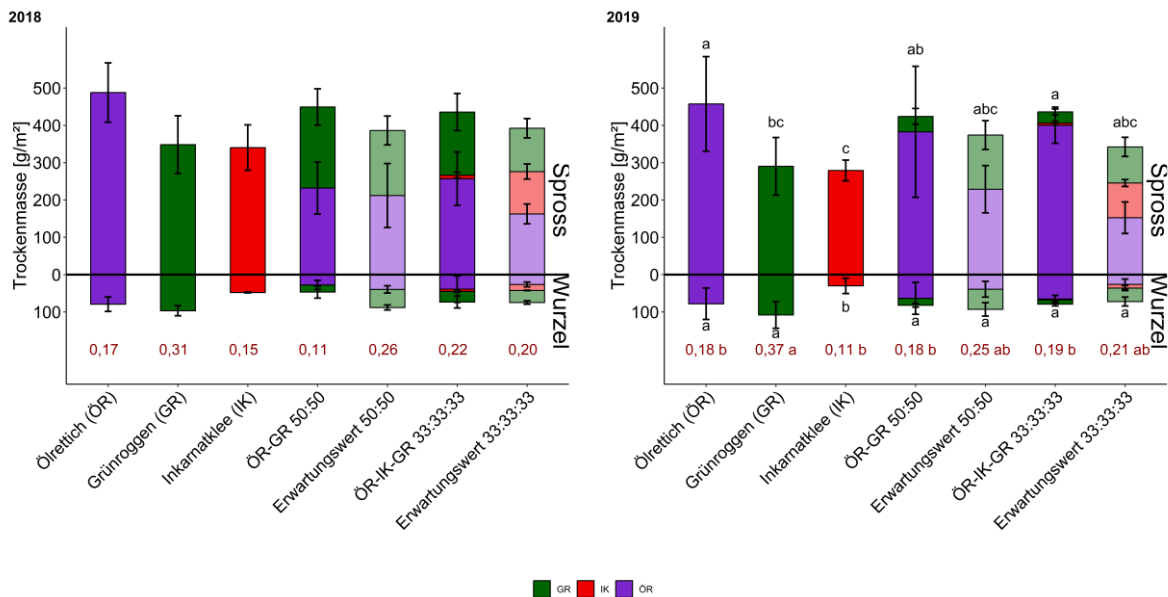


Abb. 40: Mittelwerte \pm Standardabweichung der Spross- ($n = 4$) und Wurzel-trockenmasse ($n = 3$) [g/m^2] und des Wurzel-Spross-Verhältnisses ($n = 3$) der Reinsaat Ölrettich, Grünroggen, Inkarnatklée, 50:50-Zwischenfruchtmischung aus Ölrettich und Grünroggen, 33:33:33-Zwischenfruchtmischung aus Ölrettich, Inkarnatklée und Grünroggen sowie den Erwartungswerten (entsprechende Anteile der Reinsaat) im Jahr 2018 und 2019. Balken über 0 zeigen die Spross-Trockenmasse, Balken unter 0 die Wurzel-Trockenmasse. Die Farben repräsentieren die Arten: violett für Ölrettich, grün für Roggen, rot für Inkarnatklée. Transparente Balken zeigen die Erwartungswerte. Rote Zahlen unter den Balken stellen das Wurzel-Spross-Verhältnis dar. Unterschiedliche Kleinbuchstaben weisen auf signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$, HSD Tukey-Test) zwischen verschiedenen Zwischenfrüchten für die Gesamttrockenmasse von Spross oder Wurzel oder das Wurzel-Spross-Verhältnis innerhalb eines Jahres hin. Unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$, t-Test) zwischen der beobachteten und der erwarteten Trockenmasse für Spross oder Wurzel des Zwischenfrucht-partners innerhalb eines Jahres. Die Abbildung basiert auf Kemper et al., 2023b.

Die Monolithmethode zeigte deutlich Unterschiede in der Wurzellängendichte der Zwischenfrüchte (Abb. 41). Insgesamt nahm die WLD mit der Tiefe für die meisten Zwischenfrüchte stark ab. 2018 zeigten sich im Oberboden starke Unterschiede, die WLD der Lupine war signifikant geringer als vom Grünroggen und von der Lupine-Grünroggen-Mischung. 2019 zeigte sich ebenfalls ein signifikanter Unterschied in der WLD von Lupine und Grünroggen, die beiden Mischungen lagen dazwischen. Im Unterboden gab es in beiden Jahren keine signifikanten Unterschiede. Auch bei der Wurzelmasse gab es nur signifikante Unterschiede im Oberboden. 2018 waren Grünroggen-Reinsaat und die Lupine-Grünroggen-Mischung signifikant erhöht im Vergleich zur Lupine, 2019 unterschieden sich die Lupinen-Reinsaat und beide Mischungen vom Grünroggen. Die spezifische Wurzellänge zeigte große Streuungen und teilweise im Vergleich zur Lupinen-Reinsaat signifikant höhere Werte für Grünroggen-Reinsaat und Mischung.

Beim Vergleich von Ölrettich, Inkarnatklée und Grünroggen, sowie deren Mischungen zeigte sich für die WLD sowohl im Ober- als auch im Unterboden geringe Werte für den Inkarnatklée (Abb. 42). Die höchsten Werte im Oberboden ergaben sich für den Grünroggen und im Unterboden die höchsten Werte für die Ölrettich-Reinsaat und die beiden Mischungen zu finden, teilweise signifikant von Grünroggen- und Inkarnatklée-Reinsaat verschieden. Die Wurzelmasse nahm auch mit der Tiefe stark ab. Die Werte für den Inkarnatklée waren tendenziell gering, während die Unterschiede zwischen den anderen Zwischenfrucht-Varianten nicht sehr ausgeprägt waren. Auch für diese Zwischenfrüchte zeigte die spezifische Wurzellänge eine hohe Streuung, aber teilweise auch signifikante Unterschiede mit teilweise höheren Werten für Ölrettich und die Mischungen.

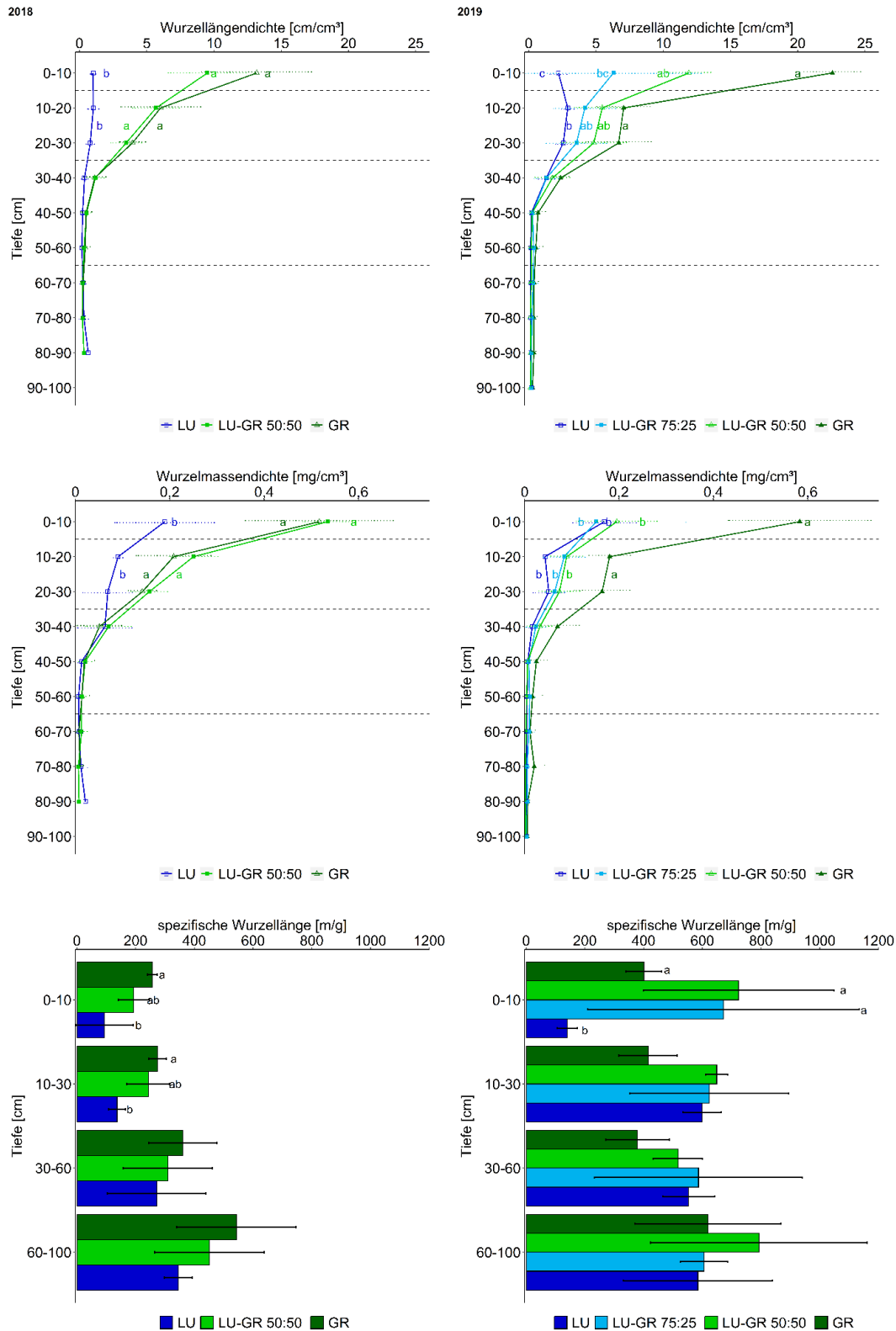


Abb. 41: Mittelwerte \pm Standardabweichung ($n = 3$) der Wurzellängendichte [cm/cm^3] (RLD) (oben), der Wurzelmasendichte [mg/cm^3] (RMD) (mittig) und der spezifischen Wurzellänge [m/g] (SRL) (unten) der Zwischenfrucht-Reinseten Blaue Lupine (LU), Grünroggen (GR), 50: 50- und 75:25-Zwischenfrucht-mischungen aus Lupine und Roggen (LU-GR 50:50 und LU-GR 75:25) in den Jahren 2018 und 2019 in verschiedenen Bodentiefen. Die Farben repräsentieren die Zwischenfrüchte: dunkelgrün für Roggen, hellgrün für die 50:50-Mischung, hellblau für die 75:25-Mischung und dunkelblau für Lupine. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$, HSD Tukey-Test) zwischen den verschiedenen Zwischenfrüchten innerhalb der verschiedenen Bodentiefeschichten (0-10 cm, 10-30 cm, 30-60 cm und 60-100 cm) innerhalb eines Jahres. Die Abbildung basiert auf Kemper et al., 2022.

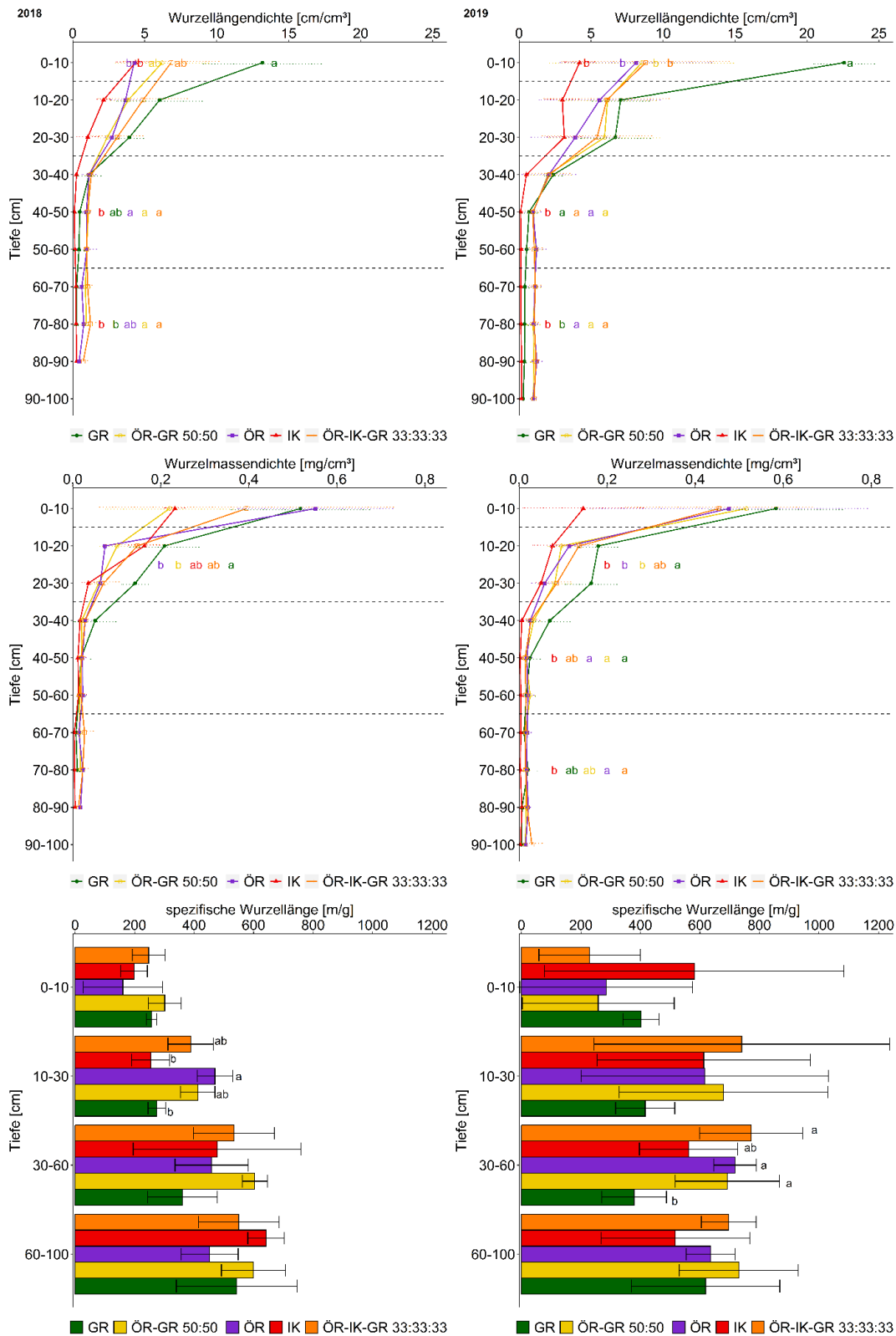


Abb. 42: Mittelwerte \pm Standardabweichung ($n = 3$) der Wurzellängendichte [cm/cm^3] (RLD) (oben), der Wurzelmasendichte [mg/cm^3] (RMD) (mittig) und der spezifischen Wurzellänge [m/g] (SRL) (unten) der Zwischenfrucht-Reinsaaten Ölrettich (ÖR), Grünroggen (GR), 50: 50-Zwischenfruchtmischung aus Ölrettich und Roggen (ÖR-GR 50:50) und 33:33:33-Zwischenfruchtmischung aus Ölrettich, Inkarnatklees und Roggen (ÖR-IK-GR 33:33:33) in den Jahren 2018 und 2019 in verschiedenen Bodentiefen. Die Farben repräsentieren die Zwischenfrüchte: violett für Ölrettich, rot für Inkarnatklees, dunkelgrün für Roggen, gelb für die 50:50-Mischung und orange für die 33:33:33-Mischung. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$, HSD Tukey-Test) zwischen den verschiedenen Zwischenfrüchten innerhalb der verschiedenen Bodentiefeschichten (0-10 cm, 10-30 cm, 30-60 cm und 60-100 cm) innerhalb eines Jahres. Die Abbildung basiert auf Kemper et al., 2023b.

Der relative Mischungseffekt war für die Wurzeigenschaften der Lupine-Grünroggen-Mischung (50:50) in 2018 überwiegend positiv (Abb. 43). 2019 zeigten sich für beiden Mischungen aus Lupine und Grünroggen kaum Mischungseffekte für die WLD, negative Effekte für die Wurzelmasse und in allen Tiefen positive Mischungseffekte für die spezifische Wurzellänge.

Für die beiden Mischungen mit Ölrettich waren die relativen Mischungseffekte im gesamten Profil eher gering (Abb. 44). Auffällig waren die stark positiven Mischungseffekte für Wurzelmasse- und -längendichte im Unterboden. Bis auf die obersten 10 cm zeigte beide Mischungen mit Ölrettich positive Mischungseffekte für die spezifische Wurzellänge.

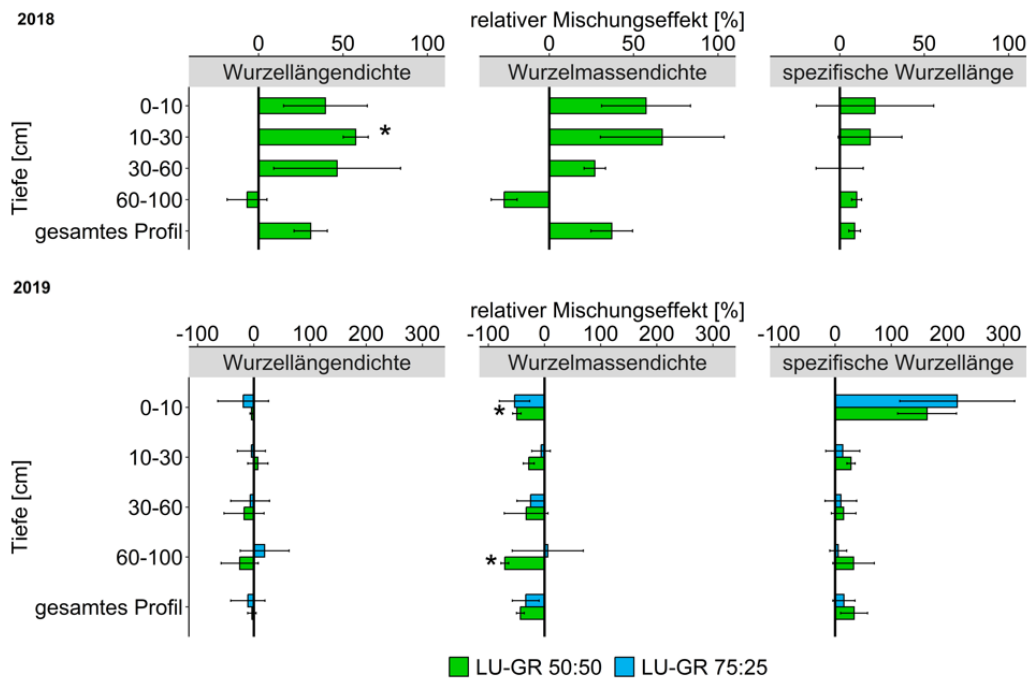


Abb. 43: Mittelwerte \pm Standardfehler ($n = 3$) des relativen Mischungseffekts [%] für die Wurzellängendichte, die Wurzelmasse und die spezifische Wurzellänge für 50:50- und 75:25-Zwischenfruchtungen aus Lupine und Roggen im Jahr 2018 und 2019 in verschiedenen Bodentiefen und für das gesamte Bodentiefenprofil. Die Farben beziehen sich auf die Zwischenfruchtungen: hellgrün für die 50:50-Mischung und hellblau für die 75:25-Mischung. Sternchen zeigen einen signifikanten Unterschied für den relativen Mischungseffekt von 0 an ($p \leq 0,05$, t-Test). Die Abbildung basiert auf Kemper et al., 2022.

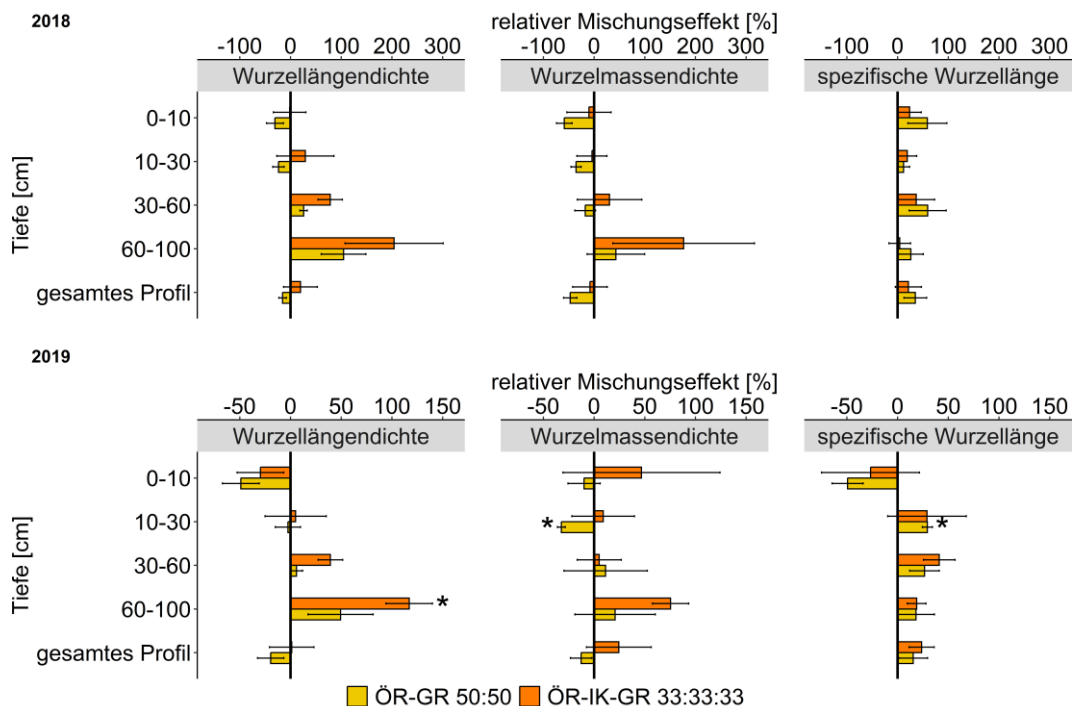
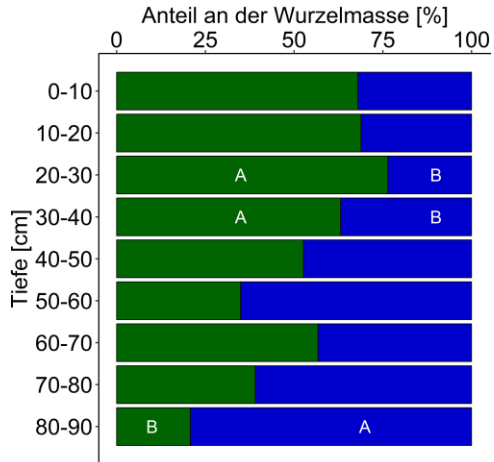


Abb. 44: Mittelwerte \pm Standardfehler ($n = 3$) des relativen Mischungseffekts [%] für die Wurzellängendichte, die Wurzelmassendichte und die spezifische Wurzellänge für die 50:50-Zwischenfrucht Mischung aus Ölrettich und Roggen und die 33:33:33-Zwischenfrucht Mischung aus Ölrettich, Inkarnatkliee und Roggen im Jahr 2018 und 2019 in verschiedenen Bodentiefen und für das gesamte Bodentiefenprofil. Die Farben beziehen sich auf die Zwischenfrucht Mischungen: gelb für die 50:50-Mischung und orange für die 33:33:33-Mischung. Sternchen zeigen einen signifikanten Unterschied für den relativen Mischungseffekt von 0 an ($p \leq 0,05$, t-Test). Die Abbildung basiert auf Kemper et al., 2023b.

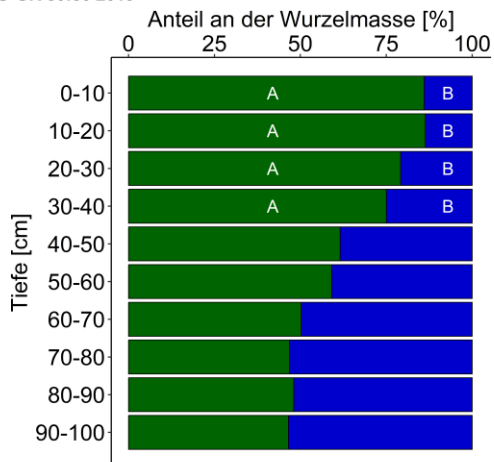
Die Ergebnisse der FTIR-Spektroskopie für die Lupine-Grünroggen-Mischungen (Abb. 45) zeigten mit der Tiefe zunehmende Lupinen-Anteile und abnehmende Grünroggen-Anteile an der Wurzelmassen mit teilweise signifikant höheren Lupinen-Anteilen im Unterboden und signifikant höheren Grünroggen-Anteilen im Oberboden. Im Vergleich der beiden Mischungen zeigten sich in der 75:25-Mischung höhere Lupinen-Anteile in der Wurzelmasse als in der 50:50-Mischung.

Für die Mischungen aus Ölrettich und Grünroggen bzw. Inkarnatkliee zeigte die FTIR-Spektroskopie hohe Wurzelmassenanteile für den Ölrettich, insbesondere in 2019, die auch mit der Tiefe zunahm (Abb. 46). In 2019 waren die Grünroggen-Anteile im Oberboden von den Ölrettich-Anteilen nicht signifikant verschieden. Die Wurzelmassenanteile von Inkarnatkliee waren über alle Tiefen gering, insbesondere im Vergleich zum Ölrettich.

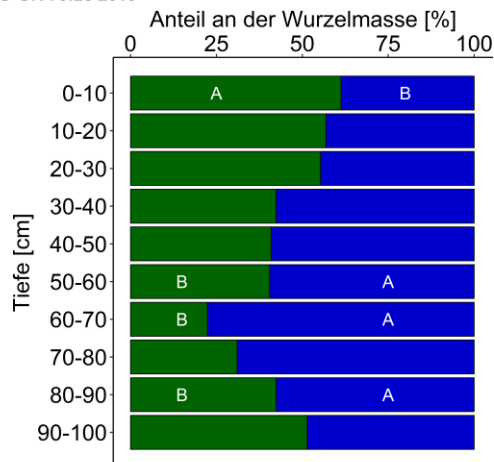
LU-GR 50:50 2018



LU-GR 50:50 2019



LU-GR 75:25 2019



■ LU ■ GR

Abb. 45: Mittelwerte (n=3) des Anteils der Wurzelmasse [%] von Blauer Lupine und Grünroggen in der 50:50-Zwischenfruchtmischung im Jahr 2018 und 2019 (rechts) und der 75:25-Zwischenfruchtmischung im Jahr 2019 (links). Die Farben repräsentieren die Arten: grün für Roggen, blau für Lupine. Unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$, t-Test) zwischen dem Anteil der Wurzelmasse von Blauer Lupine und Grünroggen innerhalb einer Bodentiefeschicht für einen Mischungspartner. Die Abbildung basiert auf Kemper et al., 2022.

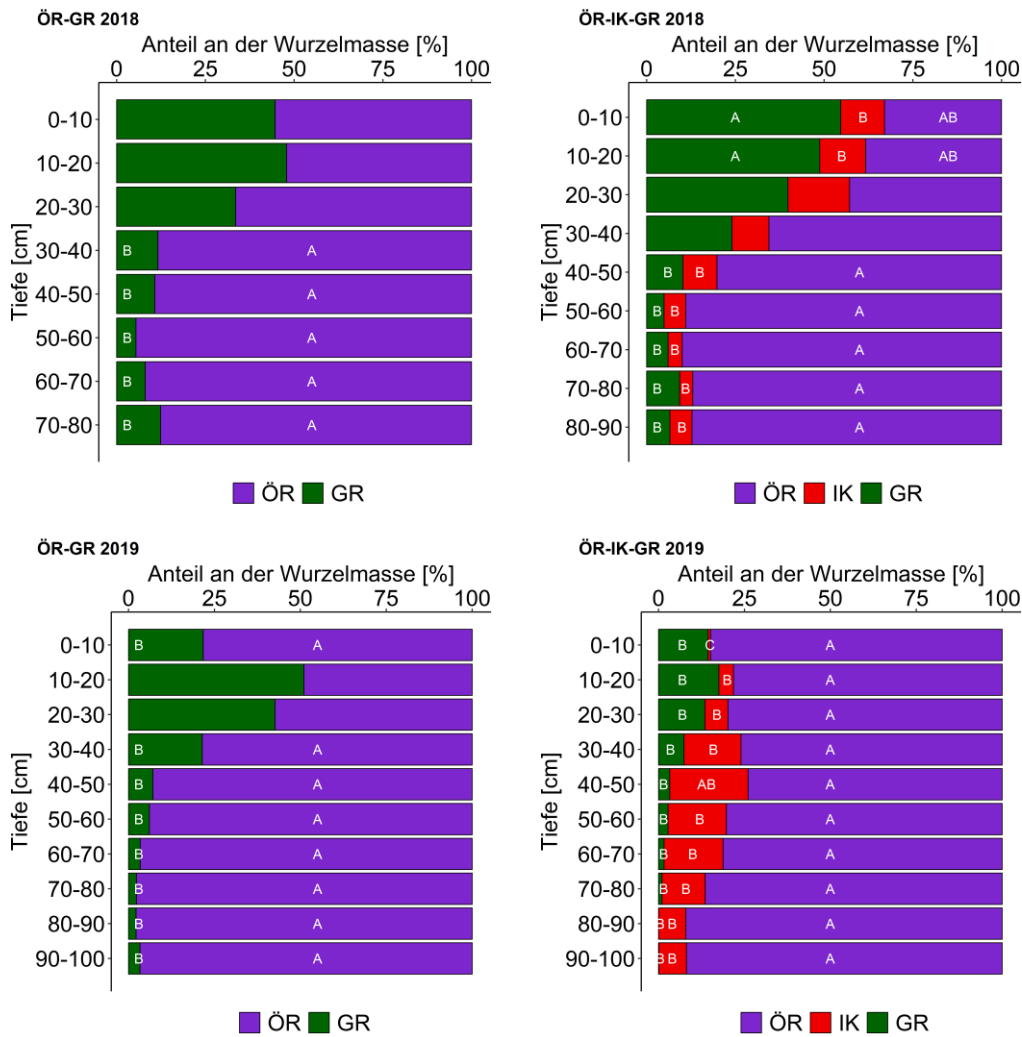


Abb. 46: Mittelwerte (n=3) des Anteils der Wurzelmasse [%] von Ölettich, Grünroggen bzw. Inkarnatklees in der 50:50-Zwischenfruchtmischung im Jahr 2018 und 2019 (rechts) und der 33:33:33-Zwischenfruchtmischung im Jahr 2018 und 2019 (links). Die Farben repräsentieren die Arten: grün für Roggen, violett für Ölettich, rot für Inkarnatklees. Unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$, t-Test) zwischen dem Anteil der Wurzelmasse von Ölettich, Grünroggen bzw. Inkarnatklees innerhalb einer Bodentiefeschicht für einen Mischungspartner. Die Abbildung basiert auf Kemper et al., 2023b.

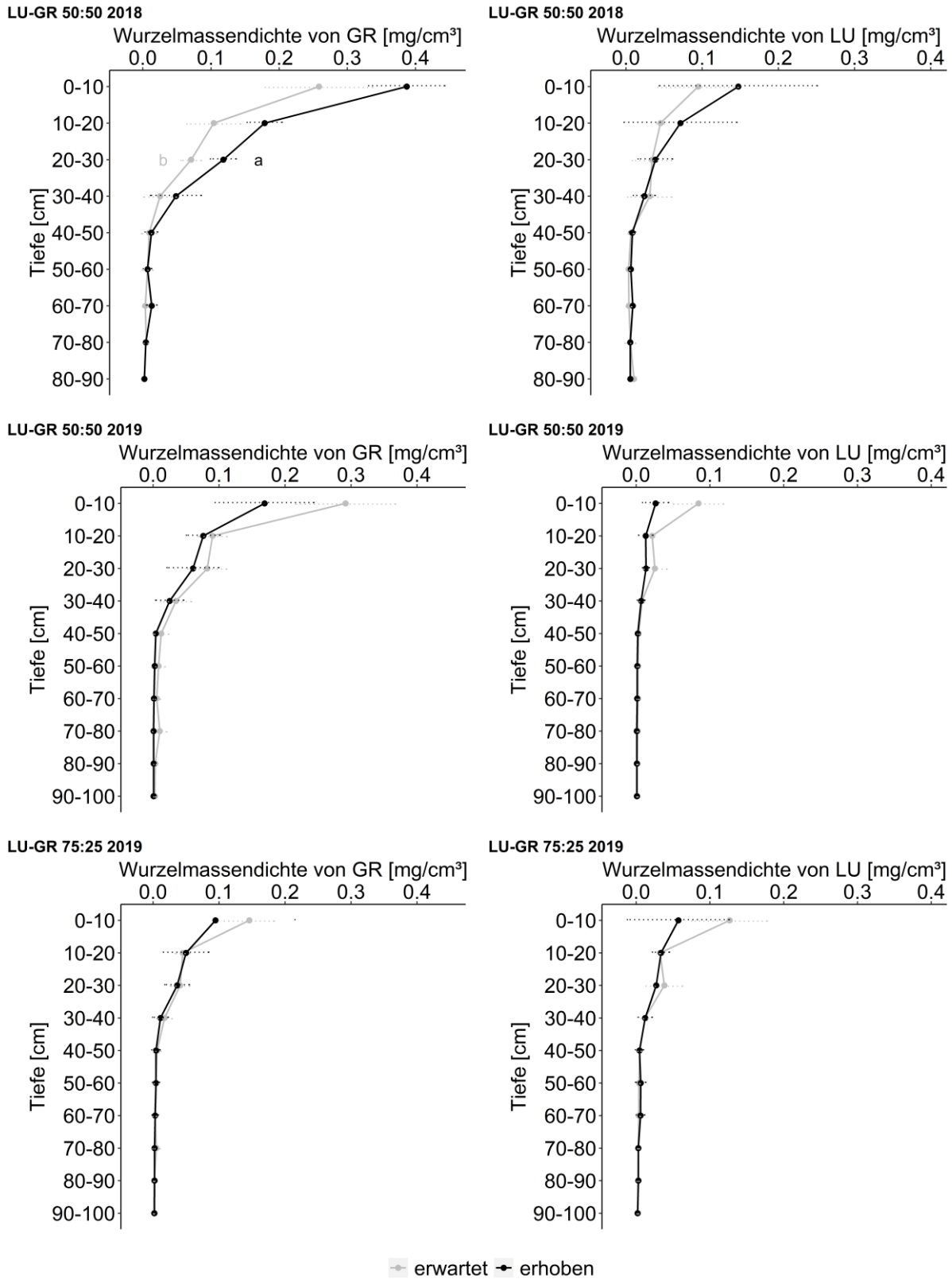


Abb. 47: Mittelwerte \pm Standardabweichung ($n = 3$) der erhobenen (schwarz) und erwarteten (grau) Wurzelmasse von Roggen (links) und Lupine (rechts) in einer 50:50-Zwischenfruchtmischung aus Lupine und Roggen im Jahr 2018 (oben), in einer 50:50-Zwischenfruchtmischung aus Lupine und Roggen im Jahr 2019 (mittig) und in einer 75:25-Zwischenfruchtmischung aus Lupine und Roggen im Jahr 2019 (unten). Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$, t-Test) zwischen erhobenen und erwarteten Wurzelmasse innerhalb einer Bodentiefe für einen Mischungspartner. Die Abbildung basiert auf Kemper et al., 2022.

Der Vergleich der Wurzelmasse-Dichte-Profile der Lupine-Grünroggen-Mischungen und dem entsprechenden Erwartungswert, berechnet aus den Reinsaaten und den Saat-Mischungsanteilen, zeigte kaum Unterschiede (Abb. 47). Lediglich in der 50:50-Mischung in 2018 zeigt der Grünroggen in 20-30 cm Tiefe eine signifikant höhere Wurzelmasse-Dichte als erwartet.

Für die beiden Mischungen mit Ölrettich zeigte sich in einzelnen Tiefen im Oberboden für Grünroggen teilweise und für Inkarnatklees in beiden Jahren eine signifikant geringere Wurzelmasse-Dichte als erwartet (Abb. 48). Für den Ölrettich gab es in keinem der beiden Mischungen einen signifikanten Unterschied zwischen der erhobenen und erwarteten Wurzelmasse-Dichte.

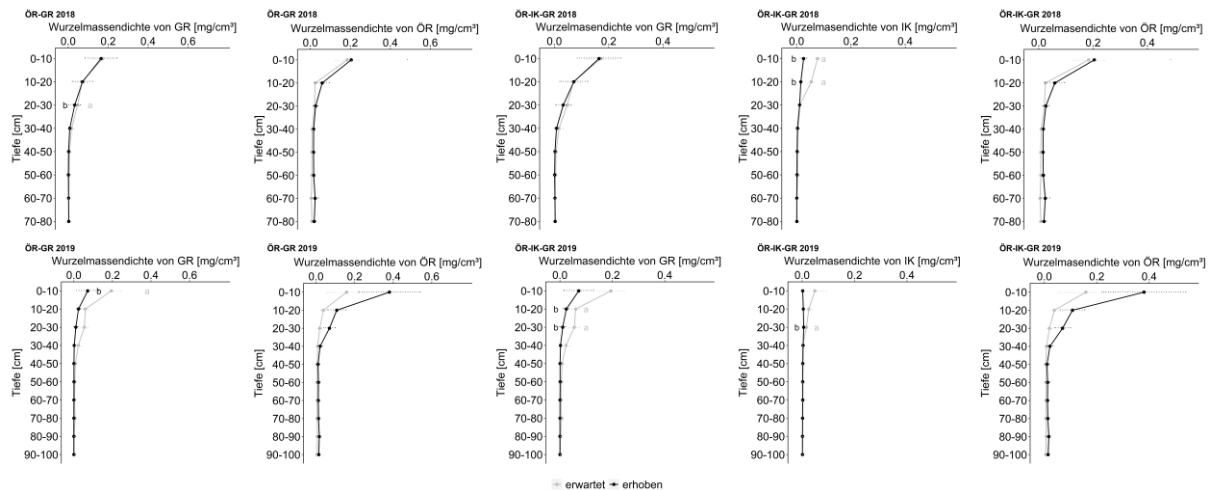


Abb. 48: Mittelwerte \pm Standardabweichung ($n = 3$) der erhobenen (schwarz) und erwarteten (grau) Wurzelmasse-Dichten von Roggen (GR) und Ölrettich (ÖR) bzw. Inkarnatklees (IK) in einer 50:50-Zwischenfruchtmischung aus Ölrettich und Roggen im Jahr 2018 und 2019 und in einer 33:33:33-Zwischenfruchtmischung aus Ölrettich, Inkarnatklees und Roggen im Jahr 2018 und 2019. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$, t-Test) zwischen erhobenen und erwarteten Wurzelmasse-Dichten innerhalb einer Bodentiefeschicht für einen Mischungspartner. Die Abbildung basiert auf Kemper et al., 2023b.

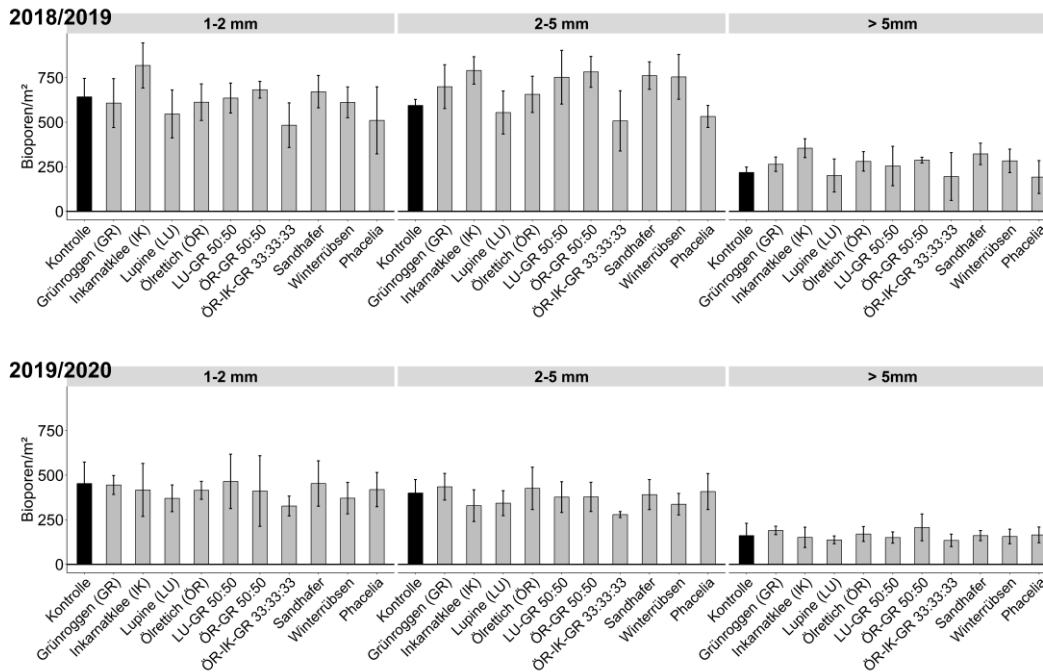


Abb. 49: Bioporendichte (m^2) nach Durchmesser unter Zwischenfrüchten in 2018/19 und 2019/20 in 40 cm Tiefe. Die Zwischenfrüchte (grau) wurden mit dem Dunnett-Test gegen die Kontrolle ohne Zwischenfrucht (schwarz) getestet. Die Abbildung basiert auf Kemper et al., 2023a.

Sowohl in beiden Versuchsjahren als auch in allen drei Durchmesserklassen unterschied sich keine Zwischenfrucht-Variante in der Bioporendichte von der unbewachsenen Kontrolle (Abb. 49). Bei der Anzahl der berechneten Wurzelstücke je m^2 wies das Jahr 2018/19 höhere Werte auf als 2019/20 (Tabelle 8). Wurzelstücke > 5 mm wurden für keine Zwischenfrucht gefunden. Insgesamt wiesen Grünroggen und Lupine sowie deren Mischung das höchste Bioporengenesepotenzial auf, wobei bei Poren > 2 mm nur die Lupine im ersten Versuchsjahr höhere Werte aufwies.

Tabelle 8: Berechnete Wurzelstücke je m^2 verschiedener Zwischenfrüchte in drei Durchmesserklassen in der Bodenschicht 40-50 cm in 2018/19 sowie 2019/20. Die Tabelle basiert auf Kemper et al., 2023a.

Kultur	2018/19			2019/20		
	1-2 mm	2-5 mm	>5 mm	1-2 mm	2-5 mm	>5 mm
Grünroggen (GR)	149	12	0	38	6	0
Inkarnatklée (IK)	1	0	0	3	0	0
Lupine (LU)	136	44	0	1	0	0
LU-GR 50:50	154	13	0	0	0	0
Ölrettich (ÖR)	53	9	0	9	0	0
ÖR-GR 50:50	45	1	0	4	0	0
ÖR-IK-GR 33:33:33	19	0	0	2	0	0
Phacelia	53	1	0			
Sandhafer	28	0	0			
Winterrübsen	51	4	0			

4.2.2 Stickstoffaufnahme, C/N-Verhältnis und Lignin-Gehalte der Zwischenfrüchte sowie mineralischer Bodenstickstoffgehalt und Ertrag der Nachfrucht Sommerweizen (Roman Kemper)

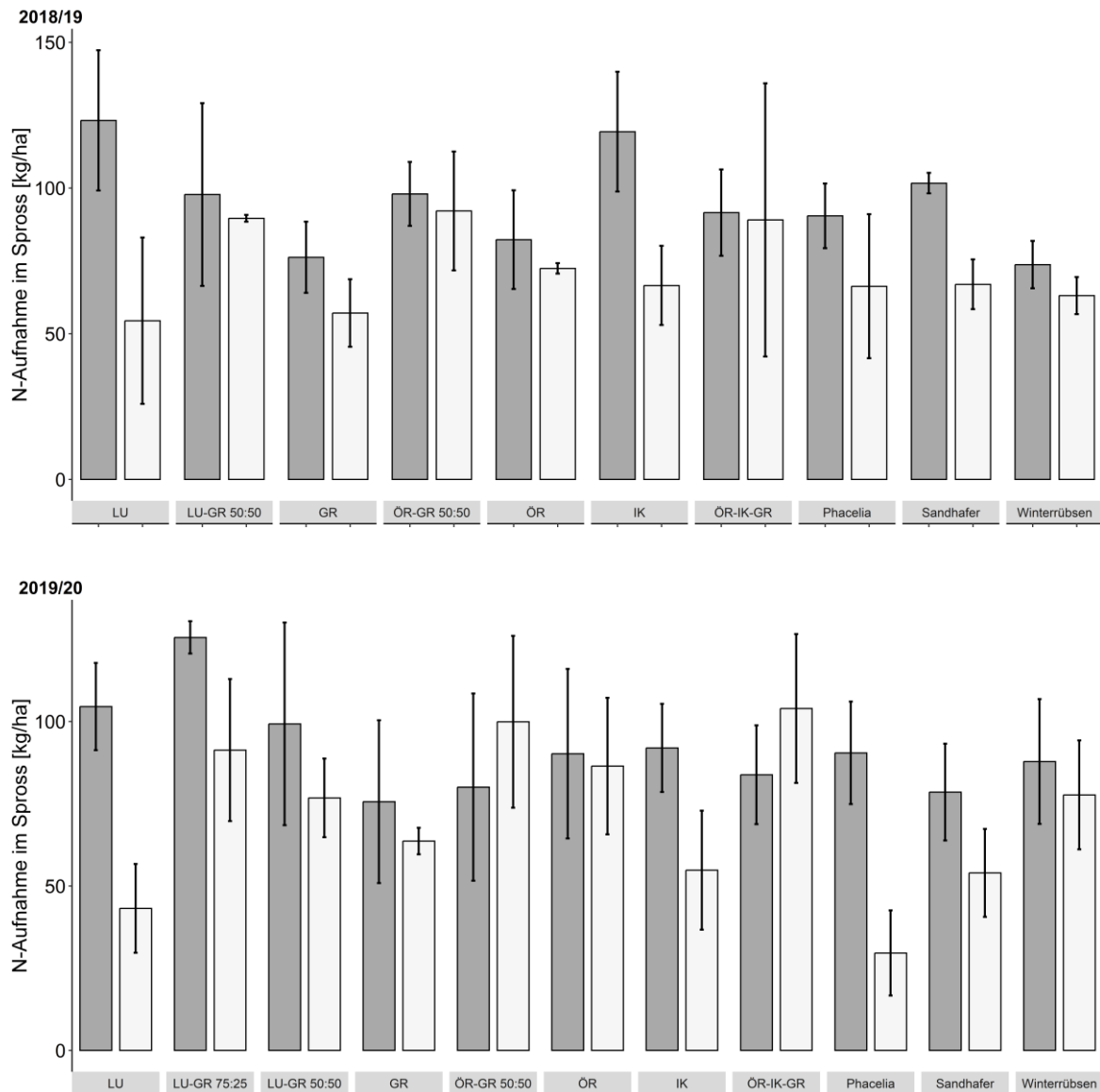


Abb. 50: Mittelwert \pm Standardabweichung ($n=4$) der Stickstoffaufnahme im Spross der Zwischenfrucht vor Winter im November (dunkelgrau) und nach Winter im März (hellgrau) für die Versuchsjahre 2018/19 und 2019/20.

In beiden Jahren konnten die Zwischenfrüchte im Herbst im Spross um die 100 kg N/ha aufnehmen (Abb. 50). Dabei zeigte sich, dass in der Tendenz die N-Aufnahmen im Spross der Leguminosen höher waren als in den Nicht-Leguminosen und dass bei den Nicht-Leguminosen im Herbst die winterharten Arten weniger N im Spross aufnahmen als die nicht winterharten Arten. Der Vergleich der N-Mengen im Spross vor und nach Winter zeigte für die meisten Zwischenfruchtarten Verluste, besonders hohe für die Leguminosen sowie Sandhafer und Phacelia. Geringe Verluste zeigten sich für die winterharten Arten sowie Ölrettich und dessen Mischungen. Im zweiten Jahr war die N-Menge im Spross in den Ölrettich-Mischungen sogar höher als vor Winter.

Tabelle 9: Mittelwerte (n=4) der C/N-Verhältnisse der Sprossmasse der Zwischenfrucht vor Winter im November und nach Winter im März in beiden Versuchsjahren 2018/19 und 2019/20.

Jahr	Zwischenfruchtart	November	März
2018/19	Grünroggen	19,9	19,6
2018/19	Inkarnatklee	12,2	13,1
2018/19	Lupine	14,1	20,3
2018/19	LU-GR 50:50	16,6	17,3
2018/19	Ölrettich	25,6	25,2
2018/19	ÖR-GR 50:50	19,5	20,2
2018/19	ÖR-IK-GR 33:33:33	19,8	20,2
2018/19	Phacelia	27,0	27,8
2018/19	Sandhafer	26,8	37,1
2018/19	Winterrübsen	19,0	13,4
2019/20	Grünroggen	16,9	19,0
2019/20	Inkarnatklee	12,5	11,8
2019/20	Lupine	13,1	20,3
2019/20	LU-GR 50:50	13,1	18,0
2019/20	LU-GR 75:25	12,3	16,3
2019/20	Ölrettich	21,6	24,4
2019/20	ÖR-GR 50:50	22,6	24,2
2019/20	ÖR-IK-GR 33:33:33	23,1	22,8
2019/20	Phacelia	15,5	29,4
2019/20	Sandhafer	20,2	19,6
2019/20	Winterrübsen	19,3	15,8

Tabelle 10: Mittelwerte (n=3) von N-Aufnahme in der Wurzelmasse der Zwischenfrucht im Herbst sowie C/N-Verhältnis und Lignin-Gehalt der Wurzelmasse in beiden Versuchsjahren 2018/19 und 2019/20.

Jahr	Kultur	N_kg_ha	CN	Lignin_g_kg
2018_19	GR	9,5	42,9	25,7
2018_19	IK	9,9	18,0	9,8
2018_19	LU	9,2	23,4	23,9
2018_19	LU_GR_50_50	12,9	34,9	21,7
2018_19	OR	16,8	25,8	30,2
2018_19	OR_GR_50_50	6,8	28,6	31,6
2018_19	OR_IK_GR_33_33_33	11,5	26,9	23,4
2018_19	PH	11,6	21,0	-
2018_19	SH	8,7	33,4	-
2018_19	WRU	9,8	22,9	-
2019_20	GR	10,6	32,6	22,6
2019_20	IK	6,6	17,0	-
2019_20	LU	3,9	28,6	-
2019_20	LU_GR_50_50	5,1	23,1	-
2019_20	LU_GR_75_25	4,4	24,5	-
2019_20	OR	9,2	33,3	29,2
2019_20	OR_GR_50_50	11,1	28,4	-
2019_20	OR_IK_GR_33_33_33	11,4	29,2	-

Die C/N-Verhältnisse im Spross (Tabelle 9) variierten zwischen den Arten und Zeitpunkten. Geringe C/N-Verhältnisse zeigten sich für die Leguminosen und hohe für die nicht winterharten Arten. Über den Winter nahmen die C/N-Verhältnisse für die meisten Arten zu, insbesondere für Phacelia, Sandhafer und die Lupine. Für Winterrübsen nahmen die C/N-Verhältnisse hingegen über Winter ab.

Für die Wurzel zeigten sich deutlich geringere N-Aufnahmen im Gegensatz zum Spross (Tabelle 10). Die Werte lagen mit im Mittel 9,4 kg N/ha bei nur einem Zehntel der Spross-N-Aufnahme. Die C/N-Verhältnisse der Wurzeln waren für Inkarnatklée sehr gering und hoch für die Gräser Sandhafer und Grünroggen. Der Lignin-Gehalt in der Wurzel war für den Inkarnatklée ebenfalls gering und hohe Lignin-Gehalten fanden sich für den Ölrettich.

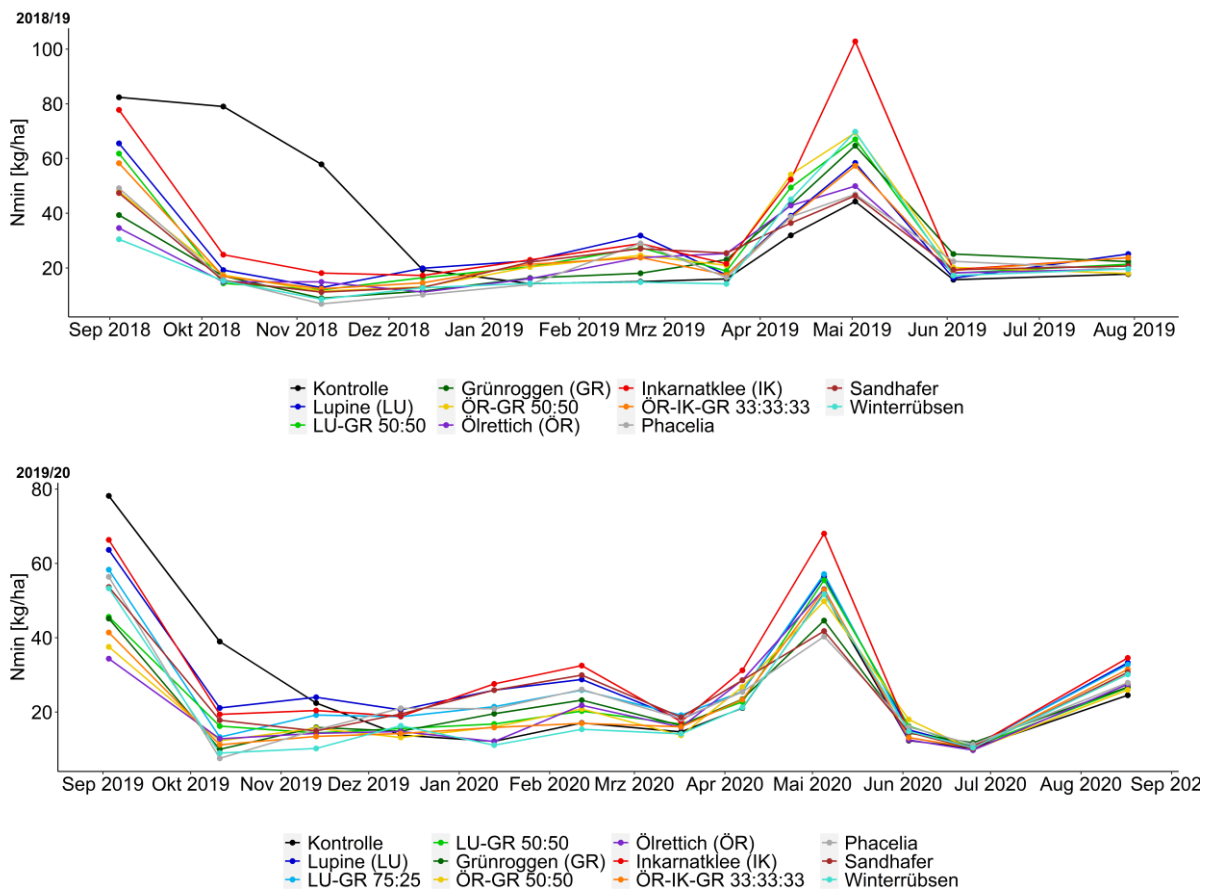


Abb. 51: Mittelwert des mineralischen Bodenstickstoffgehalts (n=4) in der Krume (0-30 cm) unter der Zwischenfrucht und der Nachfrucht Sommerweizen in beiden Versuchsjahren 2018/19 und 2019/20.

Für die Gehalte an mineralischem Bodenstickstoff (Abb. 51) zeigte sich eine schnelle Abnahme im Herbst unter den Zwischenfrüchten und deutlich höhere Werte für die Kontrolle. Weitgehend über den gesamten Verlauf waren die N_{min} -Gehalte für die Leguminosen, insbesondere Inkarnatklée, hoch. Ein Mineralisierungsschub im Mai mit anschließend schneller Abnahme der N_{min} -Gehalte charakterisierte die Dynamik unter der Nachfrucht Sommerweizen. In beiden Jahren zeigten sich die höchsten N_{min} -Gehalte im Mai nach Inkarnatklée. Auffällig waren die über Winter und Frühjahr geringen N_{min} -Gehalte von Winterrübsen und hohe Werte nach Winterrübsen im Mai.

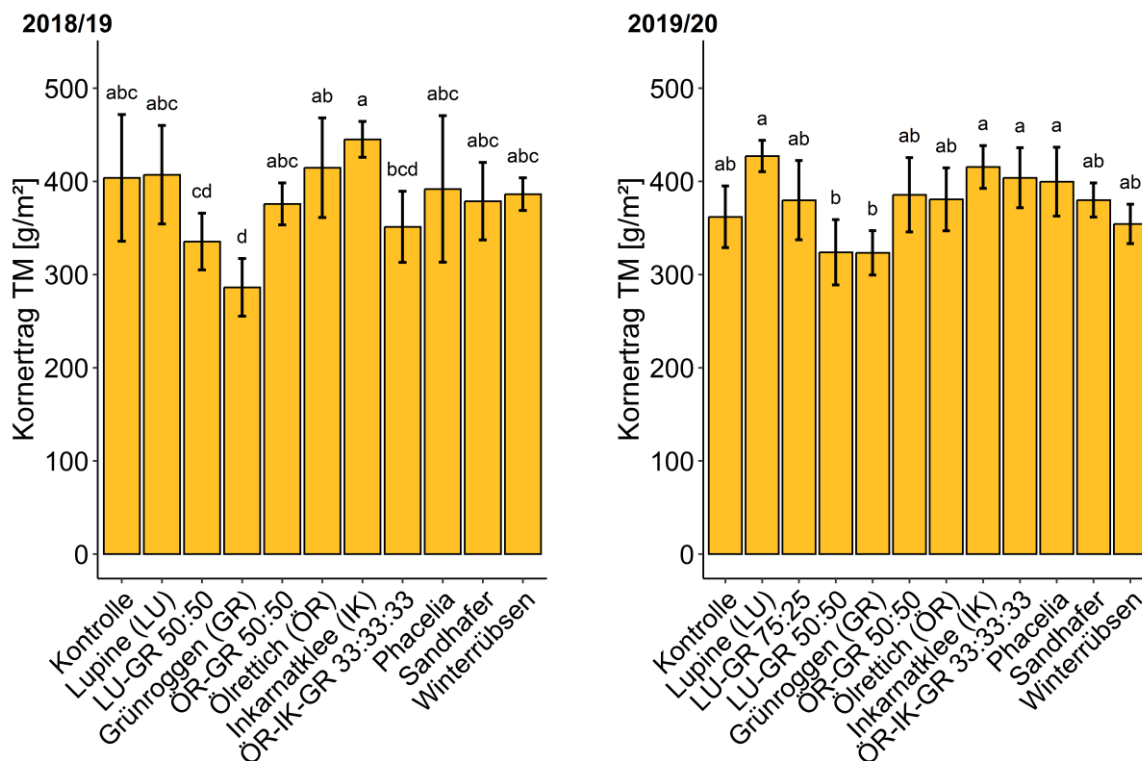


Abb. 52: Mittelwerte \pm Standardabweichung (n=4) vom Kornertrag des Parzellendruschs der Nachfrucht Sommerweizen bei 100% Trockensubstanzgehalt in beiden Versuchsjahren 2018/18 und 2019/20 in Abhängigkeit der Zwischenfrucht.

Die Nachfrucht Sommerweizen erreichte um die 4 t/ha Kornertrag bei 100% Trockensubstanzgehalt (Abb. 52). Die höchsten Werte waren nach den legumenen Zwischenfrüchten zu finden, die geringsten nach Grünroggen und Grünroggen-dominierten Mischungen. Signifikante Unterschiede zur Kontrolle gab es kaum.

4.2.3 Wurzelartentrennung (Dr. Nicole Legner)

Die Endergebnisse der Wurzelartentrennung wurden bereits im Kapitel 4.2.1 dargestellt. Hier werden die methodischen Teilergebnisse im Detail beschrieben. Die Wurzelproben des Arbeitspaket 2 (Zwischenfrüchte) wurden im getrockneten Zustand in der ersten Jahreshälfte 2019 nach Göttingen geschickt. In Göttingen wurden alle Proben dieses Arbeitspakets vermahlen (Retsch, ZM 200). Die vier Reinsaaten (Lupine, Ölrrettich, Grünroggen, Inkarnatklée) sowie die drei Gemenge (Lupine-Grünroggen, Ölrrettich-Grünroggen, Ölrrettich-Inkarnatklée-Grünroggen) blieben für die weitere Analyse am Fourier-Transform-Infrarot (FTIR) Spektrometer (Bruker Optics, Ettlingen) mit ATR-Einheit in Göttingen (336 Proben). Die gemahlene Proben der restlichen Zwischenfruchtvarianten wurden zur weiteren Analyse nach Bonn geschickt.

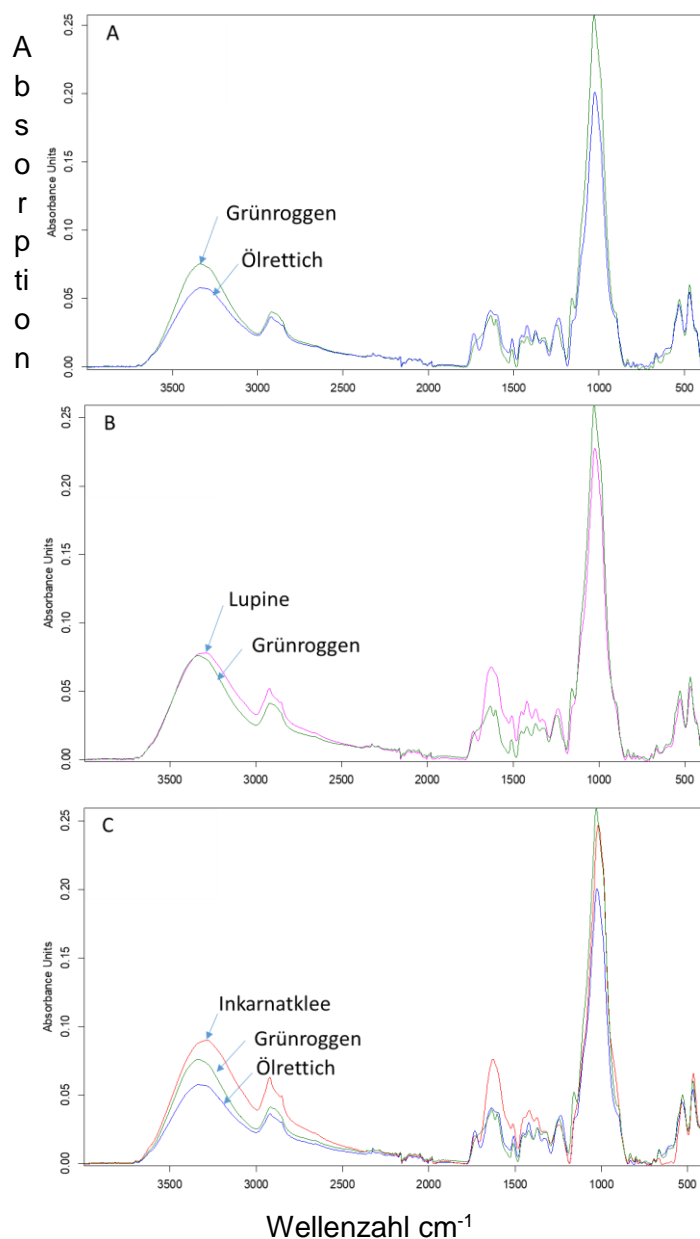


Abb. 53: FTIR-ATR-Spektren von getrockneten und gemahlene Wurzeln der vier Reinsaat Grünroggen, Ölrettich, Inkarnatkiee und Lupine. Die Spektren wurden vektor-normiert und offset-korrigiert.

Die Proben für die FTIR-ATR-Analyse wurden jeweils fünf Mal mit 32 Scans bei der Wellenzahl 400-4000 cm⁻¹ gemessen. Bevor die Quantifizierung der Arten im Gemenge erfolgte, wurden die Reinsaat gemessen und in Clusteranalysen die Heterogenität geprüft. Die Software Opus (Version 7.2, Bruker Optics) wurde für die Spektrenaufnahme, die Erstellung der Clusteranalyse sowie für die Quantifizierung verwendet.

Die Absorptionshöhe der untersuchten Arten unterschieden sich in den Peakhöhen (Abb. 53). Grünroggen zeigte höhere Absorptionen im Bereich der Celluloseverbindungen (Wellenzahl 1000 cm⁻¹) als Ölrettich und Lupine (Abb. 53 A,B). Der Inkarnatkiee wies besonders hohe Absorptionen bei Wellenzahlen zwischen 1500-1700 cm⁻¹ auf. Dieser Bereich kann Proteinverbindungen zugeordnet werden (Abb. 1 C).

Die Clusteranalysen zeigten deutliche Unterschiede zwischen den untersuchten Arten (Abb. 54). Die Lupine wies eine höhere innerartliche Varianz auf (Abb. 54 B). Jedoch ist bei jeder Art die innerartliche Heterogenität geringer als die Heterogenität zwischen den Arten. Damit ist die Voraussetzung für eine erfolgreiche Quantifizierung der Arten im Gemenge erfüllt.

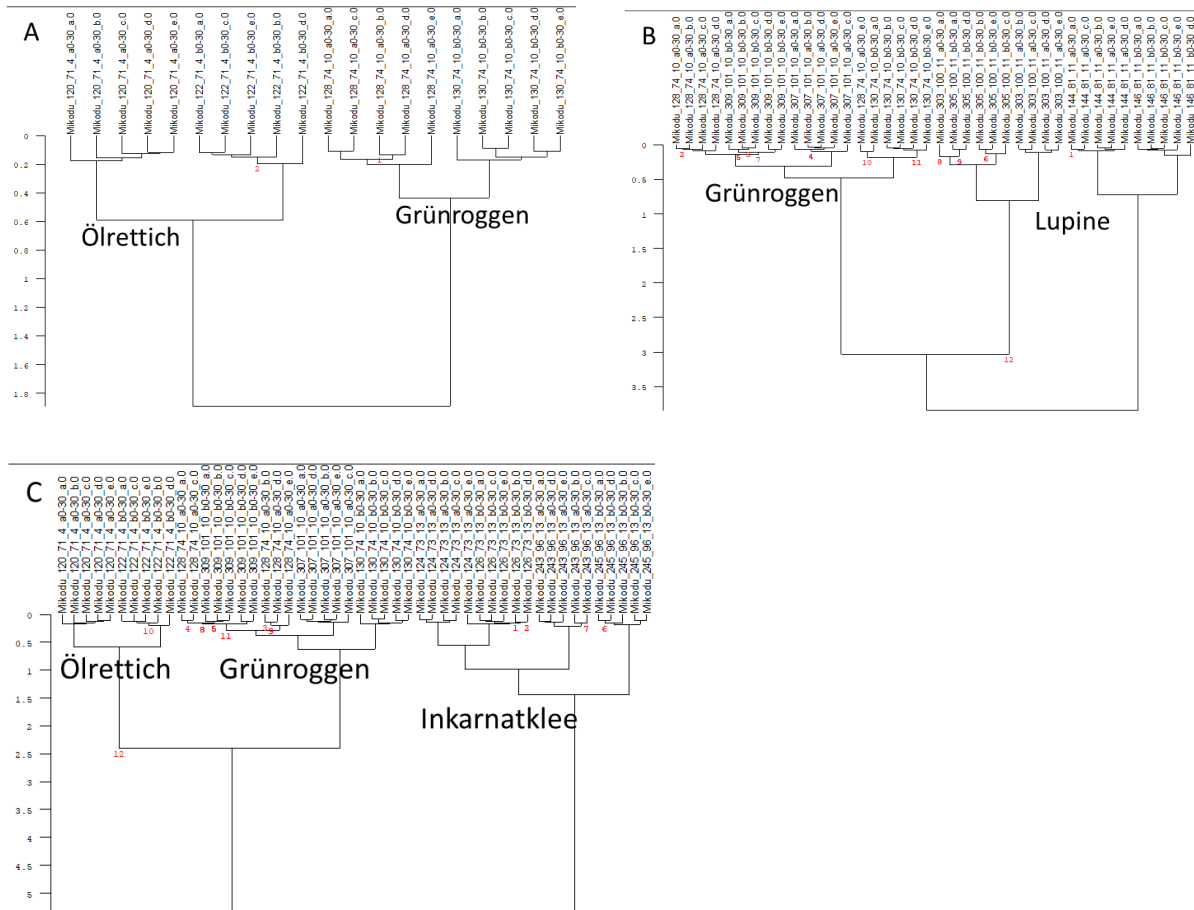


Abb. 54: Clusteranalysen der FTIR-ATR-Spektren von getrockneten und gemahlene Wurzeln der vier Reinsaat Grünroggen, Ölrettich, Inkarnatkleie und Lupine. Die Clusteranalysen wurden mit dem Ward's Algorithmus erstellt. Die Spektren wurden vektornormiert und es wurde die 1. Ableitung gebildet.

Für die Quantifizierung der Wurzeln im Gemenge wurden die Proben der Reinsaat verwendet. Für die 2-Arten-Mischungen wurden 55 künstliche Mischungen erstellt, die die Artenzusammensetzung zwischen 0-100 % abdecken. 35 Proben wurden zur Erstellung eines kreuzvalidierten Modells benötigt. Die übrigen 20 Proben, die nicht zur Modellerstellung genutzt wurden, konnten für eine externe Validierung des Modells verwendet werden. Für das 3-Arten-Modell wurden 60 künstliche Mischungen erstellt, 40 Proben für die Modellerstellung sowie 20 Proben für die Modellvalidierung. Alle Modelle wurden mit dem Paket Quant2 sowie der Optimierungsoption erstellt. Die Optimierung sucht die beste Datenvorbereitung sowie den optimalen Wellenzahlbereich für das Modell und erstellt eine Rangliste mit dem geringsten Vorhersagefehler der Kreuzvalidierung. Sieben vorgeschlagene Modelle wurden mit der externen Validierung auf ihre Vorhersagekraft geprüft. Das Modell mit dem höchsten RPD (Verhältnis zwischen der Standardabweichung des Validationssets zum RMSEP) wurde als dimensionslose Größe zur Beurteilung benutzt. Je höher der Wert, desto genauer ist die Vorhersage des Modells. RPDs mit einem Wert zwischen 3-5 sind zufriedenstellend. Werte zwischen 5-10 weisen auf gute bis sehr gute Modelle hin.

Das Ölrettich-Grünroggen Modell zeigte einen RPD Wert von 5,66. Das Grünroggen-Lupine Modell hatte einen Wert von 5,11 und das 3-Arten- Modell Ölrettich-Inkarnatkleee-Grünroggen wies Werte zwischen 3,1-4,15 auf. Alle Modelle waren somit geeignet die Artanteile in den Mischungen zu bestimmen.

Die Artanteile wurden mit der Opus Option Quant2Analyse und dem jeweiligen Model in Prozentangaben ermittelt und an die Arbeitsgruppe der Universität Bonn weitergegeben, um daraus die Artanteile an der Trockenmasse der Gemenge zu errechnen.

2020 wurden 190 getrocknete Wurzelproben aus dem Arbeitspaket 2 (Zwischenfrüchte) in Göttingen mit dem Ziel der Ermittlung der Artanteile bearbeitet. Wurzelproben der Reinsaat Grünroggen, Inkarnatkleee, Lupine und Ölrettich, sowie der Gemenge Lupine-Grünroggen, Ölrettich-Grünroggen, Ölrettich-Inkarnatkleee sowie Ölrettich-Inkarnatkleee-Grünroggen wurden mit einer Zentrifugalmühle vermahlen (Retsch, ZM 200). Die vermahlenden Proben wurden mit dem Fourier-Transform-Infrarot (FTIR) Spektrometer mit ATR-Einheit (Bruker Optics, Ettlingen) weiter analysiert. Jede Probe wurde mit dem FTIR-ATR Spektrometer fünf Mal mit jeweils 32 Scans bei den Wellenzahlen 4000-400 cm^{-1} gemessen (Software Opus, Version 7.2, Bruker Optics).

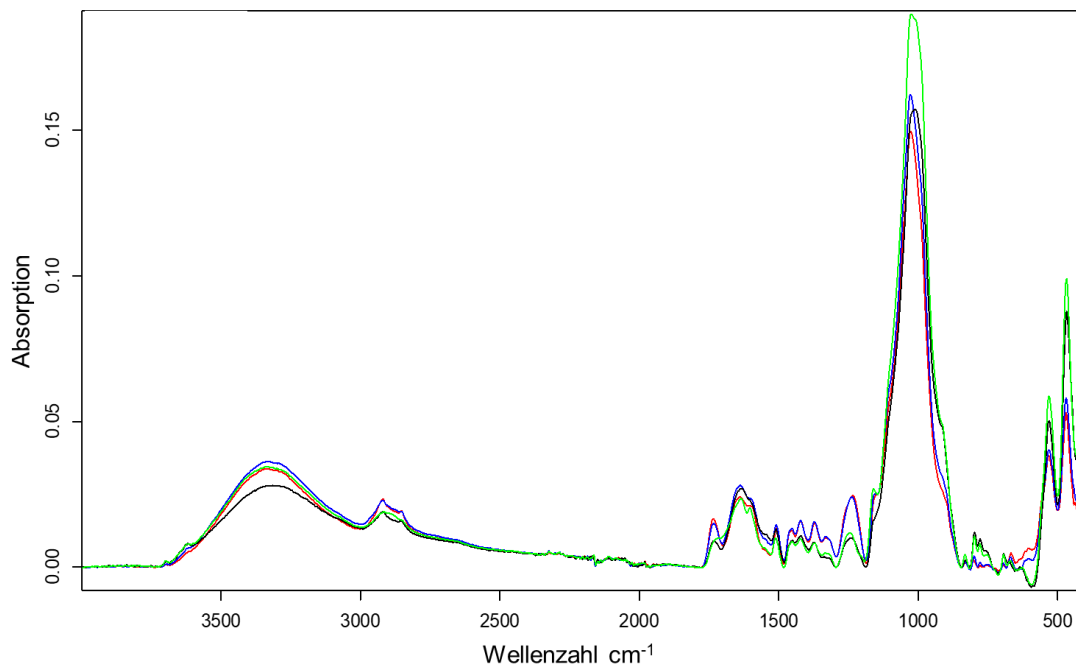


Abb. 55: FTIR-ATR-Spektren der getrockneten und vermahlenden Wurzelproben der Reinsaat Grünroggen (grün), Lupine (blau), Inkarnatkleee (schwarz) und Ölrettich (rot). Mittelwertspektren wurden grundlinienkorrigiert (Gummibandmethode).

Die Absorptionshöhe und die Peakform der Spektren unterscheiden sich bei den Arten (Abb. 55). Grünroggen zeigt einen deutlich höheren Peak bei der Wellenzahl 1000 cm^{-1} , während Inkarnatkleee einen niedrigeren Peak bei 3200 cm^{-1} zeigt und Ölrettich ganz deutliche Peakspitzen bei 2900 und 2850 cm^{-1} aufweist. Die Peakform der Arten unterscheidet sich besonders bei den Wellenzahlen 1700 bis 800 cm^{-1} .

Die Spektren der Reinsaat wurden mit Hilfe der Auswertung "Clusteranalysen" auf Heterogenität geprüft. Die Clusteranalysen belegen, dass man die Arten sehr gut voneinander unterscheiden kann (Abb. 56 A-D). Die interspezifische Heterogenität ist deutlich höher als die intraspezifische Heterogenität und dies lässt eine Artunterscheidung im Gemenge zu.

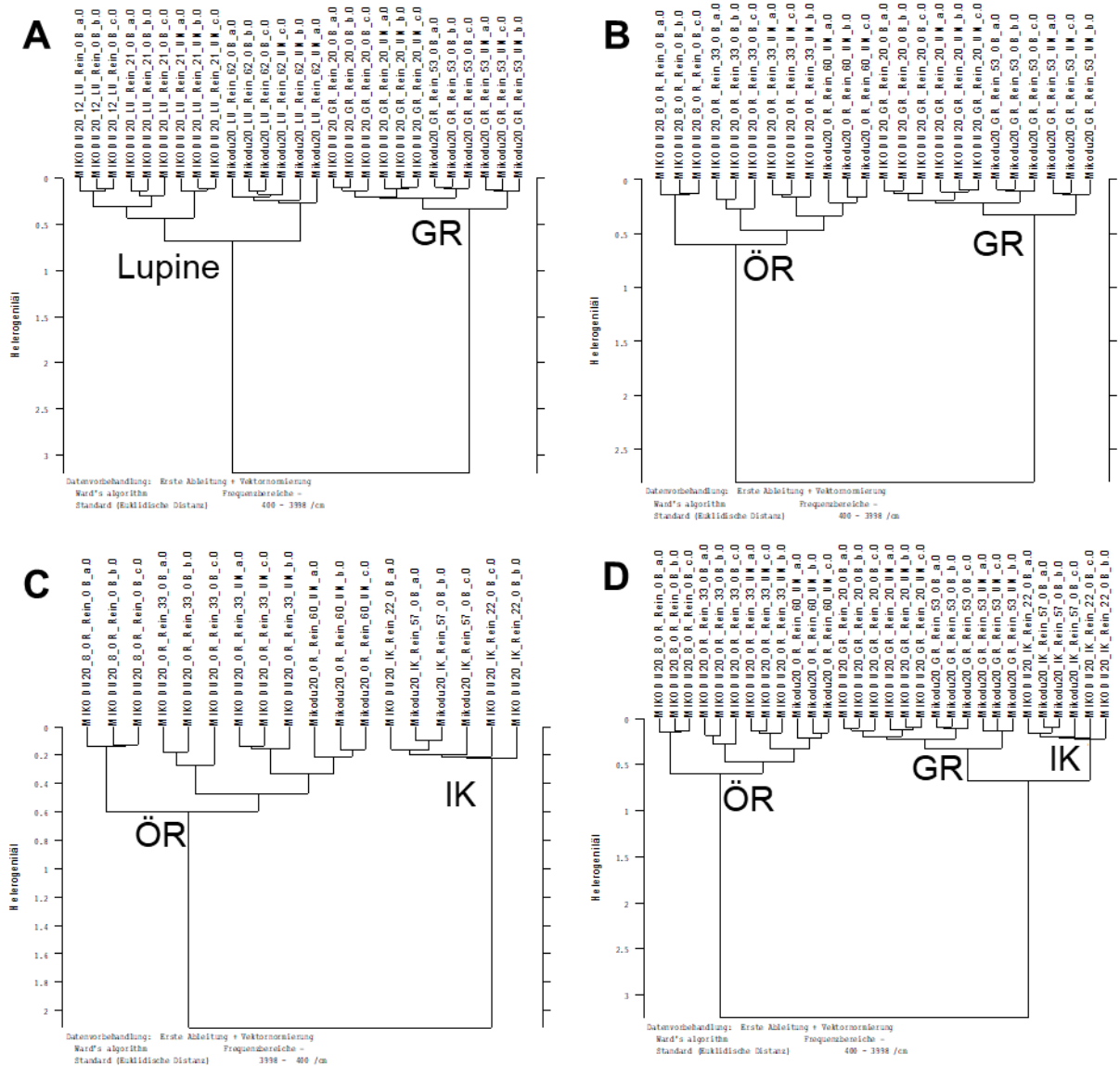


Abb. 56: Clusteranalysen der Reinsaat-Spektren von Lupine und Grünroggen (GR) (A), Örtlich (ÖR) und Grünroggen (B), Örtlich und Inkarnatklie (IK) (C) sowie Örtlich, Grünroggen und Inkarnatklie (D). Die Clusteranalysen wurden mit der 1. Ableitung und Vektornormierung, sowie Ward's Algorithmus und Euklidische Distanz berechnet.

Für die Quantifizierung der Wurzeln im Gemenge benutzt man die Reinsaatens um "künstliche Mischungen" der Gemenge-Partner zu erstellen. Für ein 2-Art-Gemenge werden 55 künstliche Mischungen erstellt, von denen 35 in die Kalibrierung und interne Kreuzvalidierung eingehen. Die restlichen 20 Mischungen werden für eine externe Validierung verwendet. Bei dem 3-Art-Gemenge sind 45 künstliche Mischungen in die Kalibrierung/interne Validierung und 24 Mischungen in die externe Validierung eingegangen. Dies entspricht dem Mischungsverhältnis der 2-Art-Gemenge: 65% der künstlichen Mischungen werden für die Kalibrierung verwendet, die restlichen 35% für die externe Validierung. Die Kalibrationsmischungen umfassen den Bereich von 0% bis 100% Anteile für jede Art, dadurch wird der Kalibrationsbereich vollständig abgedeckt. Mit den Kalibrationsmischungen wird ein Modell mit Quant 2 (Opus, Bruker Optics, Ettlingen) erstellt. Diese von Quant 2 erstellten Modelle basieren auf multivariaten Kalibrationen und der Methode der PLS-Regression (partial least square). Dadurch werden Korrelationen zwischen der Absorption der Infrarotstrahlen und der Konzentration einer Komponente im Mehrkomponentensystem erstellt. Die Modelle können mit der Quant 2 Soft-

ware durch die Optimierungsfunktion verbessert werden. Die Optimierung sucht diejenige Datenvorbehandlung und diejenigen Wellenzahlbereiche für das Modell, die am besten die tatsächlichen Mischungen der Kalibrationsproben erklären. Es werden sechs bis acht vorgeschlagene Modelle zusätzlich mit einer externen Validierung überprüft (auch diese bestehen aus künstlichen Mischungen, deren Mischungsverhältnis bekannt ist). Bei beiden Validierungen, der internen Kreuzvalidierung und der externen Validierung, werden statistische Werte ausgegeben anhand derer die Qualität der Modelle verglichen werden können.

Zur Beurteilung werden folgende Größen betrachtet:

- RPD: residual prediction deviation – Verhältnis der Standardabweichung und Standardfehler der Vorhersage → je höher desto besser, wobei Werte zwischen 3 bis 5 als zufriedenstellend und Werte zwischen 5 und 10 als gut bis sehr gut gelten
- RMSEP bzw. RMSECV: root mean square error of prediction bzw. root mean square error of cross validation – Wurzel des mittleren Fehlerquadrates der Vorhersage bzw. der Kreuzvalidierung → je niedriger desto besser
- Bias: Durchschnittswert der Abweichung, auch 'systematischer Fehler' → je kleiner desto besser, möglichst nahe bei 0
- Rang: Anzahl der PLS-Faktoren → je niedriger desto besser
- R²: Bestimmungskoeffizient in % – gibt an, wie groß die Abweichung zwischen den wahren und den vorhergesagten Komponentenwerten ist → je näher an 100% desto besser
- Steigung: Steigung der Gerade der Grafik 'Vorhersage vs. Wahr' → je näher an 1 desto besser

Des Weiteren ist es möglich, die Qualität der Modelle anhand der Auswertung der Gemenge-Spektren (Artanteile unbekannt) zu überprüfen. Werden die Gemenge-Spektren in "Quant 2 Analyse" mit den ausgewählten Modellen berechnet, entsteht eine Liste mit prozentualen Angaben für jede Art des Gemenges. Die Software markiert dabei Werte, die außerhalb des Kalibrationsbereiches ("Außen") liegen und Werte, die aufgrund spektraler Ausreißer ("Ausreißer") auffallen.

Umgang mit Außenwerten bei den Ergebnissen: Werte, die unter 0% und über 100% liegen sind zwar rechnerisch vorhanden, aber nicht logisch. Daher müssen diese Werte angeglichen werden. Folgende Berechnungen werden durchgeführt:

Additiver Shift aller Werte in den positiven Bereich: Das negativste Ergebnis der Vorhersage wird auf alle anderen Ergebniswerte der Vorhersage aufaddiert. Dadurch sind alle Werte im positiven Bereich (s. **Tabelle 11**).

Multiplikative gewichtete Komprimierung: Die Ergebnisse der Vorhersage werden mit 100 multipliziert und durch die Summe der Vorhersagen geteilt. Dadurch sind alle Ergebnisse der Vorhersage wieder im Kalibrationsbereich angesiedelt und der Fehler ist gewichtet verteilt.

Wenn keine Außenwerte vorliegen, aber die Summe der Vorhersagen über 100% ergibt, wird dies durch eine gewichtete Komprimierung ausgeglichen (ohne Shift).

Tabelle 11: Beispiel eines Ergebnisses mit Außenwerten. Zuerst wird ein additiver Shift und dann eine multiplikative gerichtete Komprimierung (mg Komp) durchgeführt, wodurch sich die Ergebnisse wieder im Kalibrationsbereich befinden. Alle Werte sind in % angegeben.

	Vorhersage	add. Shift	mg Komp
Grünroggen	-40	0	0
Ölrettich	10	50	22.73
Inkarnatklee	130	170	77.27
Summe	100	220	100

Alle berechneten Modelle haben einen sehr hohen R^2 bei geringem Bias, mit Steigungen nahe an 1 und guten bis sehr guten RPD-Werten (**Tabelle 12, Tabelle 13**). Die Außenwerte und Ausreißer bei dem 3-Art-Model sollen noch durch weitere Optimierungen verbessert werden. Dadurch wird auch ein besseres R^2 , RPD sowie niedrigere RMSECV/RMSEP sowie niedrigere Ränge erwartet.

Tabelle 12: Details und statistische Werte der 2-Art-Modelle für Lupine-Grünroggen, Ölrettich-Grünroggen und Inkarnatkle-Grünroggen sowie des 3-Art-Modells Ölrettich-Inkarnatkle-Grünroggen für das Jahr 2020. Abkürzungen: LU – Lupine, GR – Grünroggen, ÖR – Ölrettich, IK – Inkarnatkle, Daten-VB – Daten-Vorbehandlung, FB – Frequenzbereiche, 1. Abl. – 1. Ableitung, MSC – multiplikative Streukorrektur, SNV – Vektornormierung, Außen – Außenwerte (in % von der Summe der zugehörigen gemessenen Spektren angegeben), Ausreißer – spektrale Ausreißer (in % von der Summe der zugehörigen gemessenen Spektren angegeben). Bedeutung und Abkürzungen der statistischen Werte werden im Text erläutert.

2020		LU-GR	ÖR-GR	ÖR-IK	ÖR-IK-GR		
					ÖR	IK	GR
Modelname		Model3	Model2oA	Model5	Model8bF		
Daten-VB		1. Abl.+MSC	1. Abl.+MSC	1. Abl.+SNV	1. Ableitung + MSC		
FB		4000-3280	3280-2920	4000-3280	3200-2780		
		1840-1120	2840-1120	2920-2200 1480-760	1780-1300 1200-850		
Kalibration/ interne Validierung	Rang	2	2	4	6	6	4
	R ²	97.82	98.85	95.86	93.86	91.76	96.96
	RPD	6.77	9.34	4.92	4.04	3.48	5.74
	RMSECV	4.42	3.22	6.11	5.75	6.46	4.61
	Bias	± 0.089	± 0.058	± 0.270	-0.21	0.0149	0.0381
	Steigung	0.972	0.983	0.943	0.929	0.907	0.96
externe Validierung	RPD	5.97	6.4	3.9	1.92	2.49	4.96
	RMSEP	4.45	3.99	6.38	7.78	7.95	4.27
	Bias	± 0.651	± 1.060	± 0.498	-0.0487	0.474	-0.71
	Steigung	0.933	0.981	0.891	0.965	0.848	0.974
Gemenge	Außen	1.43	20.00	16.13	26.00	21.33	55.33
	Ausreißer	39.64	19.20	78.71	33.33	32.67	36.00

Tabelle 13: Details und statistische Werte der 2-Art-Modelle für Lupine-Grünroggen, Ölrettich-Grünroggen und Inkarnatkle-Grünroggen sowie des 3-Art-Modells Ölrettich-Inkarnatkle-Grünroggen für das Jahr 2019. Abkürzungen: LU – Lupine, GR – Grünroggen, ÖR – Ölrettich, IK – Inkarnatkle, Daten-VB – Daten-Vorbehandlung, FB – Frequenzbereiche, 1. Abl. – 1. Ableitung, SNV – Vektornormierung), Außen – Außenwerte (in % von der Summe der zugehörigen gemessenen Spektren angegeben), Ausreißer – spektrale Ausreißer (in % von der Summe der zugehörigen gemessenen Spektren angegeben). Bedeutung und Abkürzungen der statistischen Werte werden im Text erläutert.

2019		LU-GR	ÖR-GR	ÖR-IK-GR			
				Ölrettich	Inkarnatkle	Grünroggen	
Model-Name		Model3	Model3bF	Model2			
Daten-VB		1. Abl.+SNV	1. Abl.+SNV	1. Abl.+SNV			
FB		4000-3280	3640-3316	3280-2560			
		2560-1120	1787-1538 1292-1018	1840-760			
Rang		2	4	5	6	4	
R ²		97.58	98.29	97.3	97.55	97.6	
Kalibration/ interne Validierung	RPD	6.43	7.65	6.08	6.38	6.45	
	RMSECV	4.66	3.9	5.01	4.6	4.5	
Bias		±0.105	±0.00177	-0.00626	0.0906	0.0141	
Steigung		0.968	0.98	0.961	0.967	0.965	
externe Validierung		RPD	5.16	5.33	2.76	4.13	3.71
		RMSEP	4.93	4.25	5.41	4.91	4.71
		Bias	±0.0925	±0.292	-0.445	0.767	-0.496
		Steigung	0.988	1.006	0.913	0.922	1.01
Gemenge		Außen	10.14	6.06	4.17	6.25	7.29
		Ausreißer	8.76	35.61	12.63	14.97	7.03

Die Grafik Vorhersage vs Wahr zeigt bei allen Modellen deutlich die sehr gute Übereinstimmung der vorgesagten Werte zu den wahren Werten (als Beispiel Abb. 57 Ölrettich-Grünroggen Gemenge aus 2020, Modelldetails in Tabelle 12). Die entsprechenden Grafiken der anderen Modelle bzw. Gemengepartner sind in einem vergleichbaren Zustand. Die Ausnahmen sind beim 3-Art-Gemenge von 2020 die Grafiken für die Arten Ölrettich und Inkarnatkle. Diese zeigen nicht ganz so gute Übereinstimmungen, die Abweichungen treten besonders in den Randbereichen auf.

Vorhersage vs Wahr / Ölrettich [%] / Kreuzvalidierung

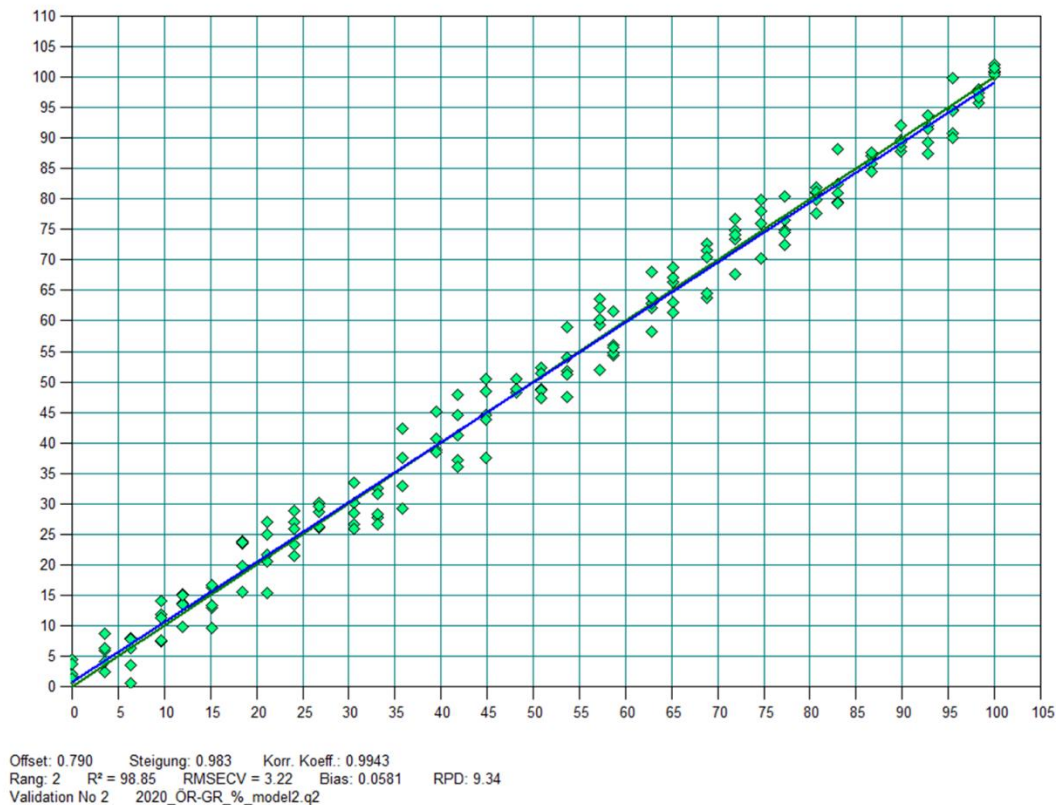


Abb. 57: Vorhersage zu tatsächlichen Werten der künstlichen Mischungen des Ölrettich-Grünroggen-Model von 2020 (in %). Die tatsächlichen Werte bzw. Regression sind in grün dargestellt, die vorhergesagte Regression in blau.

Für alle 2-Art und 3-Art-Gemenge ließen sich zufriedenstellende bis sehr gute Modelle erstellen (Tabelle 12). Durch die veränderte Bewertung der statistischen Werte und abweichende Auswertungen zum Vorjahr wurden auch alle Modelle von 2019 überprüft und erneut berechnet (Tabelle 13). Auch diese haben sich durch die neue Bewertung/Berechnung deutlich verbessert.

Es konnten alle Gemengeproben ausgewertet werden. Diese Ergebnisse geben in % den Anteil der Arten pro Tiefenschicht im Gemenge an und werden an die Arbeitsgruppe INRES (AOL) der Universität Bonn zur weiteren Auswertung verschickt. Die prozentuale Verteilung der Wurzeln in den verschiedenen Tiefenstufen wird hier exemplarisch für die Gemenge Ölrettich-Grünroggen dargestellt (Abb. 58). Es sind mehr Ölrettichwurzeln vorhanden als Grünroggenwurzeln, aber im Oberboden sind zwischen 10 und 40 cm Tiefe vermehrt Wurzeln von Grünroggen zu finden.

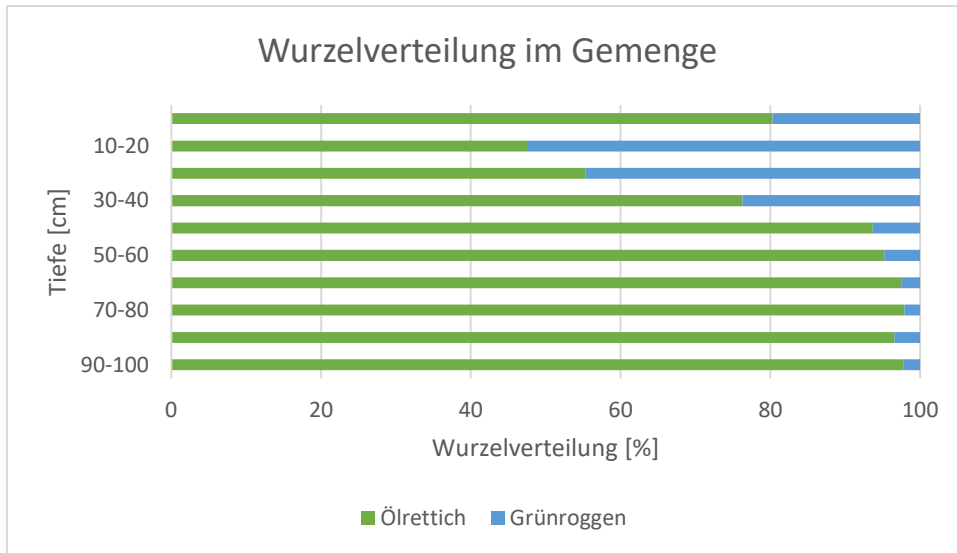


Abb. 58: Prozentuale Wurzelverteilung der Arten im ÖR-GR Gemenge von 2020. Abgebildet ist der Mittelwert pro Tiefenstufe von drei verschiedenen Gemengen.

4.2.4 Eindringwiderstand und Bodenwassergehalt (Dr. Oliver Schmittmann)

Zwischenfruchtversuch im Jahr 2018/2019

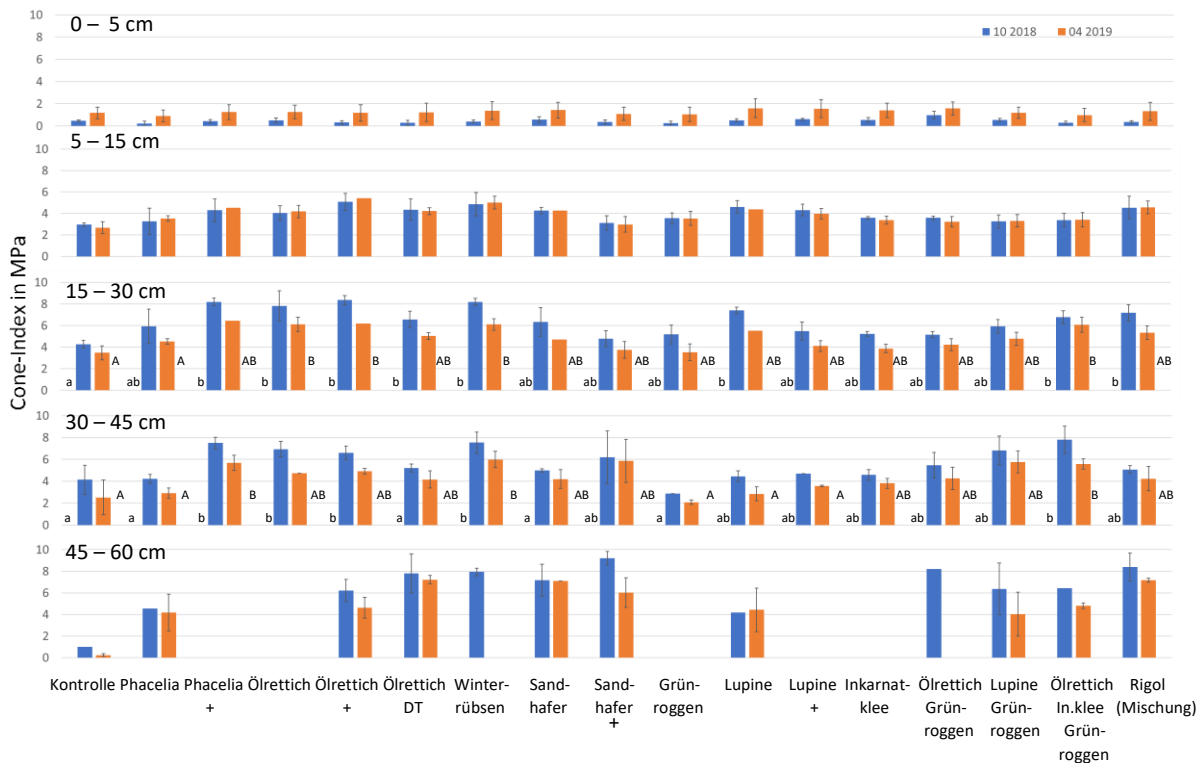


Abb. 59: Ermittelte Eindringwiderstände im Oktober 2018 und April 2019 im Zwischenfruchtversuch I in ausgewählten Tiefenstufen. Varianten: Kontrolle (ohne ZF, unkrautfrei); Phacelia (Beehappy 12 kg/ha (DSV)); Phacelia + (Bearbeitung vor dem ersten Frost); Ölrettich (Silentina 25 kg/ha (Petersen)); Ölrettich + (Bearbeitung vor dem ersten Frost); Ölrettich DT (Ölrettich Deeptill, 12 kg/ha (DSV)); Winter-rübsen (Jupiter 15 kg/ha (Petersen)); Sandhafer (Pratex 80 kg/ha (Petersen)); Sandhafer + (Bearbeitung vor dem ersten Frost); Grünroggen (Bonfire 120 kg/ha (DSV)); Lupine (D260, 120 kg/ha (Bingenheimer)); Lupine + (Bearbeitung vor dem ersten Frost); Inkarnatklee (Linkarus 30 kg/ha (DSV)); Ölrettich/Grünroggen (12,5 / 80 kg/ha); Lupine/Grünroggen (60 / 60 kg/ha); Ölrettich/Inkarnatklee/Grünroggen (8,5 / 10 / 40 kg/ha); Rigol TR (Mischung - 22 kg/ha (DSV)), Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede je Termin (Scheffé-Test, $\alpha = 0,05$).

Im ersten Zwischenfruchtversuch (Abb. 59) konnten aufgrund der Flachgründigkeit des Standortes, des Steingehaltes und hoher Eindringwiderstände durch Trockenheit teilweise nur Eindringtiefen von unter 45 cm realisiert werden. Dementsprechend traten schon im Bereich 5 – 15 cm Widerstände von über 5 MPa und im Bereich von 15 – 30 cm von über 8 MPa auf. Die Eindringwiderstände im Oktober 2019 waren ab einer Tiefe von 5 cm höher als die im Frühjahr.

- **Kontrolle:** Die Kontrollvariante hatte im Oberboden die geringsten Eindringwiderstände.
- **Phacelia:** Phacelia zeigte im Vergleich zur Kontrolle leicht erhöhte Eindringwiderstände.
- **Ölrettich:** Hohe Eindringwiderstände waren überwiegend im Bereich 15 -45 cm.
- **Ölrettich Deeptill:** Die Eindringwiderstände waren ab der Tiefe von 15 cm geringer als beim Standard-Ölrettich.
- **Winterrüben:** In den Winterrüben wurden im Vergleich zu den anderen Varianten die höchsten Eindringwiderstände gemessen.
- **Sandhafer:** Die Eindringwiderstände lagen im mittleren Bereich.
- **Grünroggen:** Im Bereich zwischen 30 und 45 cm wurden die geringsten Eindringwiderstände gemessen.
- **Lupine:** Relativ große Eindringwiderstände zeigten sich im Bereich 15 bis 30 cm.
- **Inkarnatklee:** Mittlere Eindringwiderstände im gesamten Profil.
- **Ölrettich + Grünroggen:** Im Oberboden waren die Eindringwiderstände geringer als bei der Ölrettich-Reinsaat.
- **Lupine + Grünroggen:** Im Bereich 15 – 45 cm waren die Eindringwiderstände etwas höher als bei der Kombination Ölrettich + Grünroggen.
- **Ölrettich + Inkarnatklee + Grünroggen:** Höhere Eindringwiderstände als bei den Zweifachmischungen.
- **Rigol TR Mischung:** Höhere Eindringwiderstände im Oberboden.

Zwischenfruchtversuch im Jahr 2019/2020

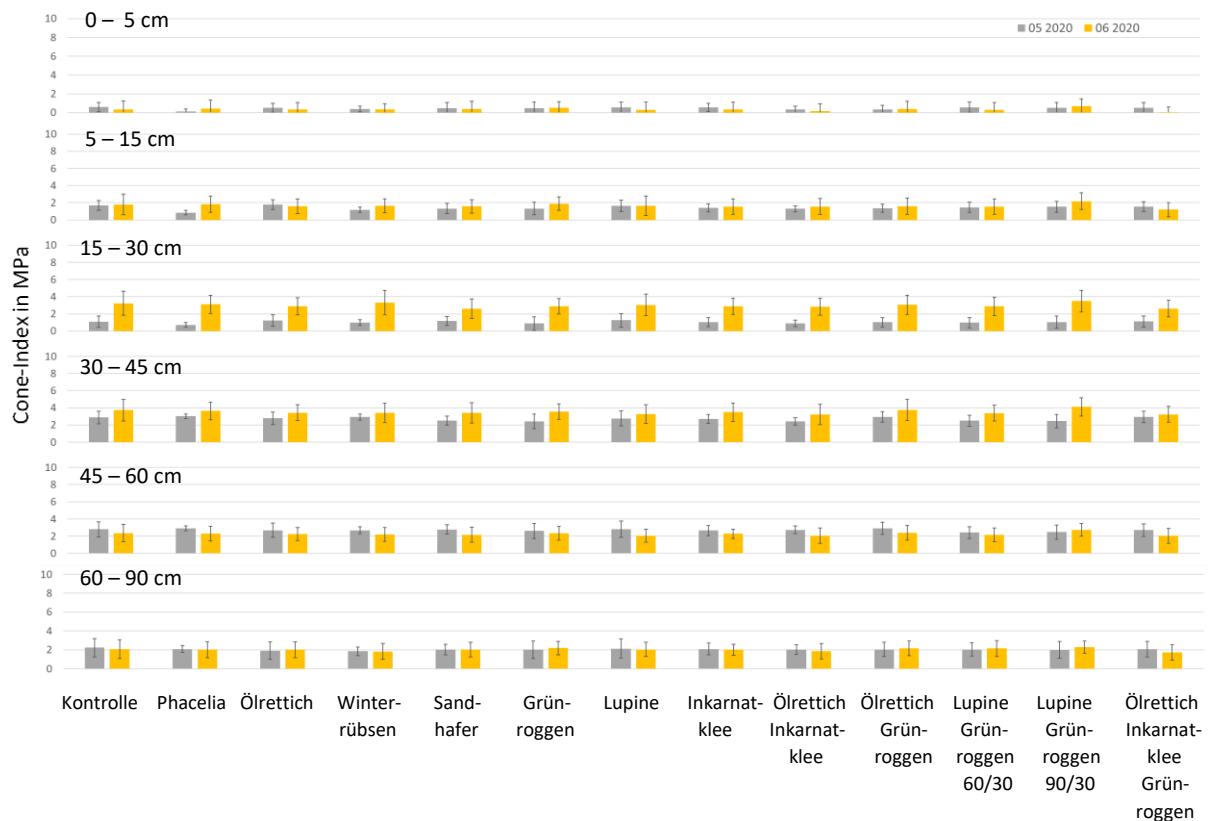


Abb. 60: Ermittelte Eindringwiderstände im Mai und Juni 2020 im Zwischenfruchtversuch II in ausgewählten Tiefenstufen

Im Zwischenfruchtversuch im Jahr 2019/2020 konnten Eindringwiderstände und Wassergehalte bis zu einer Tiefe von 90 cm ermittelt werden (Abb. 60). Aussagen zur Wirkung der Varianten im Ober- und Unterboden sind somit möglich. Die Messungen wurden nach dem Anbau der Zwischenfrüchte im Mai und Juni 2021 durchgeführt. Effekte konnten daher schon bei der ersten Messung beschrieben werden. Die Eindringwiderstände unterscheiden sich bei den Varianten in den unterschiedlichen Tiefenstufen allerdings kaum.

In der Zone 5 – 45 cm haben die Eindringwiderstände im Messzeitraum zugenommen und lagen in der Zone von 15 – 45 cm teilweise bei 4 MPa. Im Bereich 45 – 60 cm sind die Eindringwiderstände in fast allen Varianten gesunken (< 3 MPa). In der Tiefe von 60 – 90 cm lagen die Eindringwiderstände bei allen Varianten um 2 MPa.

Wie bei der Bestimmung der Eindringtiefen sind auch bei den Wassergehalten (Abb. 61) kaum Unterschiede zwischen den Varianten zu erkennen. Im Unterboden zwischen 30 - 60 cm war die Differenz der Bodenfeuchte innerhalb der Varianten am größten. Im Oberboden zeigte Ölrettich den größten Wasserverlust. Phacelia und Inkarnatklée zeigte die höchste Zunahme im Wassergehalt im Oberboden. In der Zone von 15 – 30 cm zeigten ausschließlich die Kontrolle, Phacelia und Grünroggen keine Unterschiede bei der Wasserbilanz. Die anderen Varianten zeigten Wasserverluste. Der Inkarnatklée hatte in der Schicht 5 – 15 cm mit 23 Vol.% den größten Wassergehalt. Signifikante Unterschiede zwischen Reinsaat und Mischungen konnten nicht festgestellt werden.

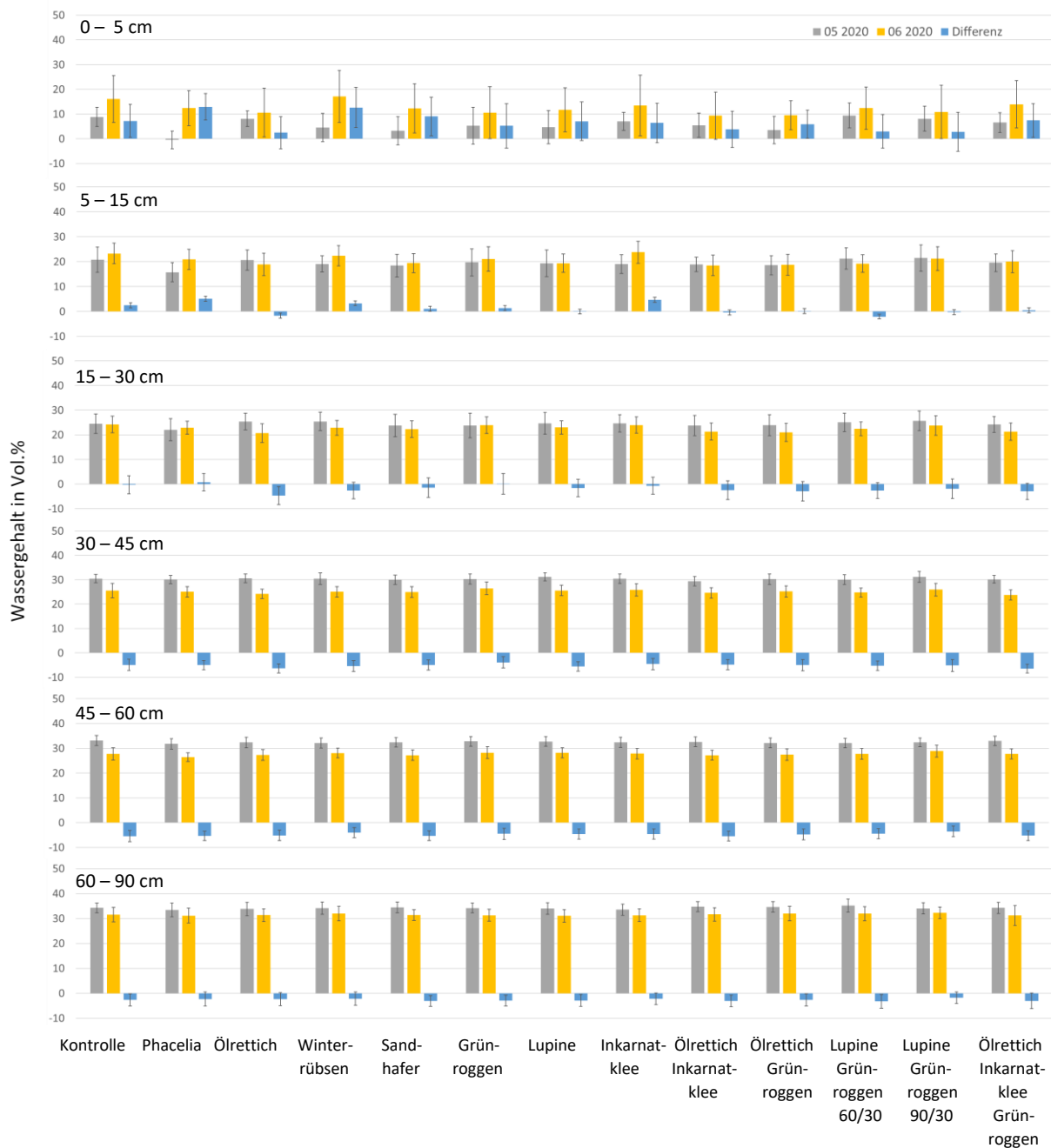


Abb. 61: Ermittelte Bodenfeuchten und Wasserdifferenz im Mai und Juni 2020 im Zwischenfruchtversuch II in ausgewählten Tiefenstufen

4.2.5 Bodenphysik (Dr. Marc-Oliver Göbel und Prof. Dr. Stephan Peth)

Nach der Zwischenfruchtperiode

Die Wasserretentionskurven zeigen typische tiefenspezifische Verläufe, wobei die Böden in 15 cm Tiefe generell das größte und in 40 cm Tiefe das geringste Gesamtporenvolumen zeigen (Abb. 62).

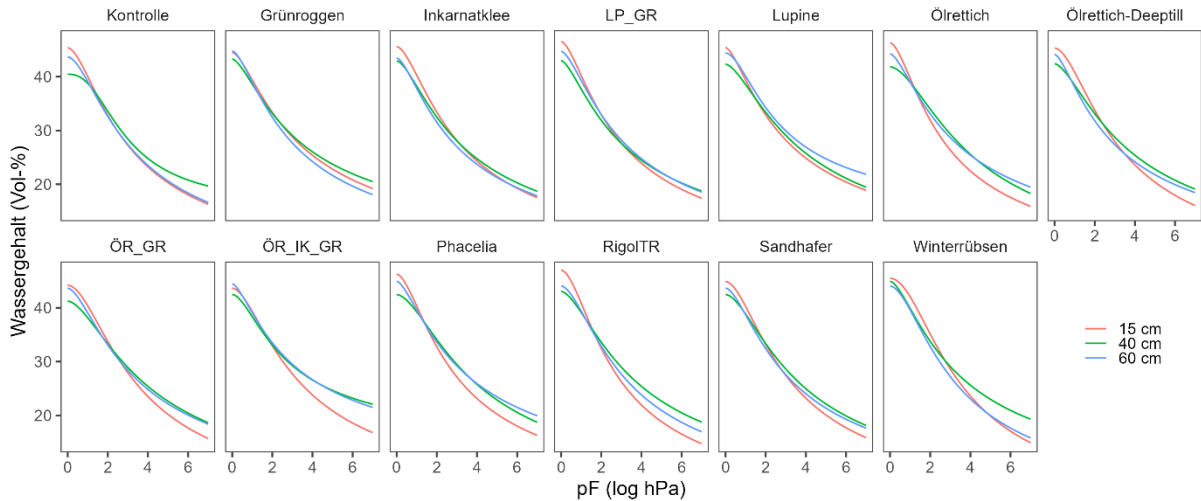


Abb. 62: Wasserretentionskurven der nach der Zwischenfruchtperiode (März 2019) am Standort Wiesengut entnommenen Bodenproben, differenziert nach Anbauvariante und Bodentiefe.

Korrespondierend mit den Wasserretentionskurven, lässt sich bei den Lagerungsdichten eine leicht verdichtete Schicht in ca. 40 cm Tiefe (Pflugsohlenbereich) beobachten, die durchgängig bei allen Varianten zu finden ist, sich jedoch besonders ausgeprägt bei der Kontrolle zeigt (Abb. 63, oben). Bei der Kontrollvariante zeigt sich ein signifikanter ($p < 0,05$) Unterschied in der Lagerungsdichte zwischen der verdichteten Schicht und 15 cm Tiefe. Innerhalb der Beprobungstiefen gibt es jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Anbauvarianten und der Kontrolle. Allerdings lässt sich feststellen, dass in 40 cm Tiefe die meisten Anbauvarianten eine leichte Tendenz zur Verringerung der Lagerungsdichte im Vergleich zur Kontrolle zeigen.

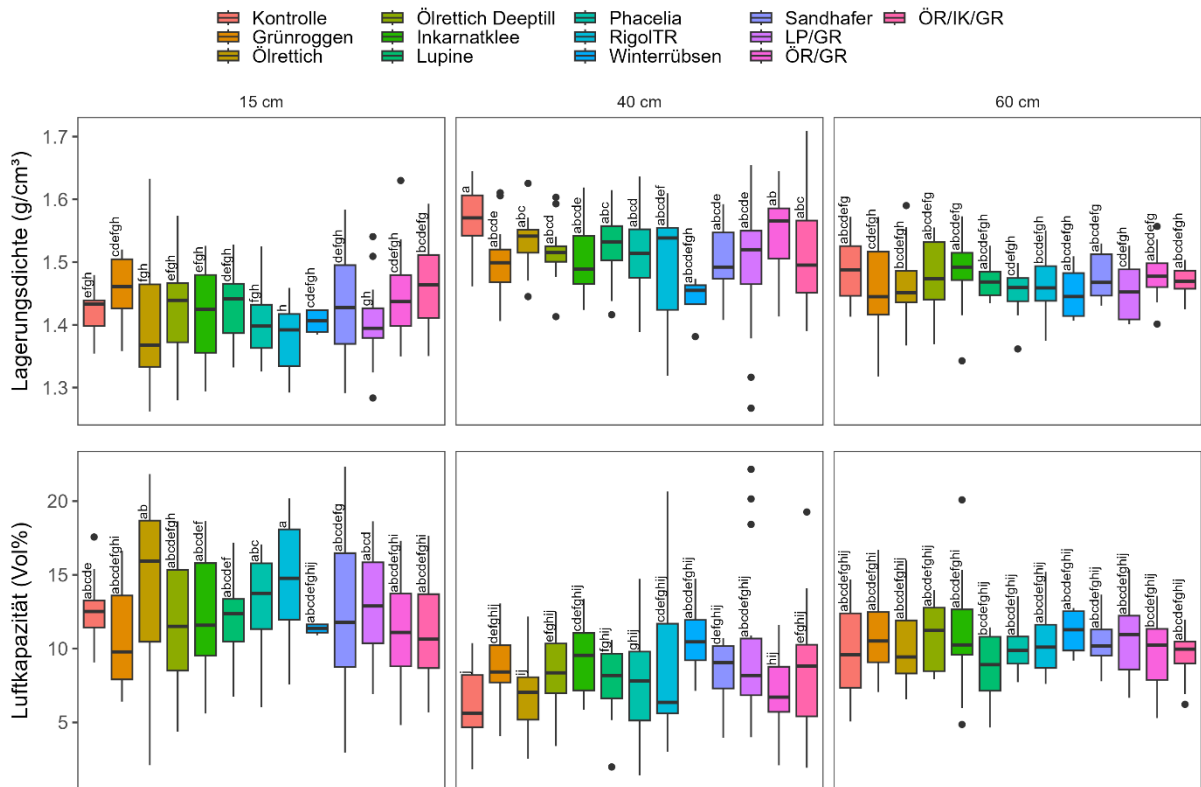


Abb. 63: Lagerungsdichte (oben) und Luftkapazität (unten) der nach der Zwischenfruchtperiode (März 2019) am Standort Wiesengut entnommenen Bodenproben, differenziert nach Anbauvariante und Bodentiefe. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten und Tiefen ($p < 0,05$; Tukey-HSD-Test).

Der verdichtete Bereich in 40 cm Tiefe zeigt eine sehr geringe Luftkapazität (LK) mit Werten von teilweise < 10% (Abb. 63, unten). Im Vergleich zur Kontrolle zeigen einige Anbauvarianten eine leicht erhöhte LK an, wobei diese Unterschiede jedoch nicht signifikant sind. In 15 und 60 cm Tiefe sind dagegen keine klaren Unterschiede in der LK zwischen den Anbauvarianten und im Vergleich zur Kontrolle festzustellen.

In 40 cm Tiefe spiegeln sich die Ergebnisse der LK bei der nutzbaren Feldkapazität (nFK), die ein Maß für den pflanzenverfügbaren Wasserspeicher des Bodens darstellt (Abb. 64, oben). Mit Ausnahme der Variante Ölrettich + Inkarnatklee + Grünroggen, die in 40 cm Tiefe eine signifikante ($p = 0,003$) Verringerung der nFK im Vergleich zur Kontrolle zeigt, sind die Effekte jedoch nicht signifikant.

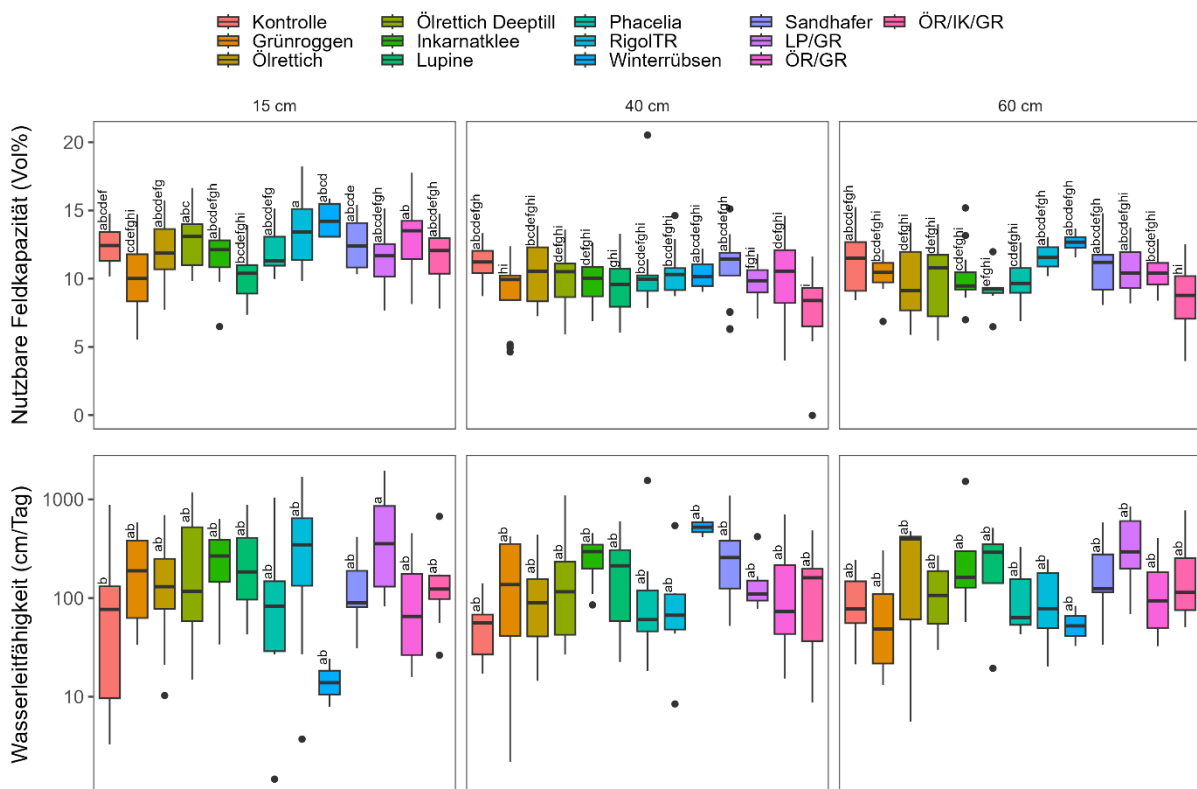


Abb. 64: Nutzbare Feldkapazität (oben) und gesättigte Wasserleitfähigkeit (unten) der nach der Zwischenfruchtperiode (März 2019) am Standort Wiesengut entnommenen Bodenproben, differenziert nach Anbauvariante und Bodentiefe. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten und Tiefen ($p < 0,05$; Tukey-HSD-Test; Durchführung des HSD-Tests für die Wasserleitfähigkeit an log-transformierten Daten).

Bei der gesättigten Wasserleitfähigkeit zeigt sich in allen Tiefen mit wenigen Ausnahmen eine tendenzielle Zunahme der Werte im Vergleich zur Kontrolle. (Abb. 64, unten). Mit Ausnahme der Variante Lupine + Grünroggen ($p < 0,05$) ist diese Zunahme jedoch nicht signifikant.

Nach Ernte der Nachfrucht

Vergleichbar mit den Ergebnissen der Bodenproben, die 2019 direkt nach der Zwischenfruchtperiode entnommen wurden, zeigen die Wasserretentionskurven nach Ernte der Nachfrucht typische

tiefenspezifische Verläufe, wobei auch hier die Böden in 40 cm Tiefe das geringste Gesamtporenvolumen aufweisen (Abb. 65). Allerdings sind hier die Unterschiede zwischen den Proben aus 40 cm Tiefe und denen aus den anderen Tiefen deutlicher ausgeprägt, wobei die Unterschiede zwischen 15 und 60 cm Tiefe nur marginal sind.

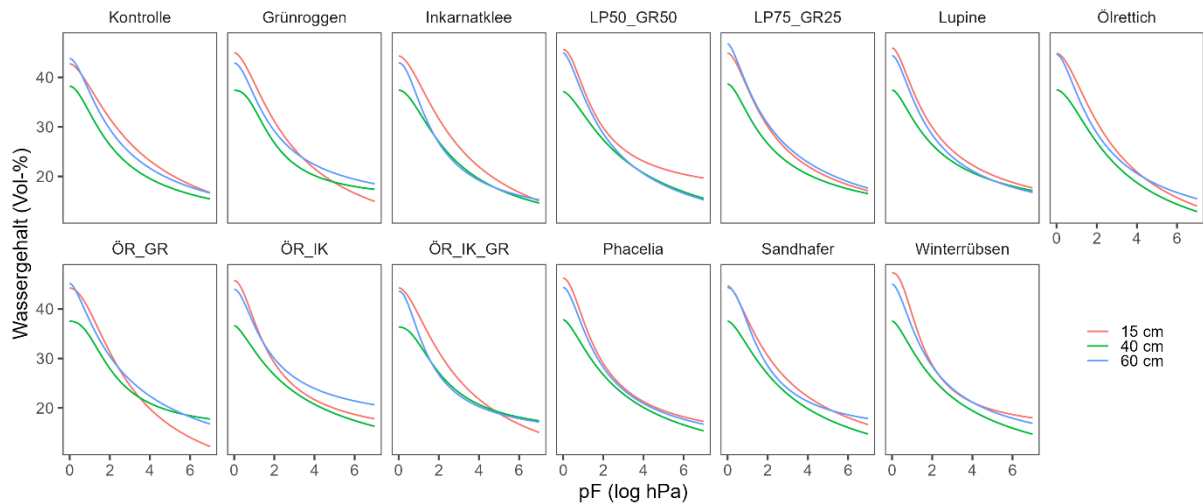


Abb. 65: Wasserretentionskurven der nach der Weizenernte (August 2020) am Standort Wiesengut entnommenen Bodenproben, differenziert nach Anbauvariante und Bodentiefe (n = 16).

Die deutlichen Unterschiede im Wasserretentionsverhalten spiegeln sich auch in der Lagerungsdichte wider. Auch die im August 2020 entnommenen Proben zeigen eine verdichtete Schicht in ca. 40 cm Tiefe, die durchgängig in allen Varianten anzutreffen ist und eine signifikant ($p < 0,05$) höhere Lagerungsdichte aufweist, als die beiden anderen Tiefen (Abb. 66, oben). In 15 cm Tiefe ist für alle Varianten eine Verringerung der Lagerungsdichte im Vergleich zur Kontrolle zu beobachten, die beim Anbau von Lupine, Phacelia und Winterrübsen signifikant ($p < 0,05$) ist. Korrespondierend zur Lagerungsdichte ist die LK in 40 cm sehr gering, mit Werten, die teilweise deutlich unter 10% liegen (Abb. 66, unten). Auch bei der LK ist in 15 cm Tiefe ein deutlicher Effekt der Anbauvarianten zu erkennen. Für alle Varianten zeigt sich eine deutliche Erhöhung der LK, die beim Anbau von Lupine, Lupine + Grünroggen (50:50), Ölrettich + Inkarnatklee, Phacelia und Winterrübsen signifikant ($p < 0,01$) ist. Auch in 60 cm Tiefe kommt es für die meisten Varianten zu einer Erhöhung der LK, jedoch ist diese Erhöhung nicht signifikant. In 40 cm Tiefe kommt es dagegen fast durchweg zu einer, allerdings nicht signifikanten Verringerung der LK im Vergleich zur Kontrolle.

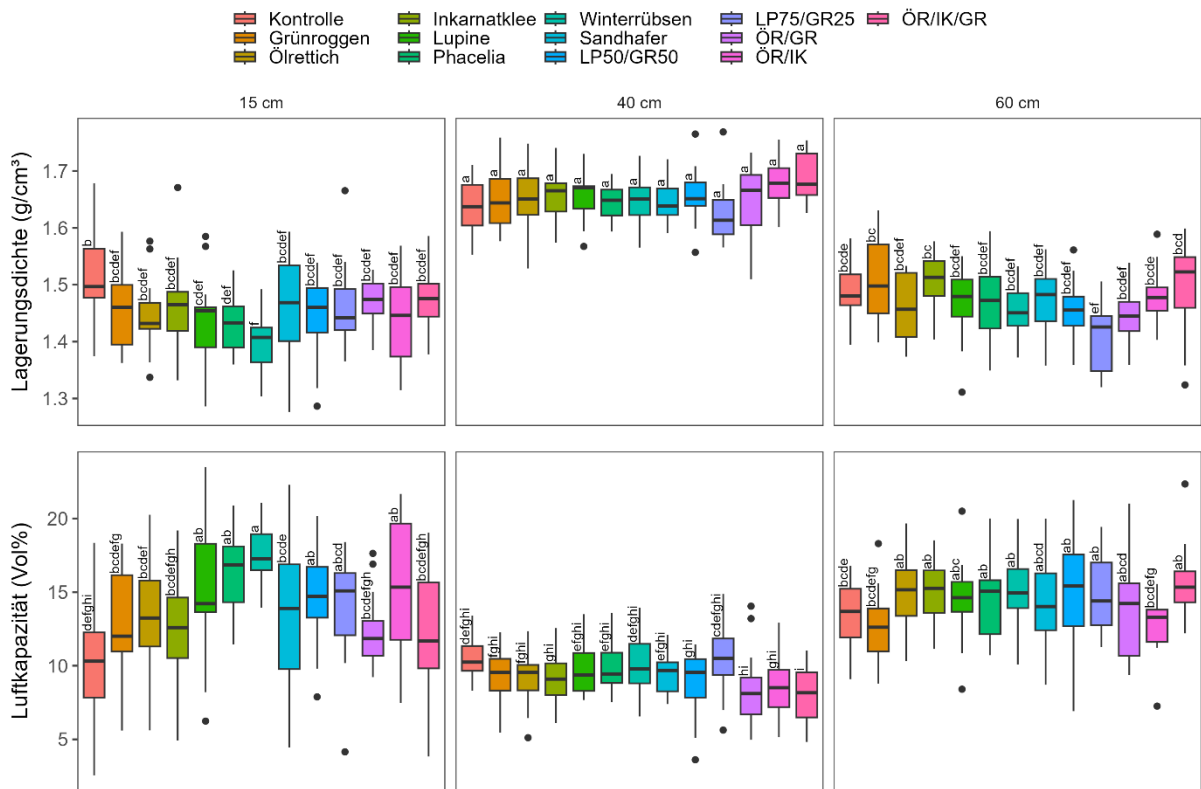


Abb. 66: Lagerungsdichte (oben) und Luftkapazität (unten) der nach der Weizenernte (August 2020) am Standort Wiesengut entnommenen Bodenproben, differenziert nach Anbauvariante und Bodentiefe (n = 16). Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten und Tiefen (p < 0,05; Tukey-HSD-Test).

Im Hinblick auf die nFK zeigt sich in allen Tiefen ein indifferenter Effekt der Anbauvarianten, wobei der Anbau von Ölrettich + Grünroggen zu einer signifikanten (p < 0,001) Erhöhung der nFK geführt hat (Abb. 67, oben). Anders als bei den nach der Zwischenfruchtperiode entnommenen Proben korrespondiert ein Anstieg der LK jedoch nicht generell mit einer Verringerung der nFK, sondern es gibt durchaus Anbauvarianten, bei denen sowohl die LK als auch die nFK in 15 cm Tiefe angestiegen sind.

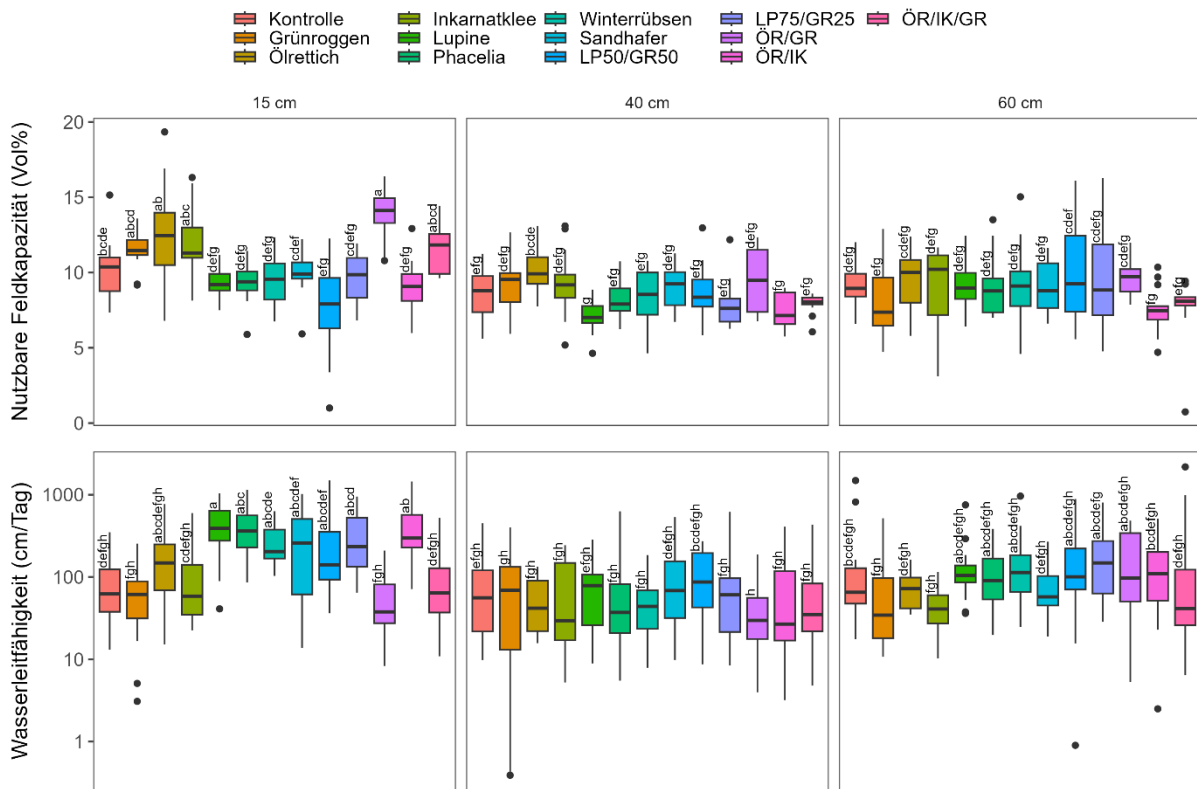


Abb. 67: Nutzbare Feldkapazität (oben) und gesättigte Wasserleitfähigkeit (unten) der nach der Weizenernte (August 2020) am Standort Wiesengut entnommenen Bodenproben, differenziert nach Anbauvariante und Bodentiefe (n = 16). Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten und Tiefen ($p < 0,05$; Tukey-HSD-Test; Durchführung des HSD-Tests für die Wasserleitfähigkeit an log-transformierten Daten).

Für die meisten Anbauvarianten zeigt sich in 15 cm Tiefe eine Erhöhung der gesättigten Wasserleitfähigkeit, die beim Anbau von Lupine, Ölrettich + Inkarnatklie und Phacelia signifikant ($p < 0,05$) ist (Abb. 67, unten). Dagegen führen die Anbauvarianten in 40 und 60 cm Tiefe generell zu einer Verringerung der gesättigten Wasserleitfähigkeit, wobei die Effekte jedoch schwächer ausgeprägt und generell nicht signifikant sind im Vergleich mit dem Oberboden. Der geringe Unterschied in den unteren Tiefen könnte durch die Belegung der Bioporen durch Weizenwurzeln und Reste der Zwischenfrüchte erklärt werden. Dies konnte (wenn auch nur subjektiv) im Feld beobachtet werden.

4.3 Arbeitspaket 3

4.3.1 Ergebnisse Vorversuche – Säulen (Roman Kemper)

In den Vorversuchen mit Bodensäulen mit einer verdichteten Schicht zeigte sich für die Futterpflanzen Luzerne und Wegwarte unterhalb der verdichteten Schicht ein ähnlicher mittlerer Wurzeldurchmesser sowie eine ähnliche Wurzelrockenmasse. Die Wurzellängendichte in diesem Bereich lag für die Luzerne zwischen 1 und 3 cm/cm³ und für die Wegwarte bei bis zu 4 cm/cm³. Aus zwei Gründen wurde die Wegwarte für die Feldversuche als pfahlwurzelnde Futterpflanze ausgewählt: erstens aufgrund der etwas höheren Wurzellängendichte in den tieferen Schichten; zweitens da Wegwarte eine nicht-legume Futterpflanze ist und somit Bodenstruktureffekte der Wegwarte als Vorfrucht nicht von Stickstofffixierung überlagert werden.

Für die Zwischenfrüchte zeigte sich ein höherer mittlerer Wurzeldurchmesser für die Lupine nur in den beiden Tiefenschichten direkt unter der Verdichtung, nicht aber über das ganze untere Bodenprofil. In diesem Bereich gab es keine Unterschiede zu den anderen drei Zwischenfrüchten. In den tieferen Schichten zeigten sich, teilweise signifikant, höhere Werte für Ölrettich und Tiefenrettich in der Wurzellängendichte. Die Werte für Ölrettich lagen bei bis zu 1 cm/cm³, für Tiefenrettich bei 0,75 cm/cm³, und für Lupine und Phacelia bei 0,25 cm/cm³. Daher wurden Ölrettich und Tiefenrettich als Zwischenfrüchte für den Feldversuch ausgewählt.

4.3.2 Sprossmasse, Nährstoffgehalte und Wurzelwachstum von Vor- und Nachfrüchten sowie Bioporendichte und mineralischer Bodenstickstoff (Roman Kemper)

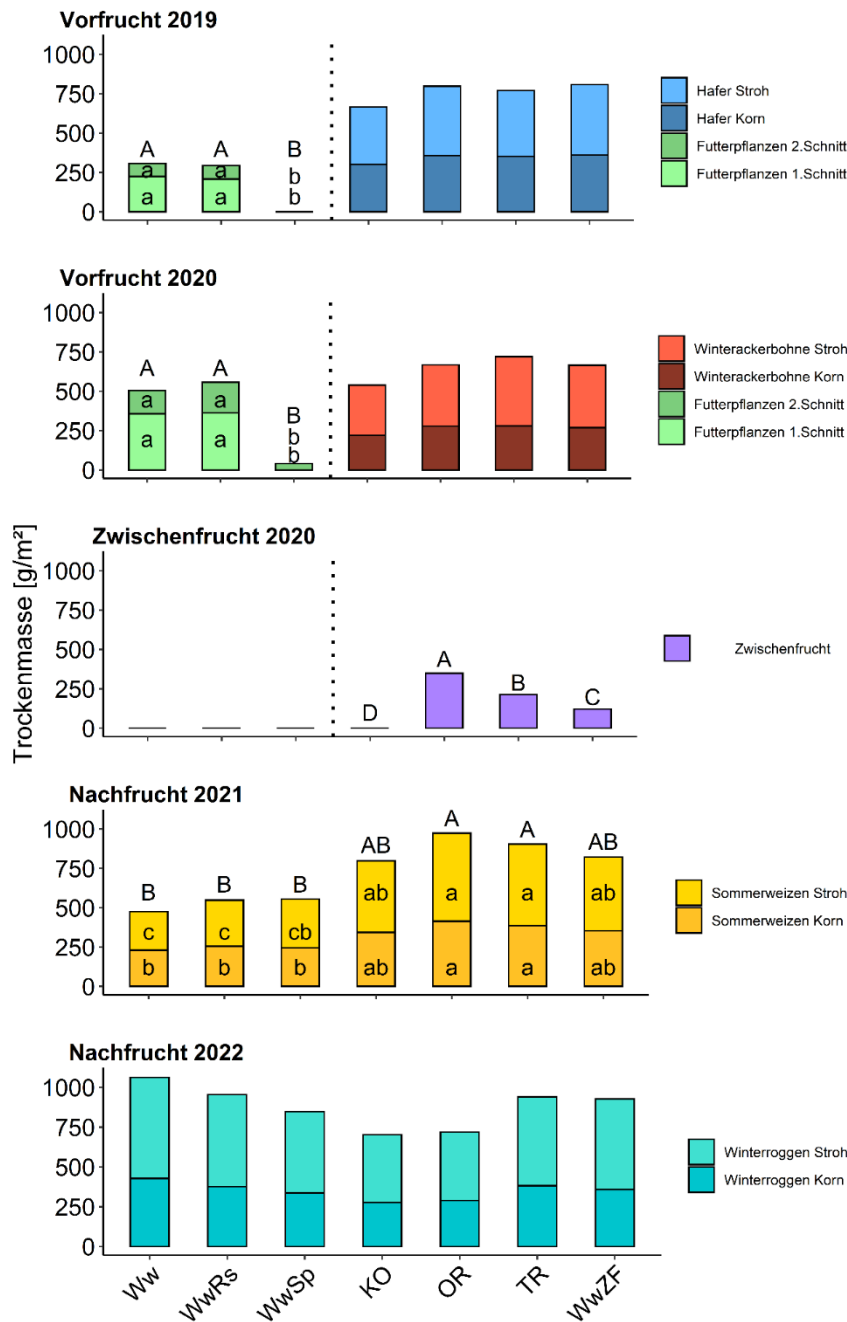


Abb. 68: Trockenmasse-Erträge der Vorfrüchte in 2019 und 2020, der Zwischenfrucht in 2020 sowie der Nachfrüchte in 2021 und 2022. Verglichen wurden drei Varianten einer Futterbau-Fruchtfolge (Ww = Wegwarte, WwRs = Wegwarte + Rohrschwengel, WwSp = Wegwarte-Spätsaat) und drei Varianten einer Druschfrucht-Fruchtfolge mit Zwischenfrüchten (OR = Ölrettich, TR = Tiefenrettich, WwZF = Wegwarte als Zwischenfrucht) sowie eine Kontrolle-Variante, die weder eine Futterpflanze noch eine Zwischenfrucht enthält. Unterschiedliche Kleinbuchstaben Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$ HSD-Test) zwischen den Varianten innerhalb eines Schnittes bzw. Erntefraktion. Unterschiedliche Großbuchstaben Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$ HSD-Test) der Gesamttrockenmasse zwischen den Varianten.

Die Vorfrüchte Hafer und Winterackerbohne in 2019 und 2020 in den Ackerbaufruchtfolgen (KO, OR, TR, WwZF) zeigten keine Unterschiede in der Trockenmasse (Abb. 68). In den Futterbaufruchtfolgen (Ww, WwRs, WwSp) unterschieden sich die Trockenmasseerträge der beiden früh gesäten Varianten

von der Wegwarte-Spätsaat-Variante in beiden Jahren. Die Zwischenfrucht-Trockenmasseerträge unterschieden sich signifikant. Die höchste Biomasse mit 3,5 t/ha erreichte der Ölrettich, gefolgt vom Tiefenrettich. Die geringste Trockenmasse erbrachte die Wegwarte als Zwischenfrucht. Die erste Nachfrucht Sommerweizen erreichte die höchsten Erträge nach Ölrettich und Tiefenrettich, welche signifikant höher waren als nach den Futterpflanzen. Die Weizenerträge nach Wegwarte als Zwischenfrucht und nach der Kontrolle lagen dazwischen. Bei der Nachfrucht Winterroggen in 2022 gab es keine signifikanten Unterschiede im Trockenmasseertrag. Jedoch zeigte sich in der Tendenz, dass die Roggenerträge nach den Futterpflanzen höher und nach den Zwischenfrüchten bzw. der Kontrolle geringer waren.

Die N-Aufnahme im Spross (Abb. 69) spiegelt im Wesentlichen die Ergebnisse der Trockenmasse wider. Die Zwischenfrüchte variierten jedoch nicht in der Spross-N-Aufnahme.

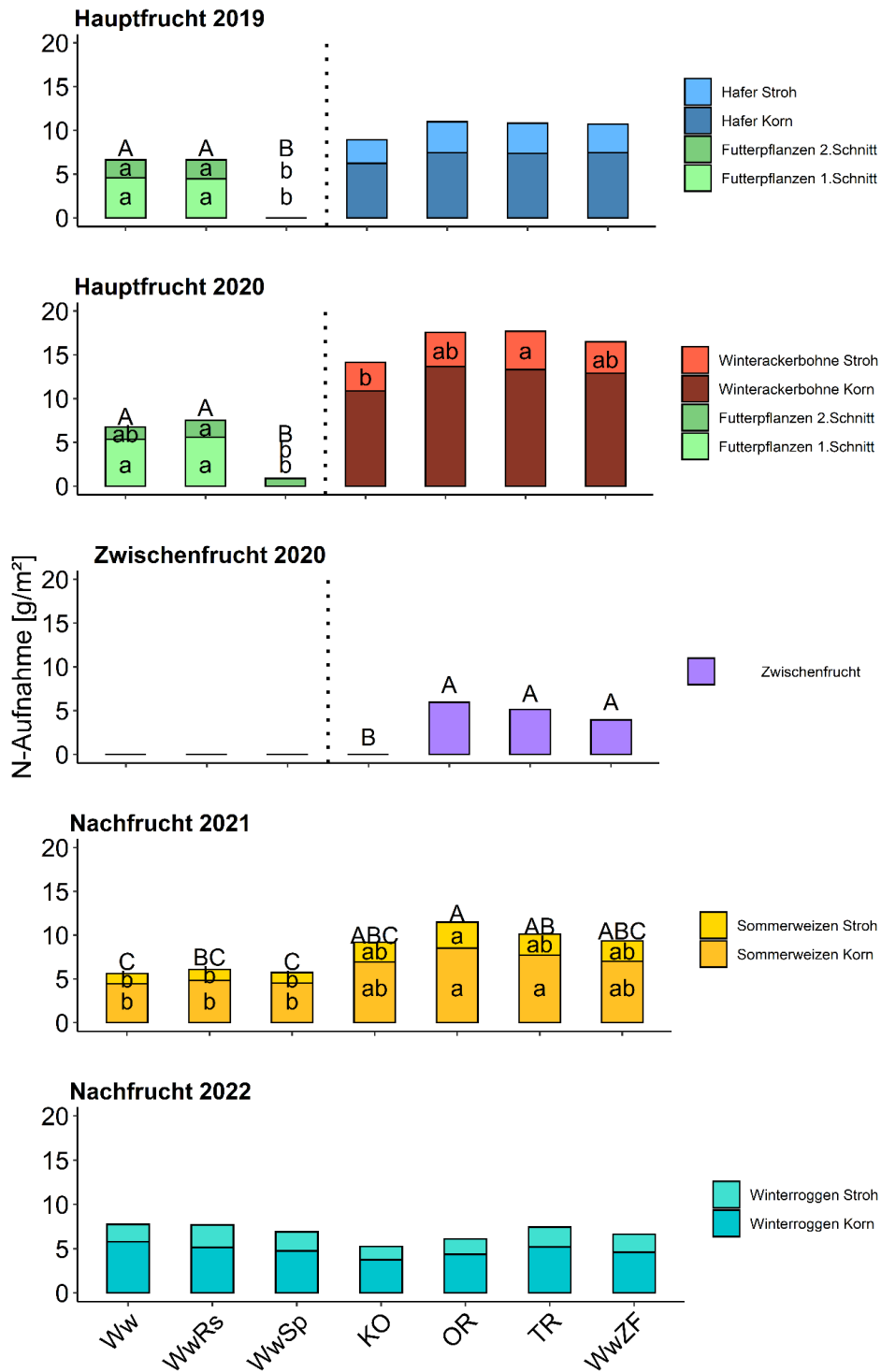


Abb. 69: N-Aufnahme im Spross der Vorfrüchte in 2019 und 2020, der Zwischenfrucht in 2020 sowie der Nachfrüchte in 2021 und 2022. Verglichen wurden drei Varianten einer Futterbau-Fruchtfolge (Ww = Wegwarte, WwRs = Wegwarte + Rohrschwengel, WwSp = Wegwarte-Spätsaat) und drei Varianten einer Druschfrucht-Fruchtfolge mit Zwischenfrüchten (OR = Örettich, TR = Tiefenrettich, WwZF = Wegwarte als Zwischenfrucht) sowie eine Kontrolle-Variante, die weder eine Futterpflanze noch eine Zwischenfrucht enthält. Unterschiedliche Kleinbuchstaben Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$ HSD-Test) zwischen den Varianten innerhalb eines Schnittes bzw. Erntefraktion. Unterschiedliche Großbuchstaben Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$ HSD-Test) der gesamten N-Aufnahme im Spross zwischen den Varianten.

Tabelle 14: Feldaufgang, Ertragskomponenten sowie Blattflächenindex (BFI) der Nachfrüchte Sommerweizen und Winterroggen in Abhängigkeit von der Vorfrucht. Verglichen wurden drei Varianten einer Futterbau-Fruchtfolge (Ww = Wegwarte, WwRs = Wegwarte + Rohrschwengel, WwSp = Wegwarte-Spätsaat) und drei Varianten einer Druschfrucht-Fruchtfolge mit Zwischenfrüchten (OR = Ölrettich, TR = Tiefenrettich, WwZF = Wegwarte als Zwischenfrucht) sowie eine Kontrolle-Variante, die weder eine Futterpflanze noch eine Zwischenfrucht enthält. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$ HSD-Test) zwischen den Varianten innerhalb eines Jahres.

Jahr	Nachfrucht	Vorfrucht	Feldaufgang (Pflanzen/m ²)	Ährentragende Halme/m ²	TKM (g) bei 86% TS	Körner/ Ähre	BFI Schossen	zum BFI zur Blüte
2021	SW	Ww	332,0	175 b	35,9 b	35,8 b	1,57 d	1,60 d
2021	SW	WwRs	311,3	172 b	36,6 ab	40,9 ab	1,61 d	1,74 cd
2021	SW	WwSp	325,3	171 b	37,9 ab	37,9 b	2,11 cd	2,02 bcd
2021	SW	KO	338,7	189 ab	36,6 ab	49,6 ab	2,57 bc	2,68 abcd
2021	SW	OR	357,3	229 a	37,7 ab	48,2 ab	4,04 a	2,85 abc
2021	SW	TR	334,0	201 ab	37,7 ab	51,3 ab	4,29 a	3,41 a
2021	SW	WwZF	347,3	172 b	38,0 a	54,6 a	3,20 b	2,89 ab
2022	WR	Ww	115,1	229	37,8	49,6 a	1,06	9,94
2022	WR	WwRs	102,0	209	38,4	47,1 ab	0,94	10,62
2022	WR	WwSp	113,0	198	37,9	44,9 ab	0,86	10,25
2022	WR	KO	111,1	177	37,7	41,6 ab	0,70	8,50
2022	WR	OR	118,0	172	38,9	38,9 b	0,72	7,77
2022	WR	TR	111,5	209	38,5	47,4 ab	0,84	8,68
2022	WR	WwZF	112,5	214	37,4	45,0 ab	0,91	8,86

Beim Sommerweizen gab es signifikante Unterschiede in der Ertragskomponenten ährentragende Halme, Tausendkornmasse und den Körnern/Ähre sowie signifikante Unterschiede im Blattflächenindex (Tabelle 14). Höchste Werte wurden hierbei eher nach den Zwischenfrüchten, niedrigste Werte nach den Futterpflanzen gefunden. Für die in Tabelle 14 dargestellten Parameter gab es für die zweite Nachfrucht Winterroggen nur signifikante Unterschiede für die Körner/Ähre mit dem höchsten Wert nach Wegwarte und dem geringsten nach Ölrettich.

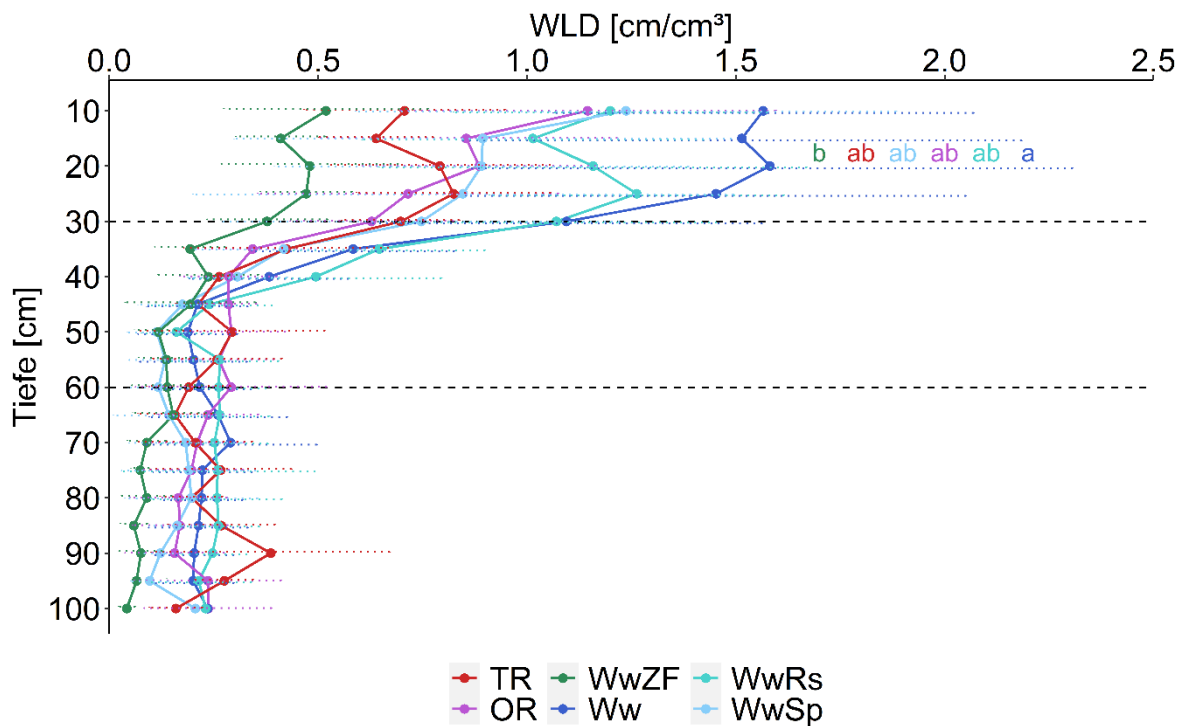


Abb. 70: Wurzellängendichte (WLD) über das gesamte Bodenprofil bis 100 cm Tiefe der Futterpflanzen (Ww = Wegwarte, WwRs = Wegwarte + Rohrschwengel, WwSp = Wegwarte-Spätsaat) 13 bzw. 18 Monate nach der Ansaat und der Zwischenfrüchte (OR = Ölerrettich, TR = Tiefenerrettich, WwZF = Wegwarte als Zwischenfrucht) 3 Monate nach der Ansaat im Oktober 2020 ermittelt mit der Profilwandmethode. Unterschiedliche Kleinbuchstaben Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$ HSD-Test) innerhalb der zusammengefassten Tiefenstufen 0-30 cm, 30-60 cm, 60-100 cm.

Die an der Profilwand ermittelte Wurzellängendichte der Futterpflanzen und der Zwischenfrüchte im Herbst 2020 (Abb. 70) wies im Oberboden höchste Werte für die Wegwarte-Reinsaat und die geringsten Werte für die Wegwarte als Zwischenfrucht auf. Die WLD der anderen Varianten lag dazwischen. Im Unterboden gab es keine signifikanten Unterschiede in der Wurzellängendichte. Die Varianten Wegwarte-Spätsaat und Wegwarte-Zwischenfrucht wiesen tendenziell geringe WLD auf.

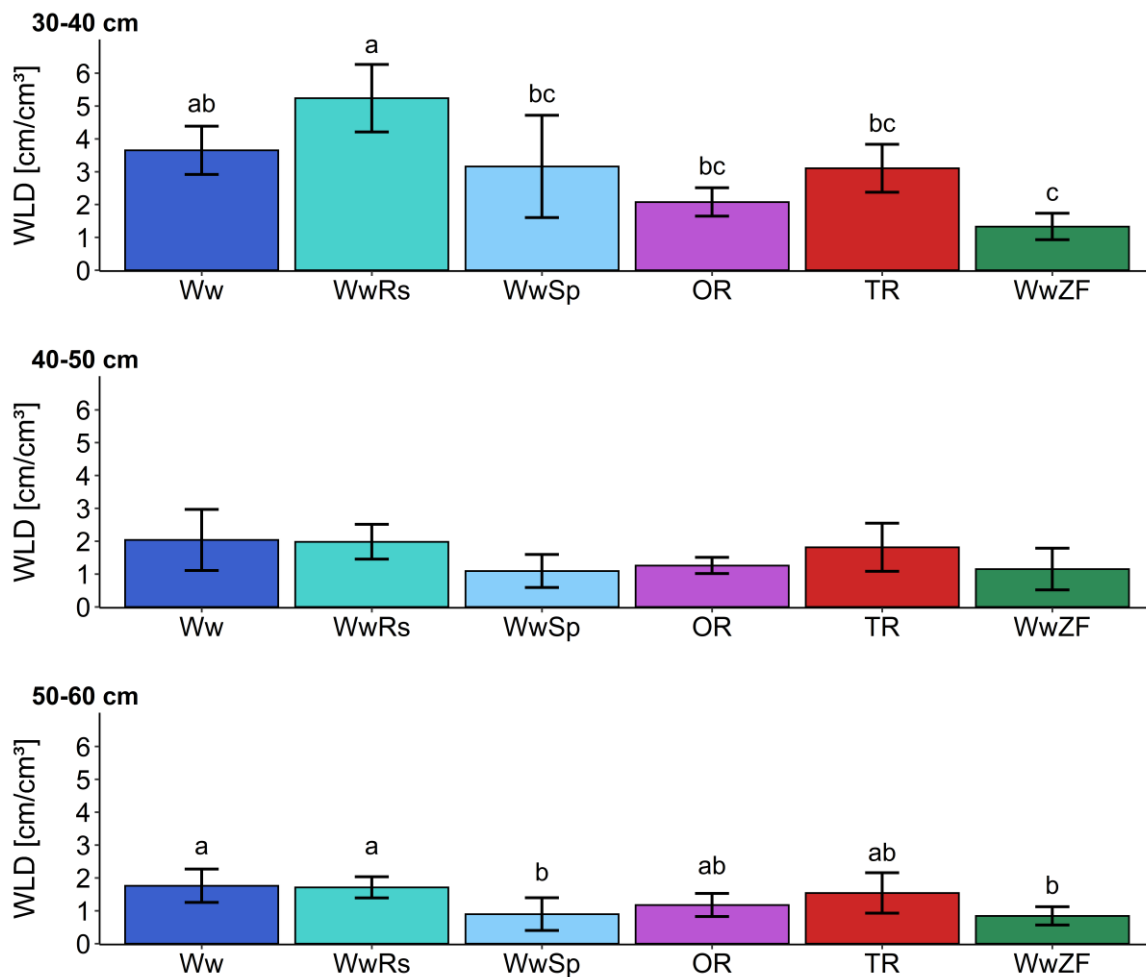


Abb. 71: Wurzellängendichte (WLD) der Futterpflanzen (Ww = Wegwarte, WwRs = Wegwarte + Rohrschwengel, WwSp = Wegwarte-Spätsaat) 13 bzw. 18 Monate nach der Ansaat und der Zwischenfrüchte (OR = Ölrettich, TR = Tiefenrettich, WwZF = Wegwarte als Zwischenfrucht) 3 Monate nach der Ansaat im Oktober 2020 in den Tiefen der Hauptverdichtungszone 30-40 cm, 40-50 cm, 50-60 cm, ermittelt mit der Monolith-Methode. Unterschiedliche Kleinbuchstaben Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$ HSD-Test).

Die mit der Monolithmethode ermittelte WLD in der Hauptverdichtungszone (Abb. 71) war in der Tiefe 30-40 cm für die Wegwarte-Rohrschwengel-Mischung mit 5 cm/cm^3 am höchsten, signifikant von der Wegwarte als Zwischenfrucht verschieden, und gefolgt von der Wegwarte. Die anderen Varianten waren dazwischenliegend. In der Tiefe 40-50 cm gab es keine Unterschiede. In 50-60 cm Tiefe unterschied sich die höchste WLD von Wegwarte und Wegwarte-Rohrschwengel von der geringsten WLD von Wegwarte-Spätsaat und Wegwarte-Zwischenfrucht.

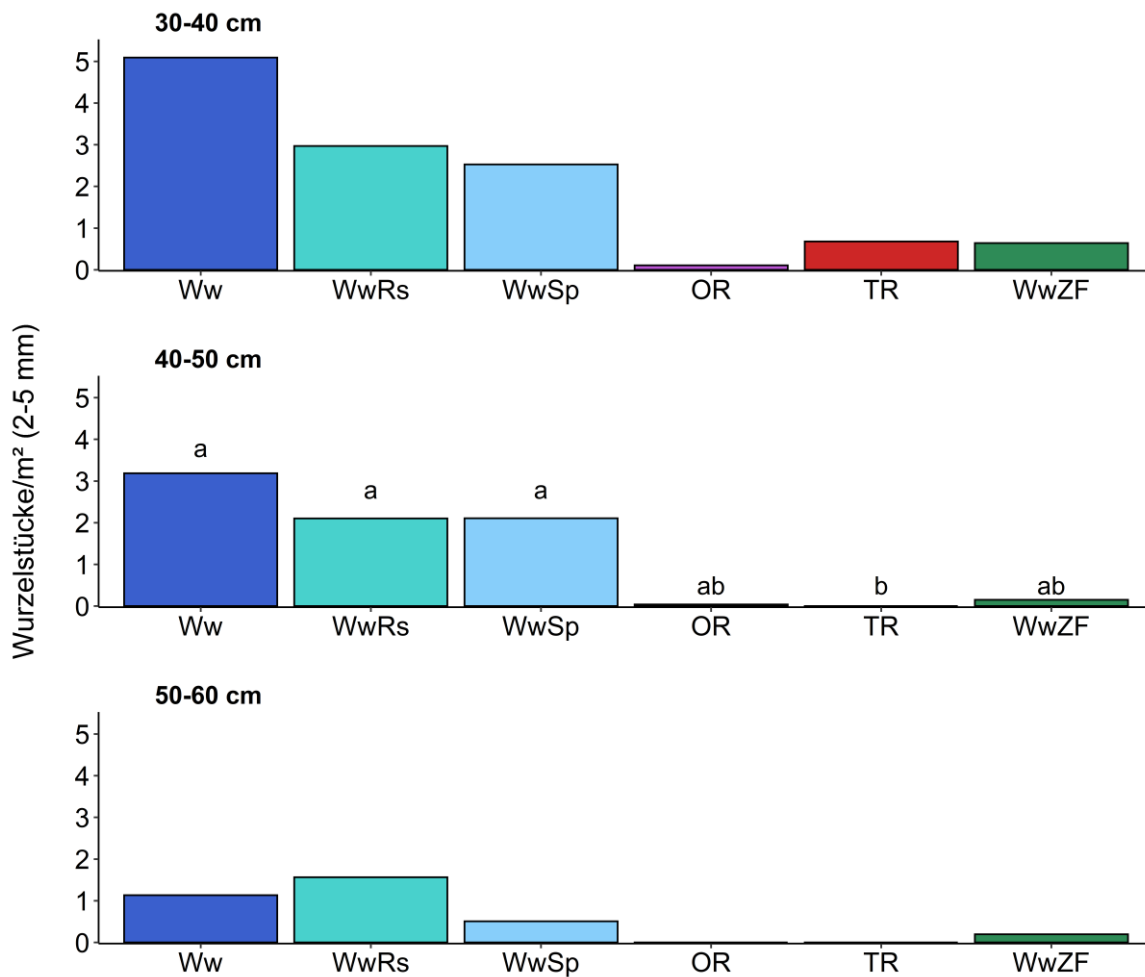


Abb. 72: Wurzelstücke/m² der Durchmesserklasse 2-5 mm der Futterpflanzen (Ww = Wegwarte, WwRs = Wegwarte + Rohrschwengel, WwSp = Wegwarte-Spät Saat) 13 bzw. 18 Monate nach der Ansaat und der Zwischenfrüchte (OR = Ölrrettich, TR = Tiefenrettich, WwZF = Wegwarte als Zwischenfrucht) 3 Monate nach der Ansaat im Oktober 2020 in den Tiefen der Hauptverdichtungszone 30-40 cm, 40-50 cm, 50-60 cm. Unterschiedliche Kleinbuchstaben Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$ HSD-Test).

Die Anzahl an Wurzelstücken/m² in der Durchmesserklasse von 2-5 mm (Abb. 72) war insgesamt gering. In 30-40 cm Tiefe erreichte die Wegwarte Werte von 5, die für Ölrrettich waren <1, jedoch gab es keine signifikanten Unterschiede. Zwischen 40 und 50 cm war der Wert der Futterpflanzen mit 2-3 Wurzelstücken/m² signifikant höher als für den Tiefenrettich. In der Tiefe 50-60 cm gab es keine signifikanten Unterschiede, die Werte lagen bei <2 Wurzelstücken/m².

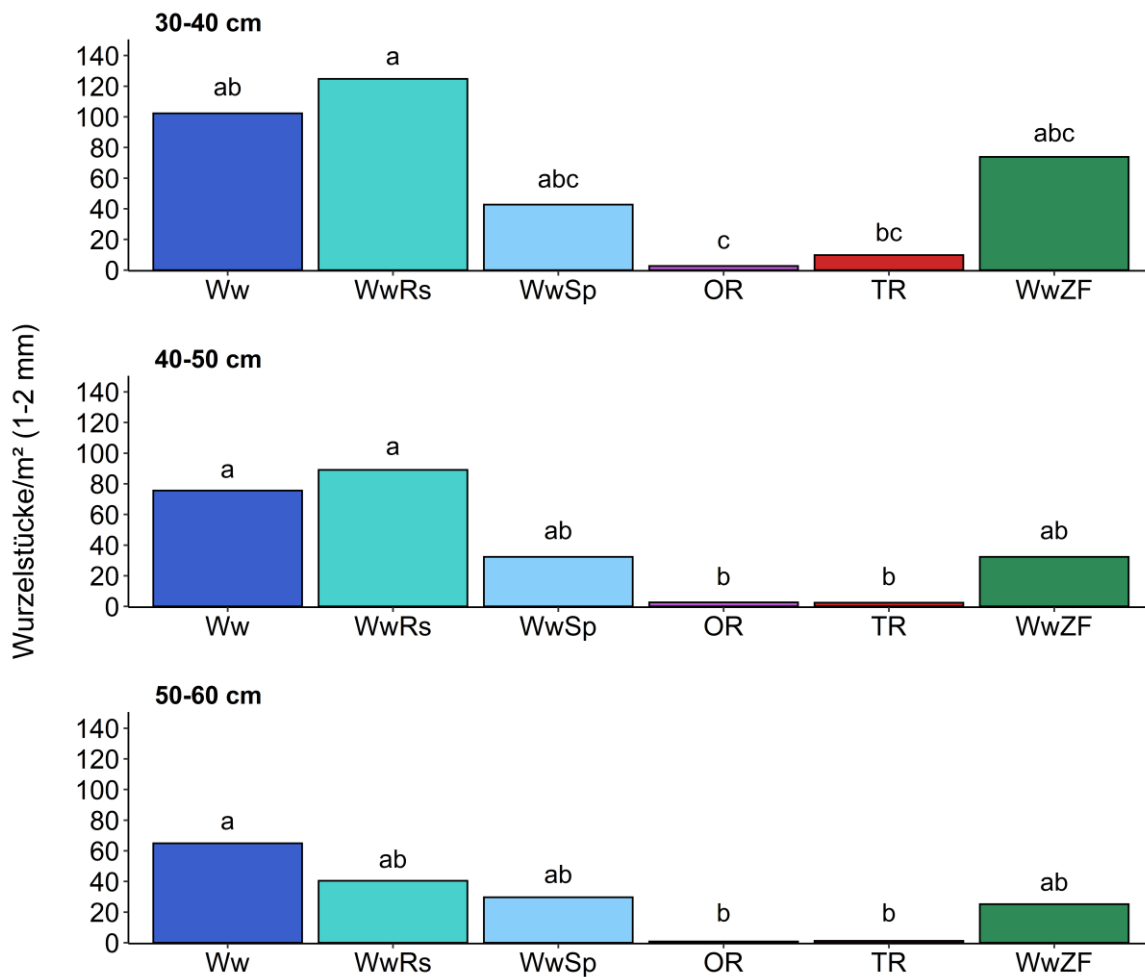


Abb. 73: Wurzelstücke/m² der Durchmesserklasse 1-2 mm der Futterpflanzen (Ww = Wegwarte, WwRs = Wegwarte + Rohrschwengel, WwSp = Wegwarte-Spätsaat) 13 bzw. 18 Monate nach der Ansaat und der Zwischenfrüchte (OR = Ölerrettich, TR = Tiefenerrettich, WwZF = Wegwarte als Zwischenfrucht) 3 Monate nach der Ansaat im Oktober 2020 in den Tiefen der Hauptverdichtungszone 30-40 cm, 40-50 cm, 50-60 cm. Unterschiedliche Kleinbuchstaben Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$ HSD-Test).

Die Anzahl an Wurzelstücken/m² in der Durchmesserklasse 1-2 mm erreichte deutlich höhere Werte (Abb. 73). In 30-40 cm Tiefe erreichten Wegwarte und Wegwarte-Rohrschwengel über 100 Wurzelstücke/m² und in 50-60 cm Tiefe noch über 60 Wurzelstücke/m² und damit jeweils signifikant mehr als Ölerrettich und Tiefenerrettich mit <3 Wurzelstücke/m².

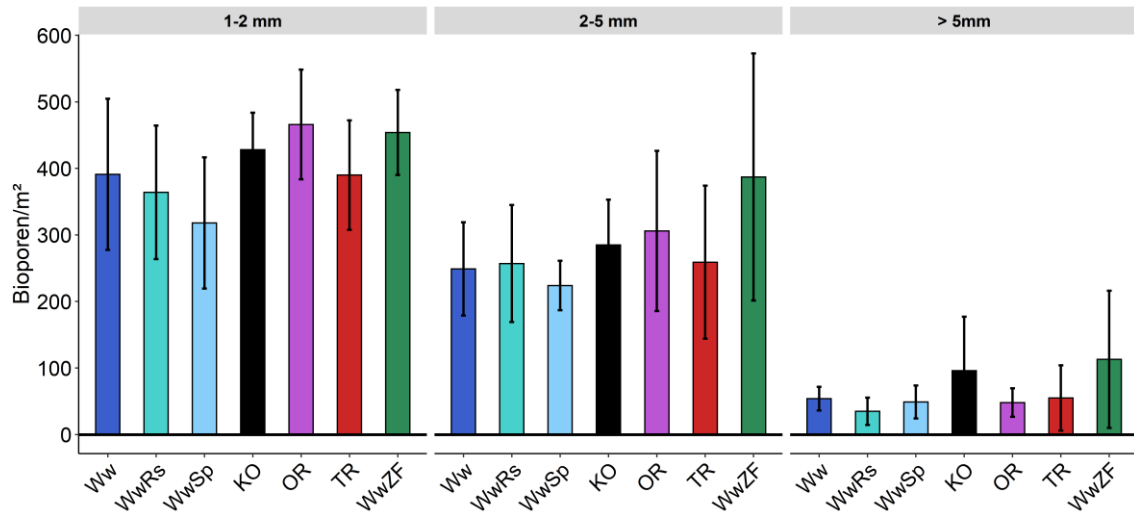


Abb. 74: Anzahl der Bioporen/m² unterschiedlicher Durchmesserklassen im März 2020 in Abhängigkeit von drei Varianten einer Futterbau-Fruchtfolge (Ww = Wegwarte, WwRs = Wegwarte + Rohrschwengel, WwSp = Wegwarte-Spätsaat) und drei Varianten einer Druschfrucht-Fruchtfolge (OR = Örettich, TR = Tiefenrettich, WwZF = Wegwarte als Zwischenfrucht) sowie eine Kontrolle-Variante, die weder eine Futterpflanze noch eine Zwischenfrucht enthält. Unterschiedliche Kleinbuchstaben Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$ HSD-Test) innerhalb der Durchmesserklasse.

Für die Bioporendichte (Abb. 74) gab es für keine der drei Durchmesserklassen signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen Varianten. Für einen Durchmesser von 1-2 mm lag die Bioporendichte zwischen 318 und 466, für einen Durchmesser von 2-5 mm lag die Bioporendichte zwischen 224 und 387, für einen Durchmesser von >5 mm lag die Bioporendichte zwischen 35 und 113.

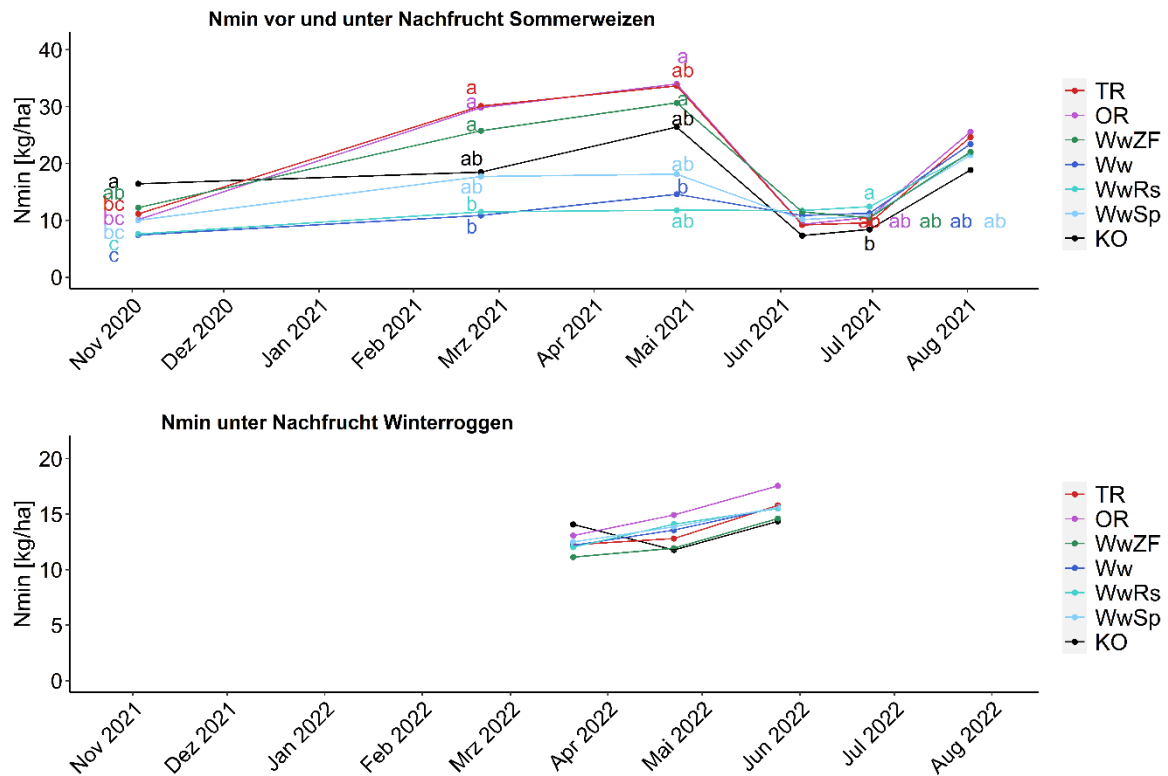


Abb. 75: Mineralischer Boden-Stickstoff (N_{\min}) in der Krume (0-30 cm) unter den Futterpflanzen bzw. Zwischenfrüchten und der ersten Nachfrucht Sommerweizen (oben) sowie unter der zweiten Nachfrucht Winterroggen. Verglichen wurden drei Varianten einer Futterbau-Fruchtfolge (Ww = Wegwarte, WwRs = Wegwarte + Rohrschwinkel, WwSp = Wegwarte-Spätsaat) und drei Varianten einer Druschfrucht-Fruchtfolge (OR = Örettich, TR = Tiefenrettich, WwZF = Wegwarte als Zwischenfrucht) sowie eine Kontrolle-Variante, die weder eine Futterpflanze noch eine Zwischenfrucht enthält. Unterschiedliche Kleinbuchstaben Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$ HSD-Test) innerhalb eines Termins.

Der Gehalt an mineralischem Bodenstickstoff (Abb. 75) in der Krume unterschied sich zwischen den Varianten von März bis Mai 2021 unter dem Sommerweizen deutlich. Die N_{\min} -Gehalte der drei Zwischenfrucht-Varianten lag um 10-20 kg N/ha höher als in den Futterpflanzen-Varianten, die Kontroll-Variante lag dazwischen. Unter der Nachfrucht Winterroggen in 2022 gab es keine Unterschiede im Gehalt an mineralischem Bodenstickstoff.

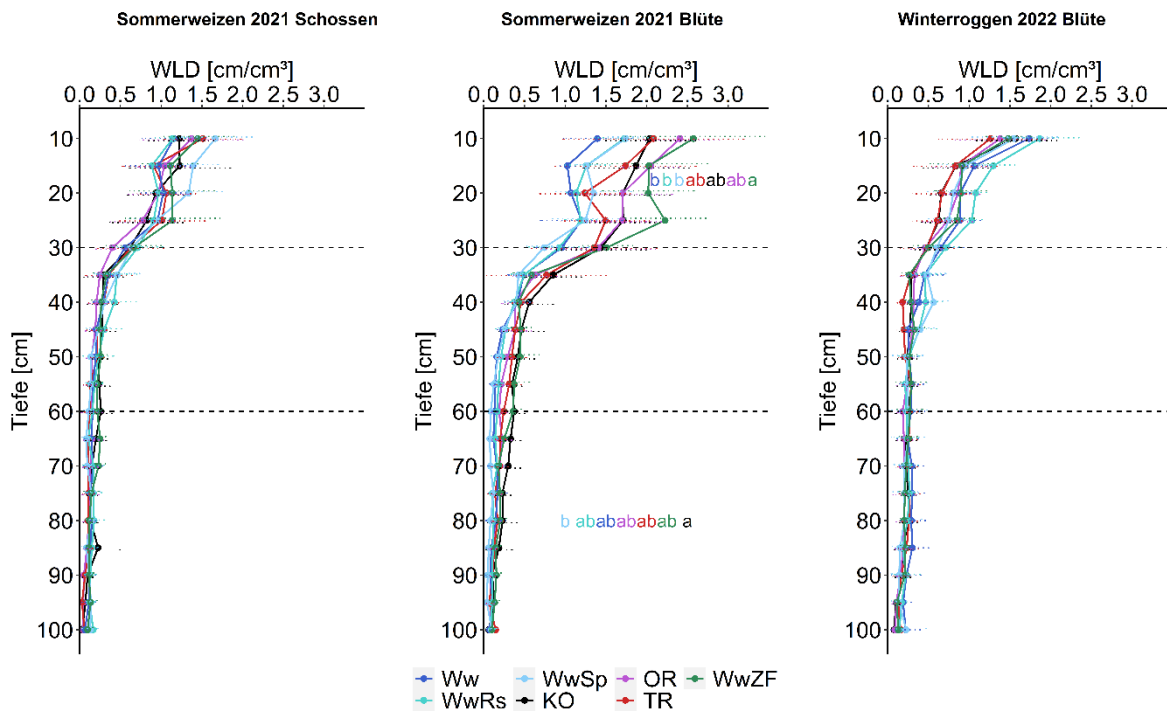


Abb. 76: Wurzellängendichte (WLD) über das gesamte Bodenprofil bis 100 cm Tiefe der Nachfrüchte Sommerweizen in 2021 und Winterroggen 2022 zu verschiedenen Zeitpunkten in Abhängigkeit von drei Varianten einer Futterbau-Fruchtfolge (Ww = Wegwarte, WwRs = Wegwarte + Rohrschwengel, WwSp = Wegwarte-Spätsaat) und drei Varianten einer Druschfrucht-Fruchtfolge (OR = Ölrettich, TR = Tiefenrettich, WwZF = Wegwarte als Zwischenfrucht) sowie eine Kontrolle-Variante, die weder eine Futterpflanze noch eine Zwischenfrucht enthält, ermittelt mit der Profilwandmethode. Unterschiedliche Kleinbuchstaben Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$ HSD-Test) innerhalb der zusammengefassten Tiefenstufen 0-30 cm, 30-60 cm, 60-100 cm.

Die Durchwurzelung der Nachfrüchte unterschied sich wenig in Abhängigkeit der Vorfrucht (Abb. 76). Zur Blüte des Sommerweizens differenzierte sich die Wurzellängendichte zwischen den Varianten, vor allem im Oberboden mit höheren Werten nach den Zwischenfrüchten und geringen nach den Futterpflanzen. Zum Schossen des Sommerweizens und zur Blüte des Roggens gab es keine signifikanten Unterschiede in der Wurzellängendichte.

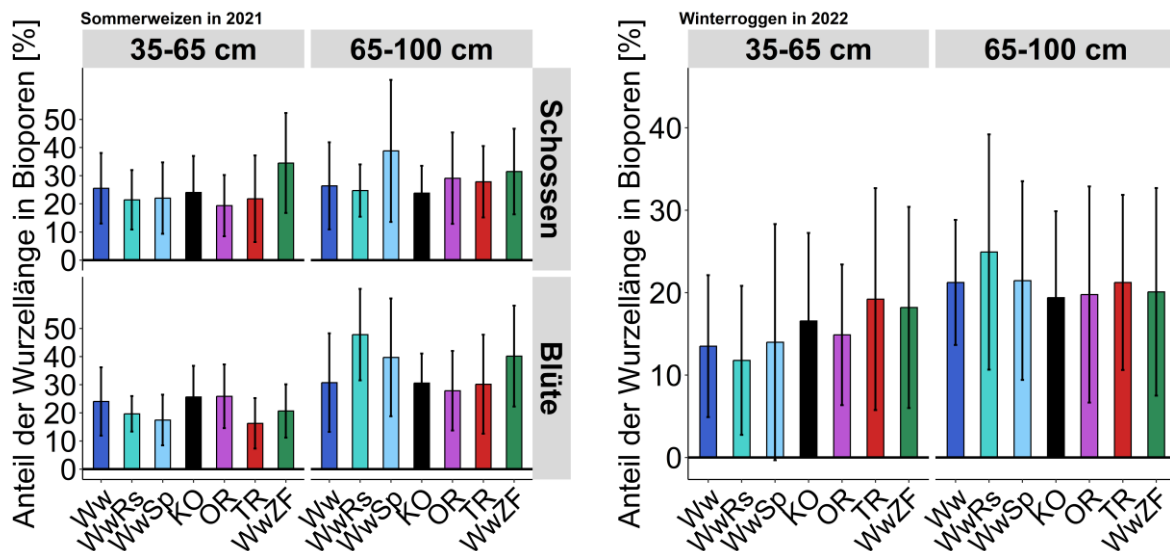


Abb. 77: Anteil der Wurzellänge in großlumigen Bioporen in zwei Tiefenstufen im Unterboden von den Nachfrüchten Sommerweizen und Winterroggen, ermittelt an der Profilwand.

In den großlumigen Bioporen im Unterboden fanden sich hohe Anteile der Wurzellänge von 10 % bis zu über 50 % (Abb. 77). Insbesondere in der tieferen Schicht von 65-100 cm fanden sich hohe Werte. Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten gab es jedoch nicht.

4.3.3 Eindringwiderstand und Bodenwassergehalt (Dr. Oliver Schmittmann)

An drei Terminen, zwei im Winter und einer im Herbst, wurde der Vorgewende-Versuch beprobt. So konnte der Einfluss der ausgewählten Zwischenfrüchte auf die Dichtlagerung an Vorgewenden über zwei Jahre untersucht werden (Abb. 78). Als Referenz diente eine Schwarzbrache.

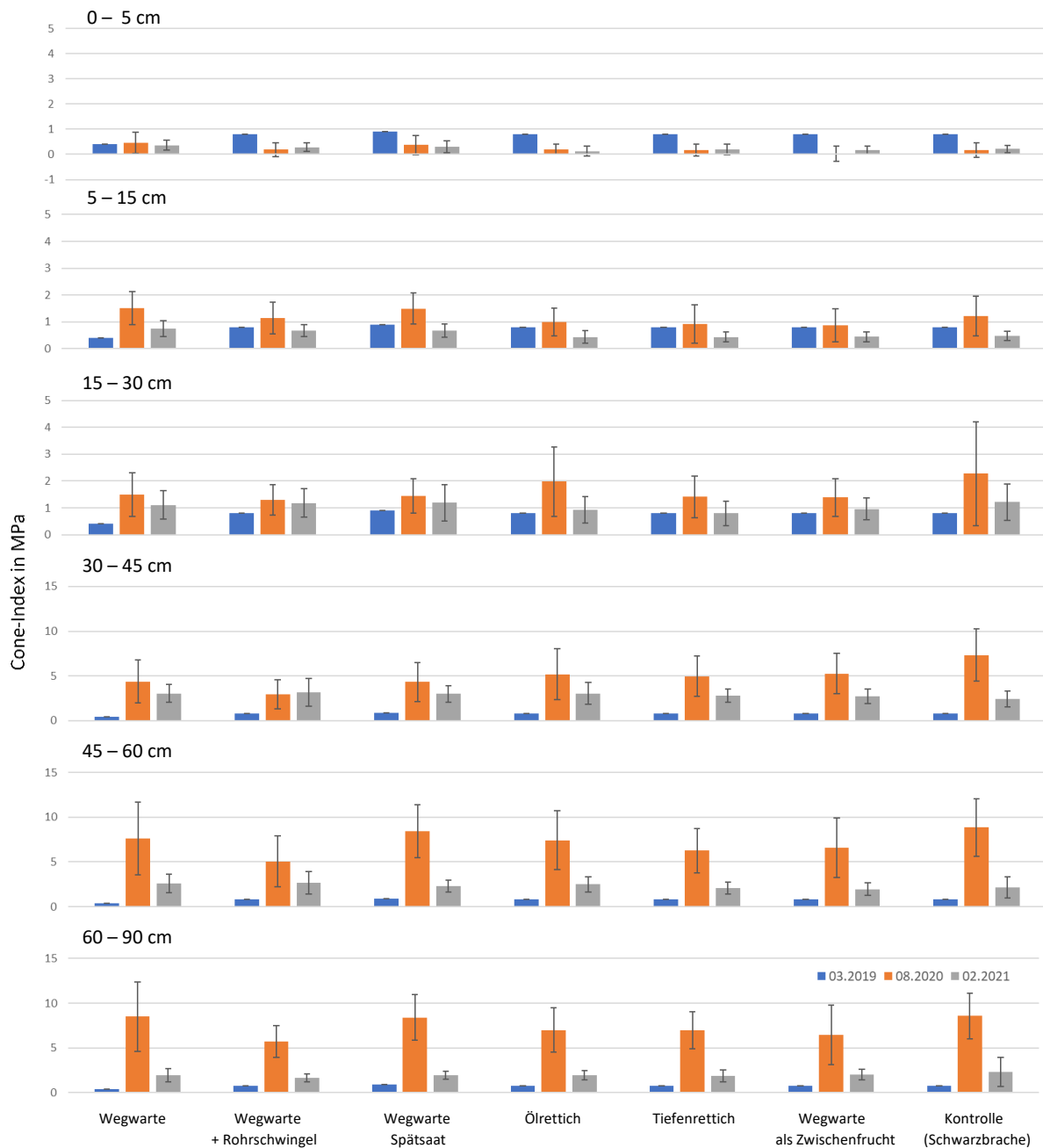


Abb. 78: Ermittelte Eindringwiderstände (Cone-Index) im März 2019, August 2020 und Februar 2021 im Vorgewende-Versuch für ausgewählte Tiefenstufen.

Im Frühjahr des ersten Jahres – der Stuserhebung – waren die Eindringtiefen in allen Varianten und Tiefenstufen vergleichbar, lediglich die Parzellen der Wegwarte wiesen leicht geringere Werte auf. Die Messungen im Februar 2021 – zwei Jahre nach der Stuserhebung – waren nur im Bereich des Zone 0 – 15 cm die Eindringwiderstände, mit Ausnahme bei der Wegwarte, geringer, unterhalb von 15 cm teilweise um das 3-fache höher als bei der ersten Messung. Statistisch signifikante Unterschiede fanden sich nicht. Bei der zweiten und dritten Probenahme zeigte sich, dass die Eindringwiderstände der Kontrollvariante mit einer Schwarzbrache tendenziell höher waren als in den anderen Varianten.



Abb. 79: Ermittelte volumetrische Bodenwassergehalte im August 2020, Februar 2021 und Wasserdifferenz im Vorgewende-Versuch für ausgewählte Tiefenstufen.

Der Vergleich der Wasserbilanzierung – somit die Differenz der Februarmessung 2021 zur Augustmessung 2020 – zeigten bei fast allen Varianten im Oberboden im Februar geringere Wassergehalte als im vorherigen August. Im Oberboden lagen die volumetrischen Wassergehalte bei beiden Probenahmeterminen bei 30 %. Im August sind kontinuierlich absinkende Bodenwassergehalte nach unten hin bis in die Zone 60 – 90 cm zu erkennen. In der untersten Zone lag der Wassergehalt bei 20 %. Dieser Gradient war im Februar nicht mehr festzustellen – alle Varianten zeigten in allen Tiefenzonen Wassergehalte um 30 %. Statistisch signifikante Unterschiede zeigten sich nur im Oberboden. Dabei fiel auf, dass die Zwischenfrüchte in den oberen Bodenschichten den Wassergehalt tendenziell stärker reduzierten als die Futterpflanzen.

4.3.4 Bodenphysik (Dr. Marc-Oliver Göbel und Prof. Dr. Stephan Peth)

Die Analyse der Korngrößenverteilung zeigt bei Berücksichtigung aller Varianten einen mit der Tiefe leicht abnehmenden Sandgehalt (Abb. 80). Die Tongehalte sind dagegen in 40 und 60 cm Tiefe etwas höher als in 15 cm Tiefe. Die Schluffgehalte sind in 15 und 40 cm Tiefe vergleichbar und deutlich niedriger als in 60 cm Tiefe.

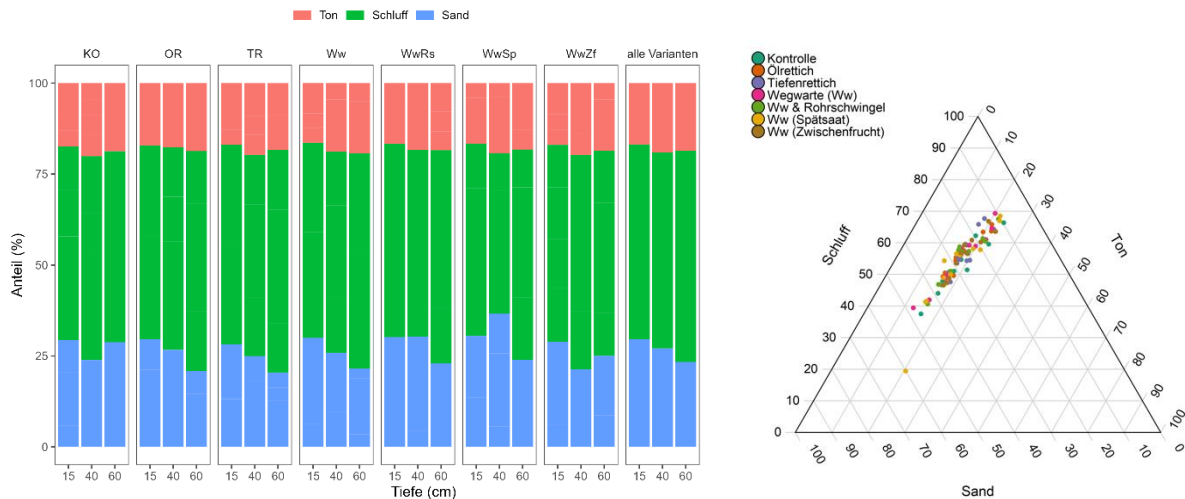


Abb. 80: Korngrößenverteilung für den Standort Wiesengut (Vorgewende), differenziert nach Anbauvariante und Bodentiefe (links) und Darstellung im Körnungsdreieck (rechts).

Darüber hinaus existieren zwischen den Varianten (gemittelt über die Blöcke) teilweise deutliche Unterschiede in der Korngrößenzusammensetzung. So unterscheiden sich beispielsweise die Sand- und Schluffgehalte in 60 cm Tiefe bei der Kontrolle deutlich von den Gehalten beim Tiefenrettich. In 40 cm Tiefe existieren dagegen große Unterschiede im Sand- und Schluffgehalt zwischen den Varianten Wegwarte als Spätsaat und Wegwarte als Zwischenfrucht. Der Tongehalt zeigt dagegen in allen Tiefen nur relativ geringe Unterschiede zwischen den Varianten. Damit lässt sich die Bodenart weitgehend als sandiger bis schluffiger Lehm (Ls – Lu) klassifizieren (Ad-hoc-AG Boden, 2005).

Die Wasserretentionskurven zeigen im Gegensatz zu den Ergebnissen aus dem Zwischenfruchtversuch eine größere Variation und weniger ausgeprägte tiefenspezifische Verläufe (Abb. 81), was vermutlich auf die starke Variation der Korngrößenzusammensetzung zwischen den Varianten zurückzuführen ist. Wie bei den Böden des Zwischenfruchtversuches zeigt auch hier die mittlere Tiefe das geringste Gesamtporenvolumen, im Gegensatz dazu weist jedoch hier die unterste Tiefe generell das größte Gesamtporenvolumen auf.

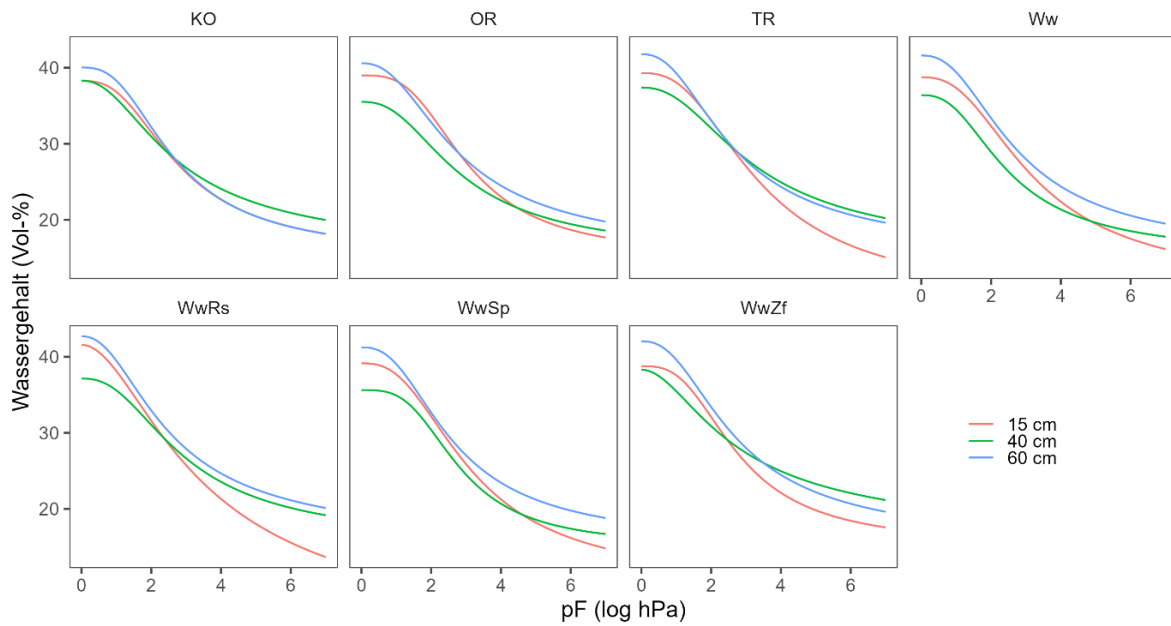


Abb. 81: Wasserretentionskurven der im Bereich des Vorgewendes (März 2022) am Standort Wiesengut entnommenen Bodenproben, differenziert nach Anbauvariante und Bodentiefe.

Die aus dem Vorgewende entnommen Proben zeigen eine sehr ausgeprägte Verdichtung in 40 cm Tiefe, die sich sowohl bei der Kontrolle als auch bei den meisten Anbauvarianten signifikant ($p < 0,05$) von den anderen Tiefen unterscheidet. In der Tendenz führt hier der Anbau von Wegwarte zu einer Lockerung des Bodens (Abb. 82, oben).

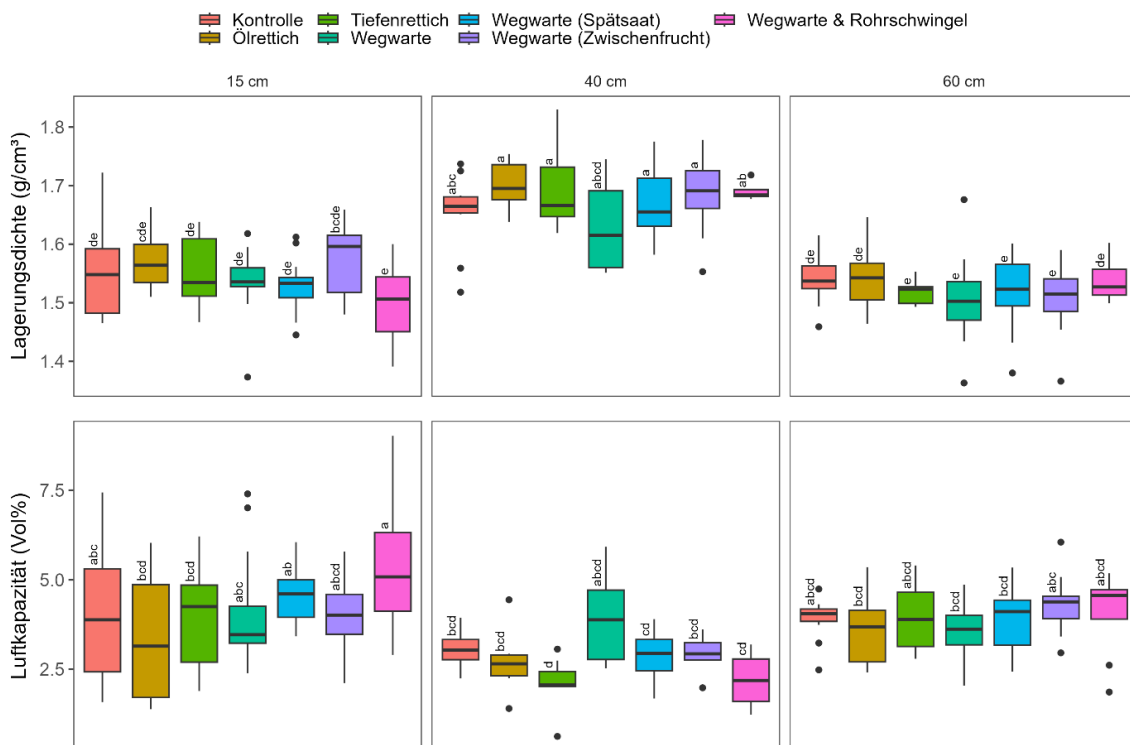


Abb. 82: Lagerungsdichte (oben) und Luftkapazität (unten) der im Bereich des Vorgewendes (März 2022) am Standort Wiesengut entnommenen Bodenproben, differenziert nach Anbauvariante und Bodentiefe. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten und Tiefen ($p < 0,05$; Tukey-HSD-Test).

Auch in 60 cm Tiefe ist tendenziell ein auflockernder Effekt der Wegwarte zu erkennen. Im Oberboden (15 cm) führt der Anbau von Wegwarte in Kombination mit Rohrschwengel am deutlichsten zu einer Verringerung der Lagerungsdichte. Die beschriebenen Effekte sind jedoch ausnahmslos nicht signifikant.

Die LK ist mit Werten von teilweise deutlich unter 10 Vol-% in allen Tiefen sehr gering (Abb. 82, unten). Insbesondere in der verdichteten Schicht in 40 cm Tiefe zeigen sich mit Ausnahme des Anbaus von Wegwarte LK von < 3 Vol-%. In allen Tiefen ist kein klarer Effekt der Anbauvarianten zu erkennen, die in einigen Fällen zu einer Erhöhung und in anderen Fällen zu einer Verringerung der LK führen. Hervorzuheben ist der Effekt der Wegwarte in 40 cm Tiefe und des kombinierten Anbaus von Wegwarte und Rohrschwengel in 15 cm Tiefe, die zu einer deutlichen, wenn auch nicht signifikanten Erhöhung der LK geführt haben.

Die nFK ist in 40 cm Tiefe am geringsten und im Oberboden (15 cm) am höchsten (Abb. 83, oben). In 60 cm Tiefe ist generell kein positiver Einfluss der Anbauvarianten auf die nFK zu erkennen. In 15 cm Tiefe zeigt sich jedoch in der Tendenz für alle Anbauvarianten ein positiver Effekt auf die nFK, der allerdings nicht signifikant ist. Die positivsten Effekte auf die nFK zeigt in 40 cm Tiefe der Anbau von Wegwarte als Spätsaat, der auch in den anderen Tiefen im Vergleich zu den anderen Anbauvarianten in der Tendenz einen sehr positiven Effekt auf die nFK hat. Innerhalb der einzelnen Tiefen existieren keine signifikanten Unterschiede zwischen den Anbauvarianten.

Bei der Kontrollvariante ist die gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) im Oberboden (15 cm) tendenziell geringer als im Unterboden (40 und 60 cm; Abb. 83, unten), es zeigt sich jedoch insgesamt ein sehr uneinheitliches Bild hinsichtlich der Effekte der Anbauvarianten. Es existieren generell keine signifikanten Unterschiede zwischen den Anbauvarianten und zwischen den Tiefen.

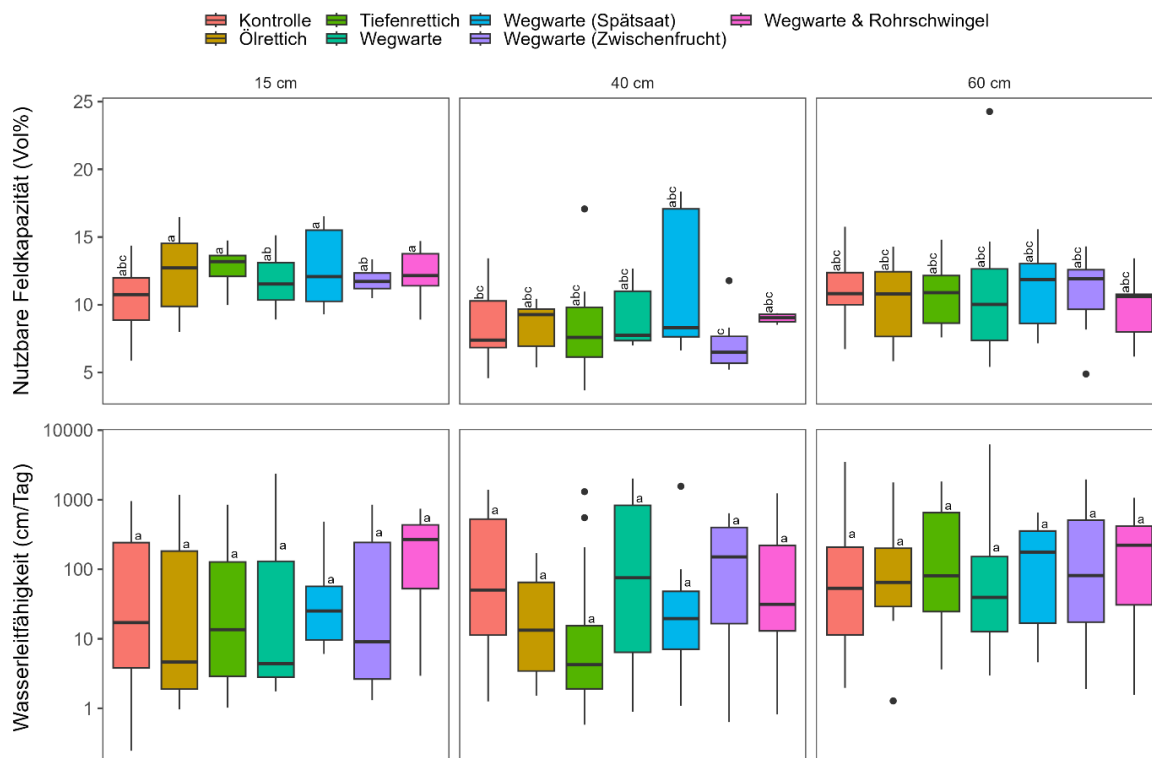


Abb. 83: Nutzbare Feldkapazität (oben) und gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (unten) der im Bereich des Vorgewendes (März 2022) am Standort Wiesengut entnommenen Bodenproben, differenziert nach Anbauvariante und Bodentiefe. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten und Tiefen ($p < 0,05$; Tukey-HSD-Test; Durchführung des HSD-Tests für die Wasserleitfähigkeit an log-transformierten Daten).

4.4 Arbeitspaket 4

4.4.1 Modellierung von Spross- und Wurzelwachstum sowie Ertragsbildung und Ertrag mit SIMPLACE (Sofia Hadir und Dr. Sabine Seidel)

Die erhobenen Daten aus den Kampagnen 2018/2019 und 2019/2020 am Wiesengut wurden bereitgestellt um SIMPLACE zu parametrisieren und kalibrieren. Die Modellierung wurde für die Zwischenfrüchten Ölrettich, Inkarnatklée (Abb. 85), Lupine und Brache (Abb. 86) sowie jeweils die Nachfrucht Sommerweizen durchgeführt. Es wird auch die Vorfrucht Ackerbohne einschließlich des durch diese Leguminose freiwerdenden Bodenstickstoffs simuliert.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die N-Verluste durch gasförmige N_2O Verluste (Denitrifikation) in der Brache insbesondere im Herbst/Winter 2018/19 höher sind als im Inkarnatklée (Abb. 86d). Weiter sind die simulierten N-Verluste durch Auswaschung im Winter bei Inkarnatklée im Mittel um etwa 25% geringer als nach der Brache (Abb. 86e). Die Ergebnisse zeigen die Wirkung der Zwischenfrüchte zur Reduzierung der N-Verluste im Winterhalbjahr.

Die simulierten Erträge der Hauptfrucht Sommerweizen nach den verschiedenen Zwischenfrüchten bzw. der Brache sind, ähnlich den gemessenen Sommerweizenkornenerträgen am WG, ähnlich bzw. gleich hoch (Tabelle 15). Die maximale simulierte Ertragsdifferenz beträgt 4% (2020) bzw. 8% (2019). Die simulierte N-Aufnahme des Weizens ist nach Inkarnatklée bzw. nach Ölrettich am höchsten und nach der Zwischenfrucht Blaue Lupine und der Brache am niedrigsten.

Die Verluste durch N-Auswaschung sind in beiden Jahren nach der Brache bis zur Ernte des Sommerweizens mit Abstand am höchsten (Tabelle 15). Die maximale Differenz zwischen den Varianten (Inkarnatklée vs. Brache) beträgt in der Saison 2019/20 25% und im Jahr 2018/19 sogar 48%. Mit 5 bis 8 $kg\ ha^{-1}$ je Saison sind die gasförmigen N-Verluste durch Denitrifikation weitaus geringer als die Verluste durch N-Auswaschung mit 77 bis 166 $kg\ ha^{-1}$. Die gasförmigen N-Verluste sind in beiden Jahren in der Brache am höchsten. Im Mittel über beide Jahre sind die N-Verluste in der Brache am höchsten (173 $kg\ ha^{-1}$), gefolgt von Ölrettich und Blaue Lupine (134 und 132 $kg\ ha^{-1}$) und Inkarnatklée (109 $kg\ ha^{-1}$).

Ein Einsetzen der N-Auswaschung wurde bereits Ende Oktober/Anfang November in der Brache simuliert, in den Varianten mit Zwischenfrucht setzte sie erst im November (2019) bzw. Anfang Januar (2018) ein. Insbesondere im Januar (2020) bzw. im Februar (2019) ist die Auswaschung in der Brache hoch. Die geringen N-Auswaschungsverluste im Winter bei der Zwischenfrucht Inkarnatklée verglichen mit den anderen Varianten erklären die höhere Sprossbiomasse und teils höhere N-Aufnahme des Sommerweizens.

Tabelle 15: Simulierter Ertrag ($t\ ha^{-1}$) und N-Aufnahme ($kg\ ha^{-1}$) der Hauptfrucht Sommerweizen, N-Auswaschung und N_2O -N Verluste ($kg\ ha^{-1}$) von Saat der Zwischenfrucht bis zur Ernte der Hauptfrucht (Sommerweizen) für drei Zwischenfrüchte und Brache in beiden Vegetationsperioden.

Zwischenfrucht	Jahr	Ertrag [t ha⁻¹]	N-Aufnahme [kg ha⁻¹]	N-Auswaschung [kg ha⁻¹]	N₂O-N Verluste [kg ha⁻¹]
Lupine	2018_2019	3.10	91.5	100	12
Ölrettich	2018_2019	3.15	94.1	100	5
Inkarnatklee	2018_2019	3.36	103.2	77	8
Brache	2018_2019	3.11	92.0	147	14
Lupine	2019_2020	2.45	78.2	141	11
Ölrettich	2019_2020	2.55	83.6	150	12
Inkarnatklee	2019_2020	2.45	83.1	119	14
Brache	2019_2020	2.47	79.6	166	18

Brache- Sommerweizen Simulation

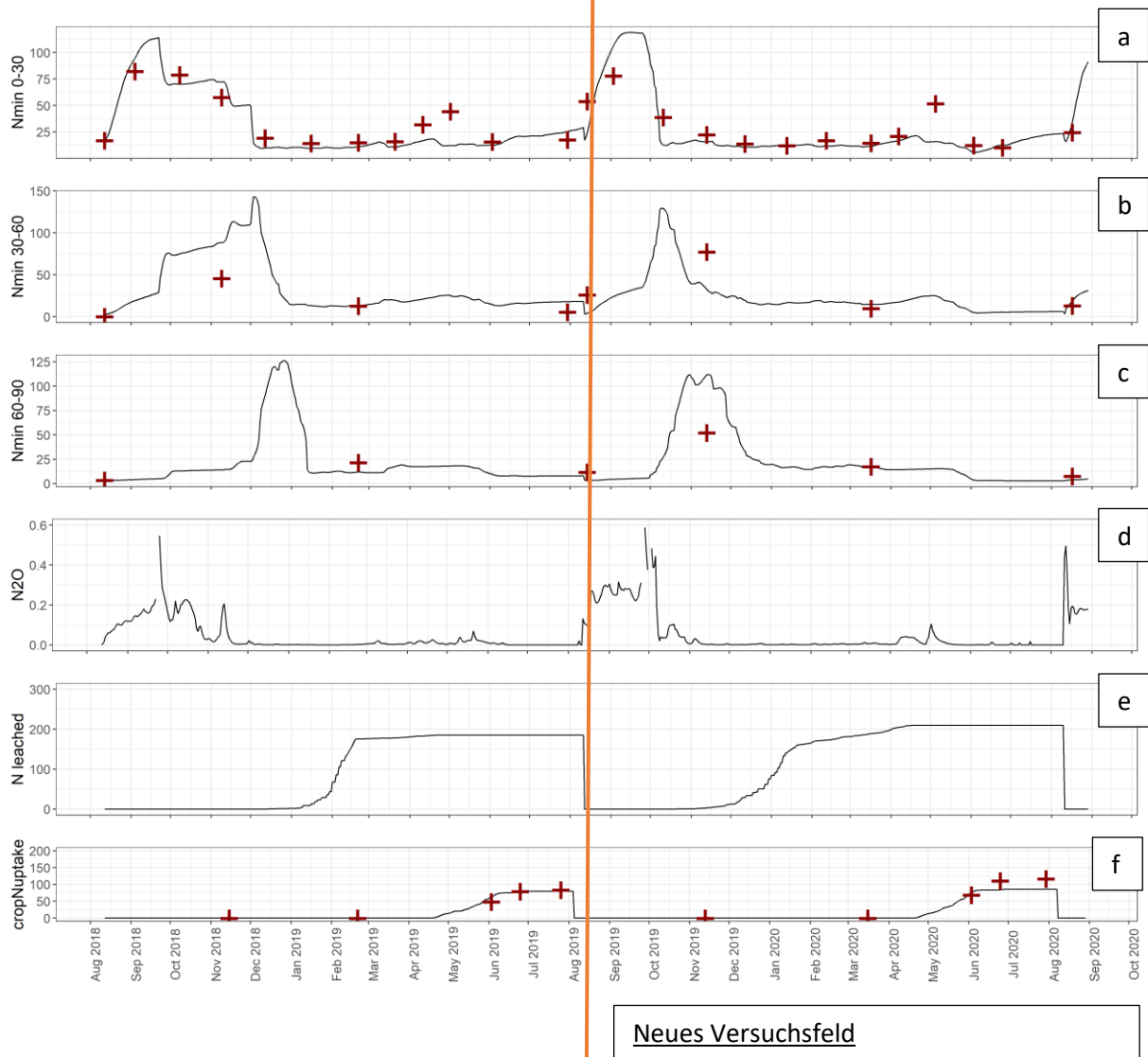


Abb. 84: Mineralischer N-Gehalt im Boden in kg ha⁻¹ (0-30, 30-60 und 60-90cm) (a-c), gasförmige N-Verluste durch Denitrifikation (d), N-Auswaschung in kg ha⁻¹ (e), sowie N-Aufnahme (einschließlich fixiertem Luftstickstoff bei Klee) in kg ha⁻¹ für die Zwischenfrucht Inkarnatklee- und Hauptfrucht Sommerweizen2018/19 sowie 2019/20 am Wiesengut. Die Kreuze bilden Messwerte ab, die Linien simulierte Werte. Die vertikale Linie bezieht sich auf ein neues Feld, die bodenrelevanten Modellkomponenten wurden dementsprechend neu initialisiert in 14.08.2019

Inkarnatklee- Sommerweizen Simulation

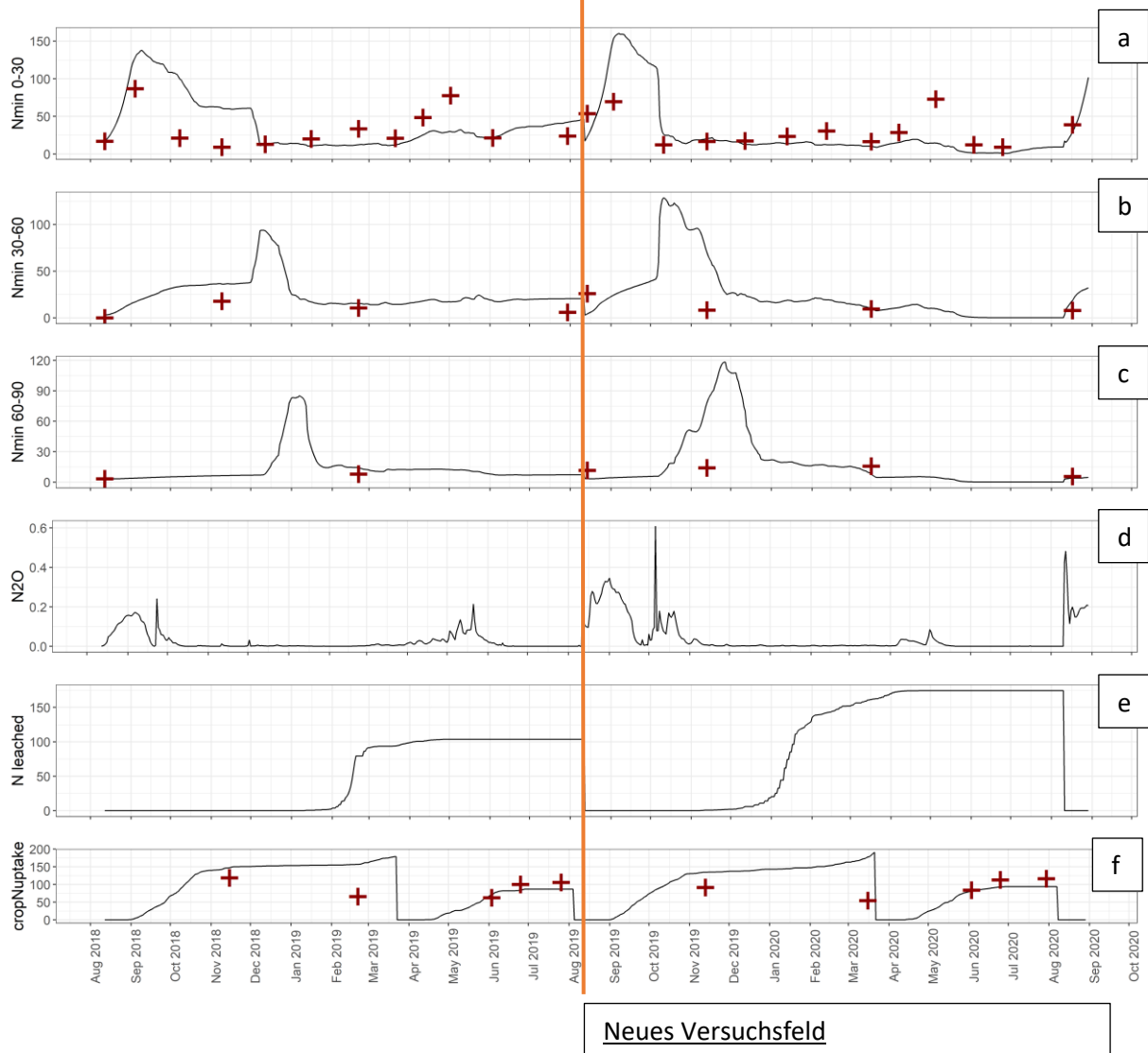


Abb. 85: Mineralischer N-Gehalt im Boden in kg ha⁻¹ (0-30, 30-60 und 60-90cm) (a-c), gasförmige N-Verluste durch Denitrifikation (d), N-Auswaschung in kg ha⁻¹ (e), sowie N-Aufnahme (einschließlich fixiertem Luftstickstoff bei Klee) in kg ha⁻¹ für die Zwischenfrucht Inkarnatklee- und Hauptfrucht Sommerweizen2018/19 sowie 2019/20 am Wiesengut. Die Kreuze bilden Messwerte ab, die Linien simulierte Werte. Die vertikale Linie bezieht sich auf ein neues Feld, die bodenrelevanten Modellkomponenten wurden dementsprechend am 14.08.2019 neu initialisiert.

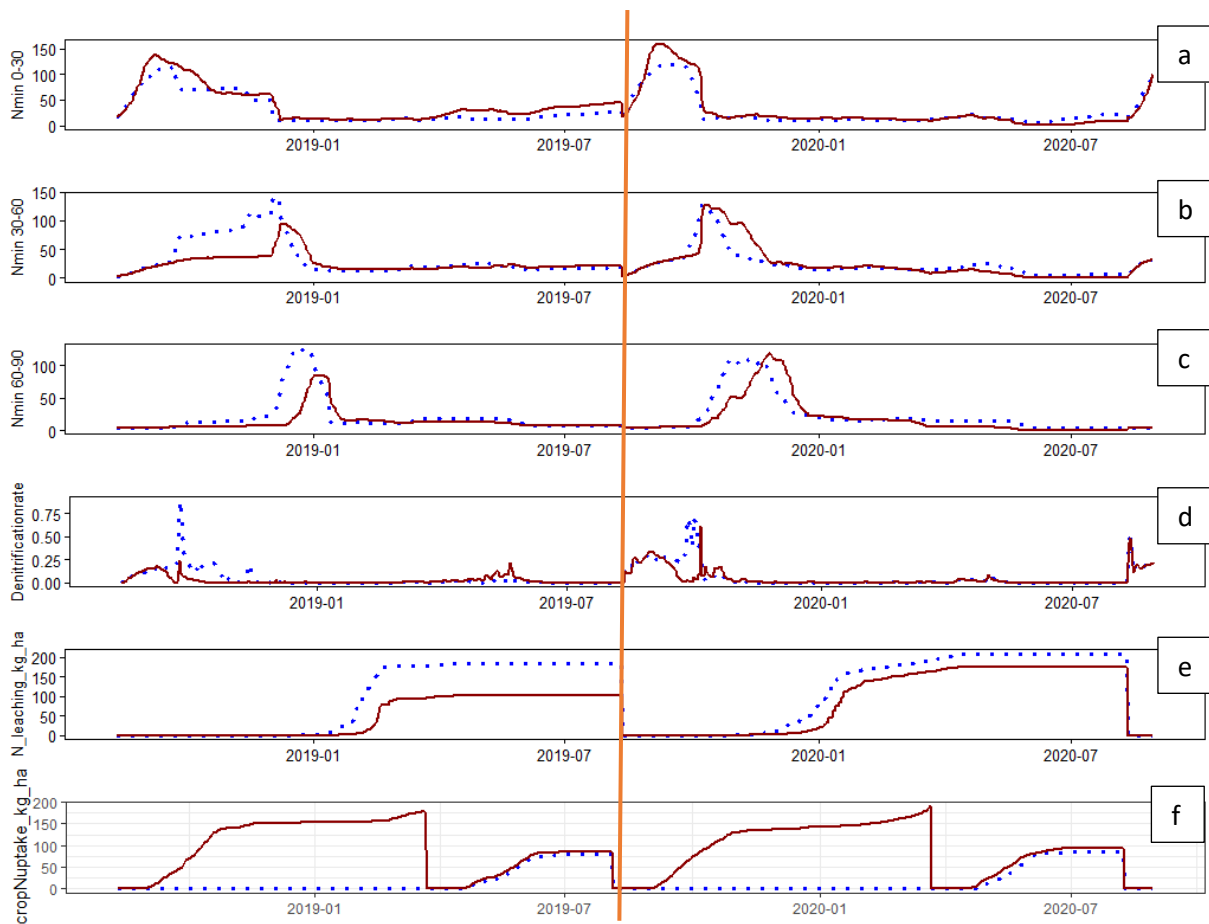


Abb. 86: Simulierter mineralischer N-Gehalt im Boden in kg ha^{-1} (0-30, 30-60 und 60-90cm) (a-c), gasförmige N-Verluste (N_2O -N) durch Denitrifikation (d), N-Auswaschung in kg ha^{-1} (e), sowie N-Aufnahme einschließlich fixiertem Luftstickstoff bei Klee (f) in kg ha^{-1} für die Zwischenfrucht Inkarnatklee (rot) bzw. Brache (blau gepunktet) sowie die Hauptfrucht Sommerweizen2018/19 sowie 2019/20 am Wiesengut. Die vertikale Linie bezieht sich auf ein neues Feld, die bodenrelevanten Modellkomponenten wurden dementsprechend am 14.08.2019 neu initialisiert.

4.4.2 Modellierung des Bodenwasserhaushalts mit HYDRUS-1D (Dr. Marc-Oliver Göbel und Prof. Dr. Stephan Peth)

Einfluss verschiedener Futterbaureinsaaten und -gemenge

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass der Futterpflanzenanbau zu einer Verringerung der Sickerwasserraten und Wassergehalte sowie zu einem korrespondierenden Abfall des Matrixpotentials im Vergleich zur Kontrolle führt (Abb. 87). Hinsichtlich des Wassergehaltes und des Matrixpotentials zeigt der Anbau von Luzerne in 40 und 60 cm Tiefe die deutlichsten Effekte, wohingegen Rotklee gras geringere Effekte in diesen Tiefen hat. Im Oberboden (15 cm) sind die Unterschiede hinsichtlich des Wassergehaltes dagegen weniger stark ausgeprägt. In Bezug auf das Matrixpotential ist jedoch für den Anbau von Luzerne + Rohrschwengel ein starker Abfall im Bereich Oberbodens zu beobachten, der bei den anderen Futterpflanzen deutlich schwächer ausgeprägt ist. In Bezug auf die Sickerwasserraten unterscheiden sich die Effekte der verschiedenen Anbauvarianten nur geringfügig und hier insbesondere in den beiden unteren Tiefen. Im zeitlichen Verlauf gibt es Phasen, in denen die Unterschiede in den Wasserhaushaltsparametern zwischen den Anbauvarianten und der Kontrolle nur schwach ausgeprägt sind und solche, in denen die Unterschiede sehr deutlich sind.

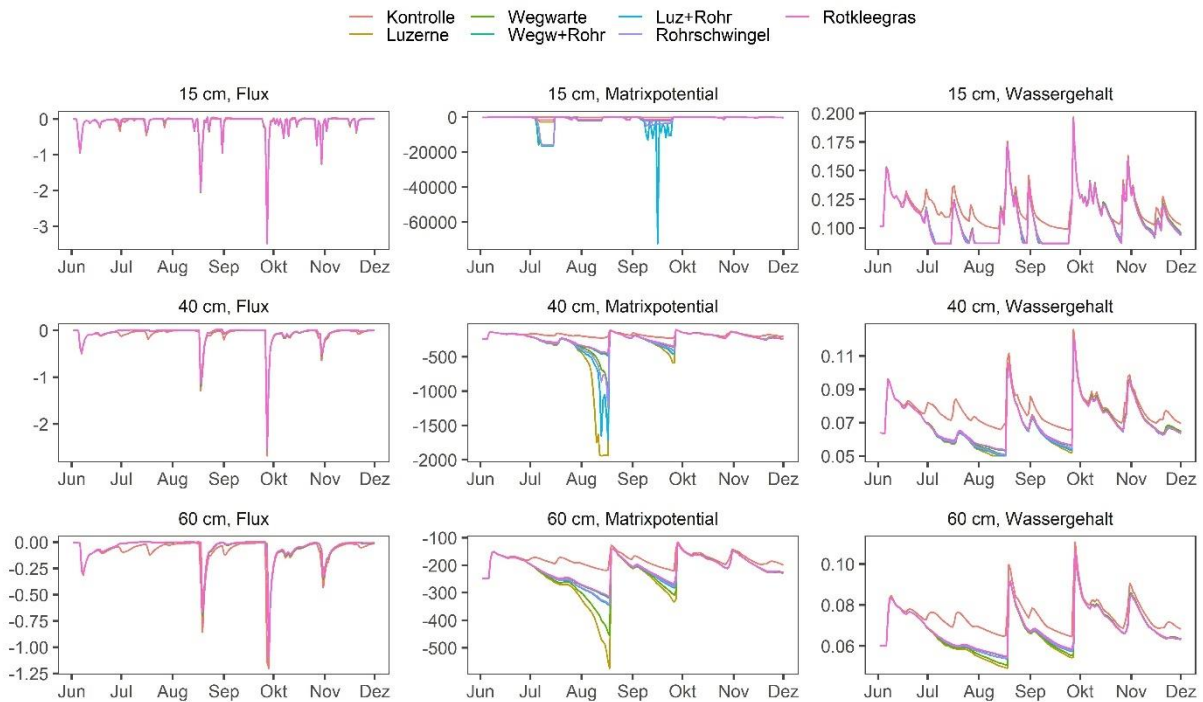


Abb. 87: Simulierte Sickerwasserraten (links, cm/d), Matrixpotentiale (Mitte, hPa) und volumetrische Wassergehalte (rechts, cm^3/cm^3) im Jahresverlauf und in verschiedenen Bodentiefen für den Futterpflanzenversuch am Standort Oberfeld; basierend auf Wetterdaten aus dem Jahr 2020 und den im Jahr 2020 bestimmten Wurzellängendichteverteilungen und hydraulischen Bodeneigenschaften, bei Annahme eines Blattflächenindex von 3 und einer Bestandeshöhe von 80 cm. Zu beachten ist die unterschiedliche Skalierung der Ordinate und die Überlagerung der Kurven für einige Varianten.

Ein Vergleich verschiedener Simulationsvarianten mit verändertem Blattflächenindex und veränderter Bestandeshöhe zeigt den deutlichen Einfluss dieser Parameter, die den Umfang der Wasserentnahme durch die Pflanzen steuern und bei Erhöhung dazu führen, dass sich die Wassergehaltsunterschiede zwischen den Varianten und der Kontrolle sowie zwischen den Varianten untereinander vergrößern (Abb. 88, rechts). Ein Vergleich verschiedener Simulationszeiträume (2020 vs. 2021; jeweils Juni bis November) zeigt den Einfluss der spezifischen Wetterbedingungen auf die Simulationsergebnisse (Abb. 88, links). So unterscheiden sich die Wassergehalte zwischen den Anbauvarianten und der Kontrolle im Jahr 2020 bereits ab Mitte Juni und sehr stark ab Ende Juni, wohingegen die Unterschiede im Jahr 2021 erst Ende Juli deutlich werden und dann aber konstant erhalten bleiben, wohingegen es im Jahr 2020 immer wieder Phasen gibt, in denen sich die Anbauvarianten und die Kontrolle hinsichtlich des Wassergehaltes kaum voneinander unterscheiden.

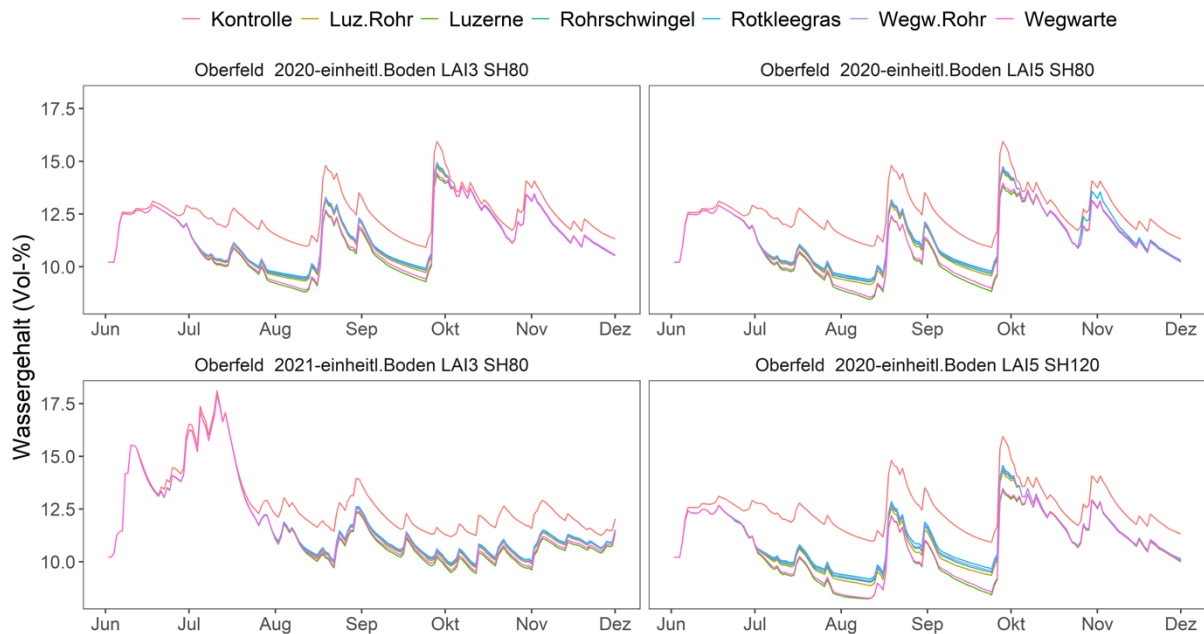


Abb. 88: Simulierte volumetrische Wassergehalte im Jahresverlauf für den Futterpflanzenversuch am Standort Oberfeld; basierend auf Wetterdaten aus dem Jahr 2020 bzw. 2021. Vergleich verschiedener Simulationsvarianten: ausschließlicher Einfluss der Anbauvarianten bei konstanten hydraulischen Eigenschaften (Blattflächenindex, LAI: 3, Bestandeshöhe, SH: 80 cm; oben links); wie oben links, für das Jahr 2021 (unten links); wie oben links mit LAI 5 und SH 80 cm (oben rechts); wie oben links mit LAI 5 und SH 120 cm (unten rechts).

Einfluss verschiedener Zwischenfruchtreinsaaten und -gemenge: Nach der Zwischenfruchtperiode

In Übereinstimmung mit den Simulationen für die Futterpflanzen zeigen die Ergebnisse, dass der Zwischenfruchtanbau zu verringerten Sickerwasserraten und Wassergehalten sowie deutlich negativeren Matrixpotentialen im Vergleich zur Kontrolle führt (Abb. 89). Die Reduzierung der Sickerwasserrate durch den Zwischenfruchtanbau ist besonders in den beiden unteren Tiefen zu beobachten, wohingegen sich die Sickerwasserraten von Kontrolle und Anbauvarianten im Oberboden kaum unterscheiden. In Bezug auf den Wassergehalt und das Matrixpotential ist der Einfluss der Zwischenfrüchte deutlich in allen Tiefen zu erkennen, wobei die verschiedenen Zwischenfruchtvarianten bezüglich des Matrixpotentials tiefenspezifische Charakteristika zeigen. So zeigt der Sandhafer (Sh) in 15 cm, Phacelia (Ph) in 40 cm und Ölfrettich (Or) in 60 cm Tiefe die niedrigsten Matrixpotentialen. Bei den Wassergehalten ist hingegen kein tiefenspezifisches Verhalten erkennbar. Hier führt der Anbau von RigoITR konsistent in allen Tiefen zu den geringsten Wassergehalten. Auffällig ist darüber hinaus in der untersten Tiefe die sehr individuelle Veränderung der Wassergehalte im Zeitverlauf, wobei sich die Verläufe der einzelnen Varianten teilweise überschneiden.

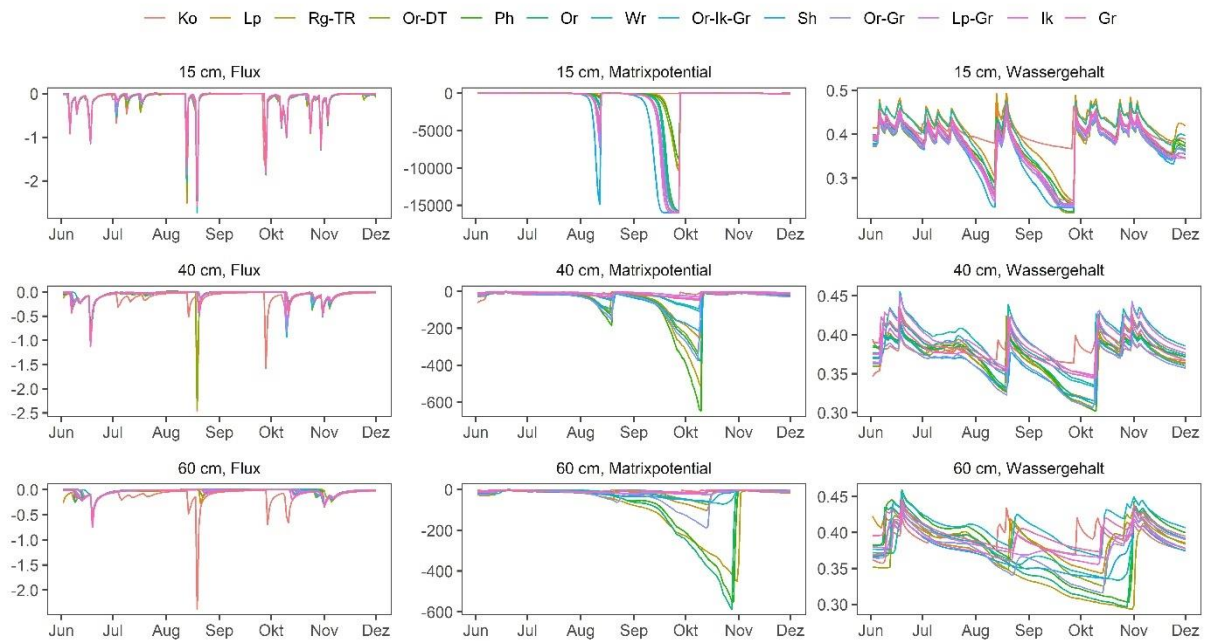


Abb. 89: Simulierte Sickerwasserraten (links, cm/d), Matrixpotentiale (Mitte, hPa) und volumetrische Wassergehalte (rechts, cm^3/cm^3) im Jahresverlauf und in verschiedenen Bodentiefen für den Zwischenfruchtversuch am Standort Wiesengut; basierend auf Wetterdaten aus dem Jahr 2020 und den im Jahr 2019 bestimmten Wurzellängendichteverteilungen und hydraulischen Bodeneigenschaften, bei Annahme eines Blattflächenindex von 3 und einer Bestandeshöhe von 80 cm. Zu beachten ist die unterschiedliche Skalierung der Ordinate und die Überlagerung der Kurven für einige Varianten.

Bei der Simulation mit mittleren hydraulischen Eigenschaften zeigt sich der unmittelbare Einfluss der Anbauvarianten durch die unterschiedliche Ausprägung des Wurzelsystems (Abb. 90, oben links). Auffällig sind hier der sehr ähnliche Verlauf der Wassergehalte (von Juni bis Mitte August) und daran anschließend zunehmende Wassergehaltsunterschiede im Zeitverlauf. Bei Simulation unter Ausschluss der unmittelbaren Pflanzeneffekte durch die Wasserentnahme zeigt sich der durch die Unterschiede in den hydraulischen Eigenschaften verursachte Effekt auf den zeitlichen Verlauf der Wassergehalte (Abb. 90, oben Mitte). Dabei ist erkennbar, dass bereits die Unterschiede in den hydraulischen Eigenschaften einen deutlichen Effekt auf den Verlauf der Wassergehalte haben, bei dem es jedoch, anders als bei der Berücksichtigung der Wurzelwasserentnahme, nur zu einer Parallelverschiebung der Kurven kommt. Auffällig sind darüber hinaus die im Vergleich zur Kontrolle relativ hohen Wassergehalte der Anbauvarianten. Des Weiteren ist wiederum ein deutlicher Einfluss des Blattflächenindex und der Bestandeshöhe zu erkennen, die bei jeweils höheren Werten den Effekt der Pflanzen verstärken (Abb. 90, unten links und Mitte).

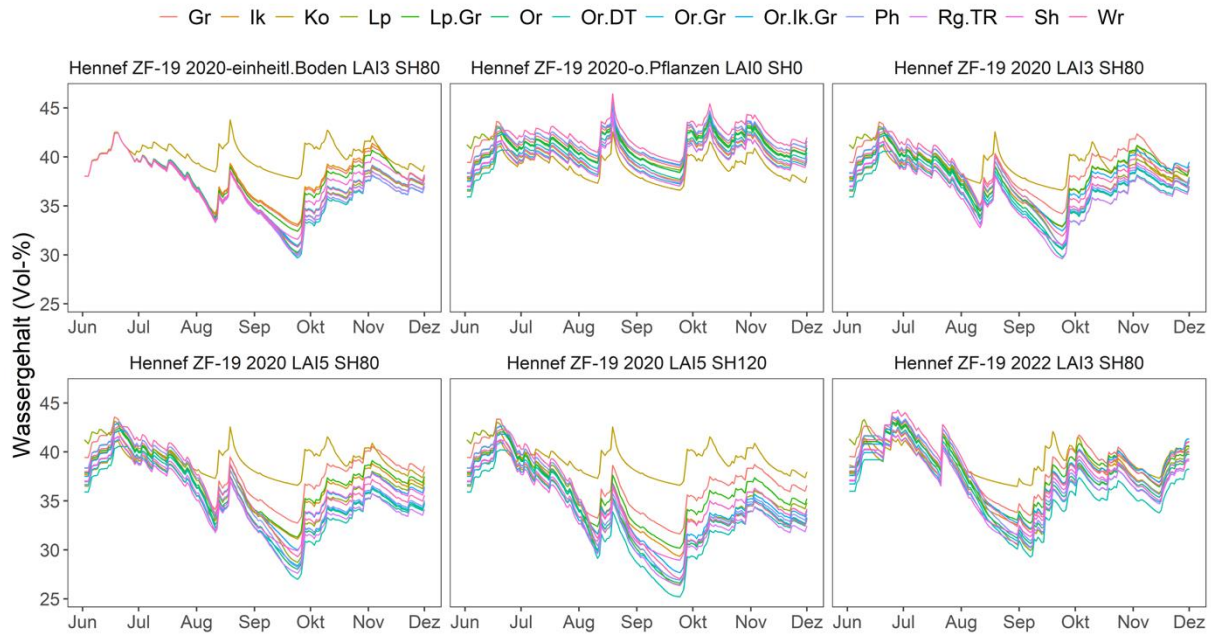


Abb. 90: Simulierte volumetrische Wassergehalte im Jahresverlauf für den Zwischenfruchtversuch am Standort Wiesengut; basierend auf Wetterdaten aus dem Jahr 2020 bzw. 2022 und den im Jahr 2019 bestimmten Wurzellängendichteverteilungen und hydraulischen Bodeneigenschaften. Vergleich verschiedener Simulationsvarianten: ausschließlicher Einfluss der Anbauvarianten bei konstanten hydraulischen Eigenschaften (oben links); ausschließlicher Einfluss der hydraulischen Eigenschaften ohne Einfluss der Anbauvarianten (oben Mitte); Einfluss der hydraulischen Eigenschaften und der Anbauvarianten bei unterschiedlichen Blattflächenindices (LAI) und Bestandeshöhen (SH) für das Jahr 2020: LAI: 3, SH: 80 cm (oben rechts); LAI: 5, SH: 80 cm (unten links), LAI: 5, SH: 120 cm (unten Mitte); wie oben rechts für das Jahr 2022 (unten rechts).

Einfluss verschiedener Zwischenfruchtreinsaaten und -gemenge: Nach Ernte der Nachfrucht

Vergleichbar mit den Ergebnissen nach Ende der Zwischenfruchtperiode zeigen die verschiedenen Zwischenfruchtvarianten tiefenspezifische Charakteristika bezüglich des Matrixpotentials (Abb. 91). Besonders auffällig ist der starke Abfall des Matrixpotentials in 40 cm Tiefe bei der Lupine, der mit einer starken Verringerung des Wassergehalts einhergeht. Im Gegensatz zu den Ergebnissen nach dem Ende der Zwischenfruchtperiode, zeigen die Anbauvarianten auch tiefenspezifische Verläufe des Wassergehalts. Auffällig ist wiederum die in der untersten Tiefe sehr individuelle Veränderung der Wassergehalte im Zeitverlauf, die hier auch für die Matrixpotentiale zu beobachten ist.

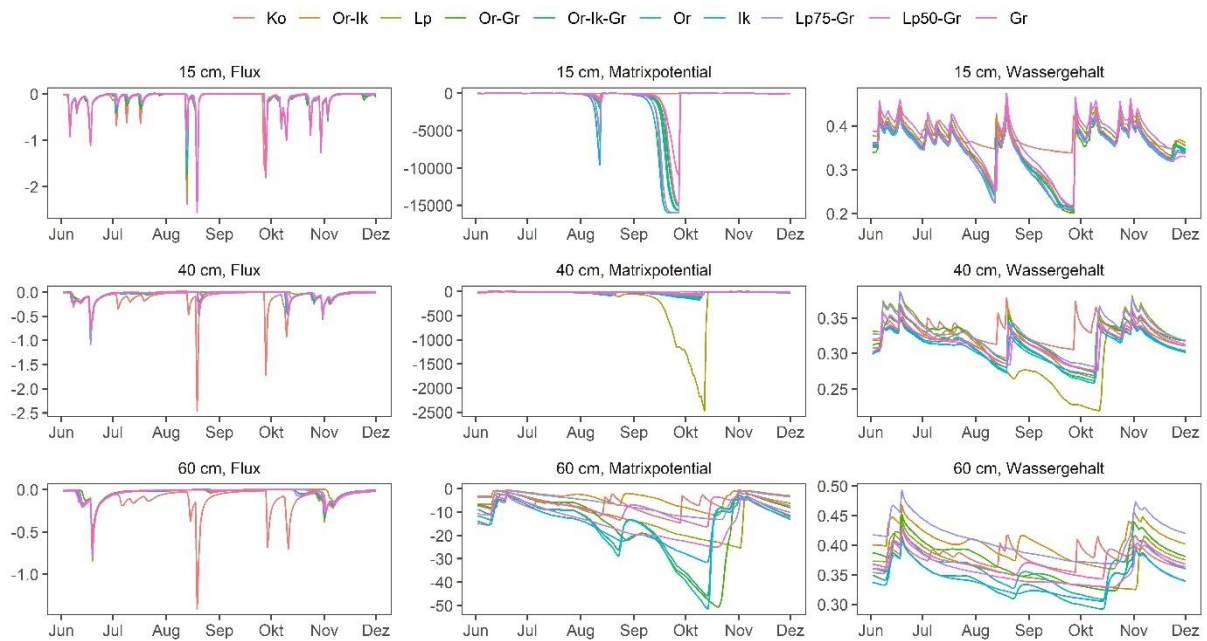


Abb. 91: Simulierte Sickerwasserraten (links, cm/d), Matrixpotentiale (Mitte, hPa) und volumetrische Wassergehalte (rechts, cm^3/cm^3) im Jahresverlauf und in verschiedenen Bodentiefen für den Zwischenfruchtversuch am Standort Wiesengut; basierend auf Wetterdaten aus dem Jahr 2020 und den im Jahr 2020 bestimmten Wurzellängendichteverteilungen und hydraulischen Bodeneigenschaften, bei Annahme eines Blattflächenindex von 3 und einer Bestandeshöhe von 80 cm. Zu beachten ist die unterschiedliche Skalierung der Ordinate und die Überlagerung der Kurven für einige Varianten.

Der Vergleich verschiedener Simulationsvarianten (d.h. a.) ohne Einfluss der Pflanzen, b.) bei einheitlichen hydraulischen Eigenschaften, c.) für unterschiedliche Simulationszeiträume sowie d.) Variation von Blattflächenindex und Bestandeshöhe) zeigt wiederum die bereits für die Simulationsergebnisse nach Ende der Zwischenfruchtperiode beschriebenen Charakteristika (Abb. 92).

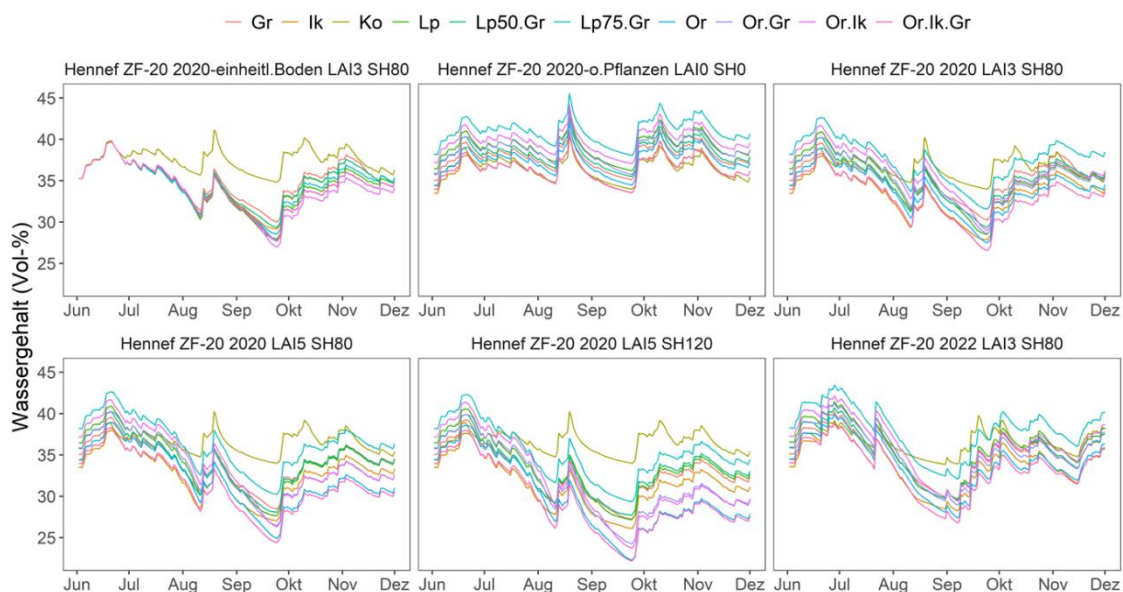


Abb. 92: Simulierte volumetrische Wassergehalte im Jahresverlauf für den Zwischenfruchtversuch am Standort Wiesengut, basierend auf Wetterdaten aus dem Jahr 2020 bzw. 2022 und den im Jahr 2020 bestimmten Wurzellängendichteverteilungen und hydraulischen Bodeneigenschaften. Vergleich verschiedener Simulationsvarianten: ausschließlicher Einfluss der Anbauvarianten bei konstanten hydraulischen Eigenschaften (oben links); ausschließlicher Einfluss der hydraulischen Eigenschaften ohne Einfluss der Anbauvarianten (oben Mitte); Einfluss der hydraulischen Eigenschaften und der

Anbauvarianten bei unterschiedlichen Blattflächenindices (LAI) und Bestandeshöhen (SH) für das Jahr 2020: LAI: 3, SH: 80 cm (oben rechts); LAI: 5, SH: 80 cm (unten links), LAI: 5, SH: 120 cm (unten Mitte); wie oben rechts für das Jahr 2022 (unten rechts).

Vergleich der Simulationsergebnisse auf Basis der im Jahr 2019 bzw. 2020 bestimmten Wurzelverteilungen und hydraulischen Eigenschaften (Standort Wiesengut)

Ein direkter Vergleich der Simulationsergebnisse, die auf Basis der im Jahr 2019 bzw. 2020 bestimmten Wurzelverteilungen und hydraulischen Eigenschaften generiert wurden, ist nicht möglich, da nicht alle Varianten in beiden Jahren realisiert wurden. So wurden beispielsweise Sandhafer und Phacelia, die nach dem Ende der Zwischenfruchtperiode in 15 bzw. 40 cm Tiefe besonders niedrige Matrixpotentiale zeigten oder RigolTR, für den sich konsistent die geringsten Wassergehalte ergaben, nach Ernte der Nachfrucht nicht mehr untersucht. Für einen Vergleich wurden daher Grünroggen, Ölrettich und das Gemenge aus Ölrettich, Inkarnatklee und Grünroggen ausgewählt, die sowohl 2019 als auch 2020 untersucht wurden und sich durch verhältnismäßig konträre zeitliche Verläufe des Wassergehalts auszeichnen. Bei einem Vergleich der beiden Jahre werden Unterschiede in den initialen Wassergehalten deutlich, die 2019 generell höher sind als 2020 (Abb. 93).



Abb. 93: Simulierte volumetrische Wassergehalte im Jahresverlauf für den Zwischenfruchtversuch am Standort Wiesengut; basierend auf Wetterdaten aus dem Jahr 2020 und den im Jahr 2019 bzw. 2020 bestimmten Wurzellängendichteverteilungen und hydraulischen Bodeneigenschaften, bei Annahme eines Blattflächenindex von 3 und einer Bestandeshöhe von 80 cm. Verglichen werden die Anbauvarianten mit dem konträrsten Verhalten hinsichtlich des volumetrischen Wassergehaltes.

Dies lässt sich auf Unterschiede in den hydraulischen Eigenschaften zurückführen, da für die Simulation die Anfangswassergehalte bei Feldkapazität angenommen wurden. Während Grünroggen (Gr) mit relativ hohen Wassergehalten konsistentes Verhalten im zeitlichen Verlauf zeigt, zeigen die Varianten Ölrettich (Or) und Ölrettich + Inkarnatklee + Grünroggen (Or-lk-Gr) unterschiedliche Wassergehaltsverläufe. So bleiben die Wassergehaltsunterschiede zwischen Ölrettich und dem Gemenge im zeitlichen Verlauf für 2020 erhalten, wohingegen es 2019 zu einer Veränderung im zeitlichen Verlauf kommt. Zu Beginn der Simulationsperiode zeigt Ölrettich höhere Wassergehalte als das Gemenge, am Ende der Simulationsperiode ist es jedoch umgekehrt. Diese charakteristischen Unterschiede im zeitlichen Verlauf lassen sich auch in den Tiefenprofilen nachvollziehen (Abb. 94).

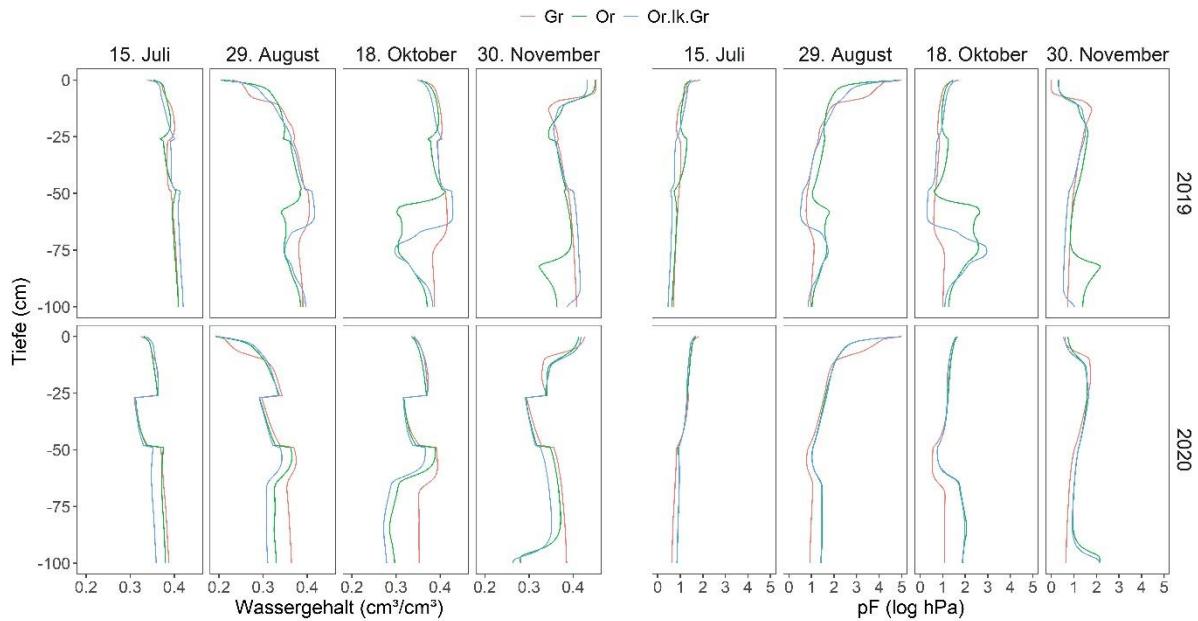


Abb. 94: Simulierte volumetrische Wassergehalte (links) und Matrixpotentiale (rechts) als Funktion der Bodentiefe zu unterschiedlichen Zeitpunkten für den Zwischenfruchtversuch am Standort Wiesengut; basierend auf Wetterdaten aus dem Jahr 2020 und den im Jahr 2019 bzw. 2020 bestimmten Wurzellängendichteverteilungen und hydraulischen Bodeneigenschaften, bei Annahme eines Blattflächenindex von 3 und einer Bestandeshöhe von 80 cm. Verglichen werden die Anbauvarianten mit dem konträrsten Verhalten hinsichtlich des volumetrischen Wassergehaltes.

Vorgewendeversuch

Auch die Simulationsergebnisse zum Vorgewendeversuch zeigen tiefenspezifische Charakteristika der Varianten hinsichtlich des Matrixpotentials und der Wassergehalte. Besonders auffällig ist hierbei der zeitliche Verlauf der Parameter für den Anbau von Wegwarte als Zwischenfrucht, der in der obersten und untersten Tiefe jeweils die niedrigsten, in der mittleren Tiefe dagegen von allen Anbauvarianten die höchsten Matrixpotentiale und Wassergehalte aufweist. Ein tiefenspezifischer Vergleich zeigt darüber hinaus, dass beispielsweise Ölrettich in 15 und 40 cm Tiefe höhere, jedoch in 60 cm geringere Wassergehalte aufweist als die Wegwarte (Reinsaat). Besonders markant sind die teilweise sehr deutlichen Unterschiede zwischen den verschiedenen Anbauvarianten der Wegwarte.

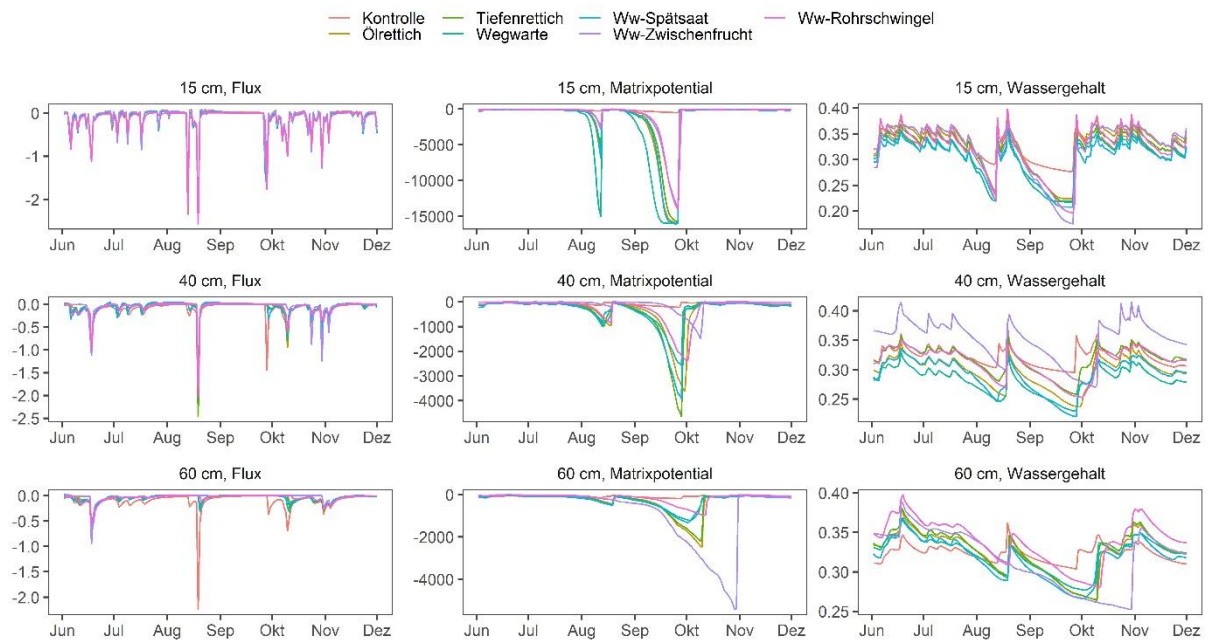


Abb. 95: Simulierte Sickerwasserraten (links, cm/d), Matrixpotentiale (Mitte, hPa) und volumetrische Wassergehalte (rechts, cm^3/cm^3) im Jahresverlauf und in verschiedenen Bodentiefen im Bereich des Vorgewendes am Standort Wiesengut; basierend auf Wetterdaten und Wurzellängendichteverteilungen aus dem Jahr 2020 und den im Jahr 2022 bestimmten hydraulischen Bodeneigenschaften, bei Annahme eines Blattflächenindex von 3 und einer Bestandeshöhe von 80 cm. Zu beachten ist die unterschiedliche Skalierung der Ordinate und die Überlagerung der Kurven für einige Varianten.

Auffällig sind weiterhin die im Vergleich zur Kontrolle relativ hohen Wassergehalte der Anbauvarianten, die auch bereits bei den Simulationen zum Zwischenfruchtversuch (vor allem nach dem Ende der Zwischenfruchtperiode) beobachtet werden konnten (Abb. 96). Beim Vergleich der simulierten Wassergehalte bei einheitlichen hydraulischen Verhältnissen und unter Ausschluss der Wasserentnahme durch die Pflanzen fällt auf, dass die durch die deutlichen Unterschiede in den hydraulischen Eigenschaften verursachten Unterschiede im Wassergehalt durch die Wasserentnahme ausgeglichen werden. So zeigen sich zwischen den Anbauvarianten im gesamten zeitlichen Verlauf nur sehr geringe Wassergehaltsunterschiede.

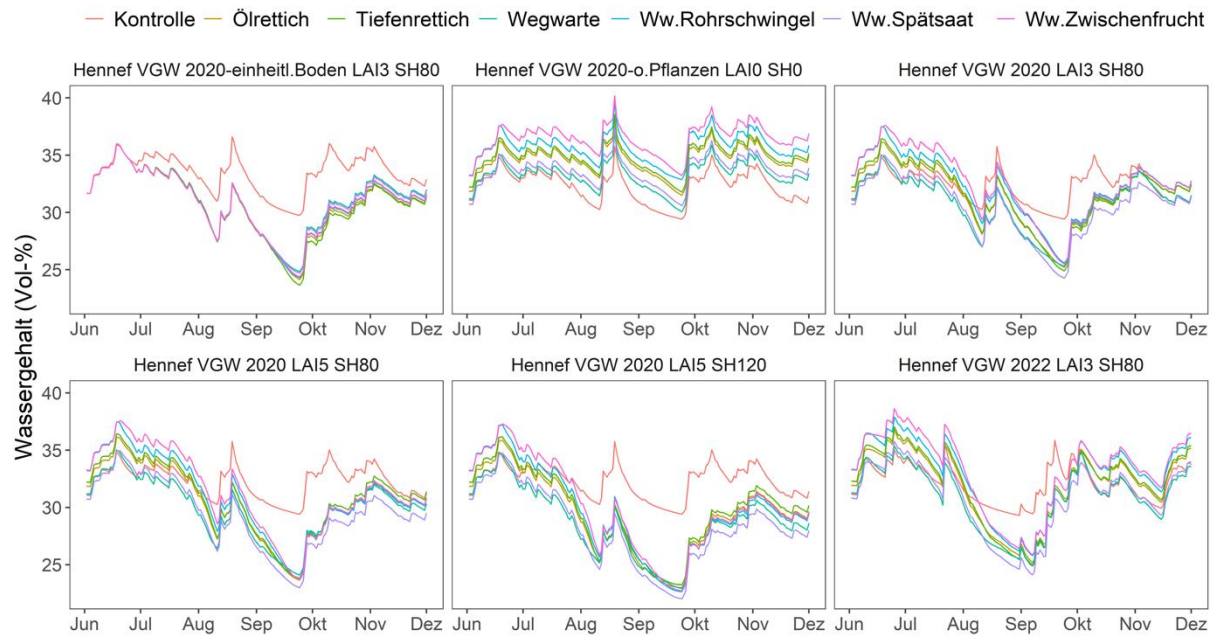


Abb. 96: Simulierte volumetrische Wassergehalte im Jahresverlauf im Bereich des Vorgewendes am Standort Wiesengut, basierend auf Wetterdaten aus dem Jahr 2020 bzw. 2022 sowie den im Jahr 2020 bestimmten Wurzellängendichteverteilungen und den im Jahr 2022 bestimmten hydraulischen Bodeneigenschaften. Vergleich verschiedener Simulationsvarianten: ausschließlicher Einfluss der Anbauvarianten bei konstanten hydraulischen Eigenschaften (oben links); ausschließlicher Einfluss der hydraulischen Eigenschaften ohne Einfluss der Anbauvarianten (oben Mitte); Einfluss der hydraulischen Eigenschaften und der Anbauvarianten bei unterschiedlichen Blattflächenindices (LAI) und Bestandeshöhen (SH) simuliert mit Wetterdaten aus dem Jahr 2020: LAI: 3, SH: 80 cm (oben rechts); LAI: 5, SH: 80 cm (unten links); LAI: 5, SH: 120 cm (unten Mitte); wie oben rechts, jedoch basierend auf Wetterdaten aus dem Jahr 2022 (unten rechts).

4.4.3 Modellierung der Humusbildung mit HUMOD (Dr. Christopher Brock)

In der Humusbilanzierung wurden relevante positive C-Bilanzen erwartungsgemäß nur für legume Früchte ermittelt (Abb. 97 und Abb. 98). Der ermittelte potentielle C-Aufbau lag bei den mehrjährigen Futterpflanzen insgesamt auf deutlich höherem Niveau als bei den Zwischenfrüchten.

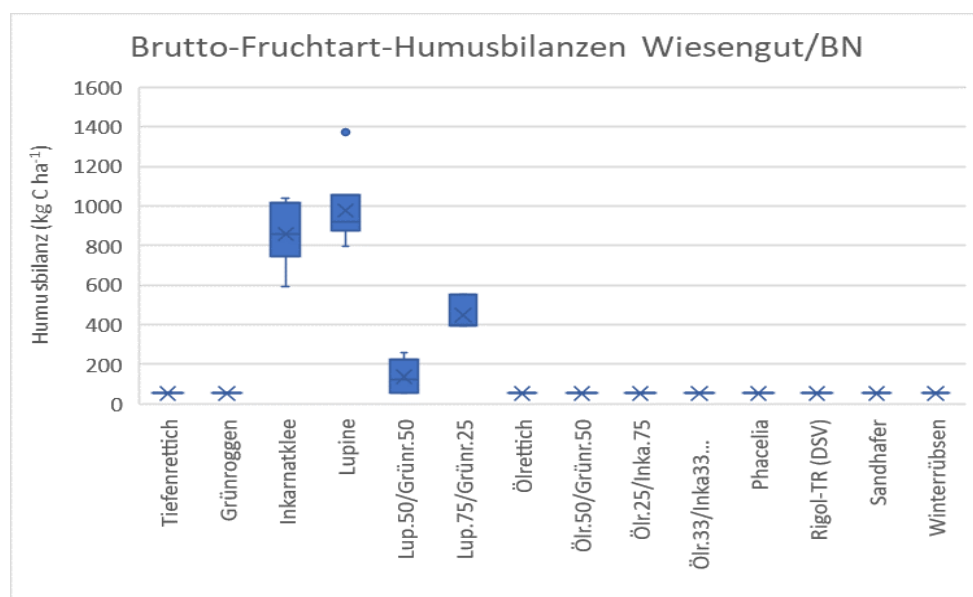


Abb. 97: Humusbilanzen der Zwischenfrüchte am Standort Wiesengut.

Bei den Zwischenfrüchten am Standort Wiesengut zeigten die Reinsaaten von Inkarnatklee und Lupinen die höchsten Bilanzwerte. Bei Gemengeanbau von Lupine und Grünroggen nahmen die Bilanzen mit steigendem Anteil von Grünroggen in der Aussaatmischung ab, blieben aber über den Werten der anderen geprüften Kulturen. In dem zweiten im Versuch geprüften Leguminosen-Nichtleguminosengemenge (Ölrettich-Inkarnatklee) waren die Anteile der Leguminose (Inkarnatklee) so gering, dass keine erhebliche positive Wirkung in der Humusbilanz erzielt wurde. Alle Nichtleguminosen wiesen rechnerisch Bilanzen in Höhe von 53,96 kg C ha⁻¹ auf. Die leicht positiven Bilanzen werden dabei durch die Aufnahme von N aus der atmosphärischen Deposition in die Biomasse erreicht.

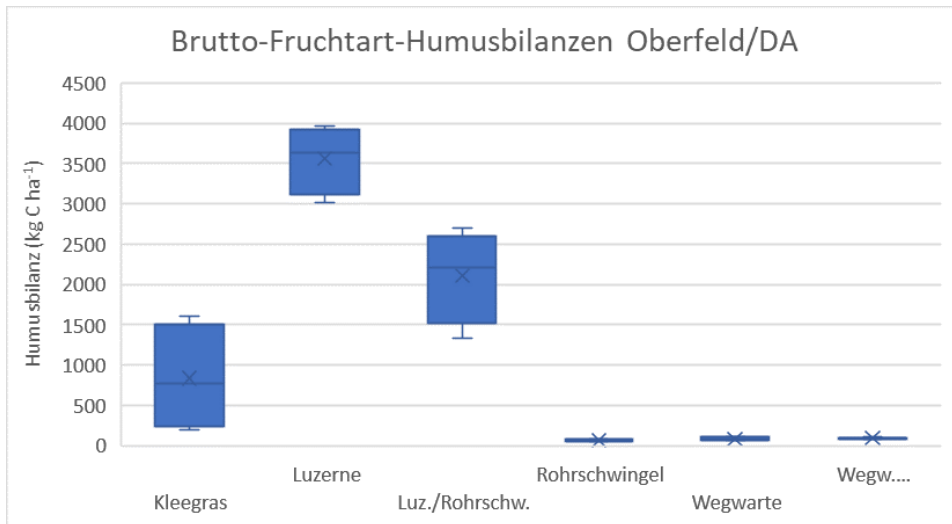


Abb. 98: Humusbilanzen der mehrjährigen Futterpflanzen am Standort Oberfeld.

Die legumen Futterpflanzen am Standort Oberfeld wiesen erwartungsgemäß deutlich höhere positive Bilanzen auf. Allerdings litt der Klee unter der Trockenheit und bildete deutlich weniger Biomasse, als die Luzerne und das Luzerne-Rohrschwingel-Gemenge. Aufgrund des geringen Kleeanteils und der geringeren Biomasse lag die Bilanz des Kleegrases daher deutlich unter dem der Luzerne und des Luzerne-Rohrschwingel-Gemenges. Die Nichtleguminosen wiesen wiederum nur geringe positive Bilanzen auf, die durch die Aufnahme von N aus der atmosphärischen Deposition bedingt waren.

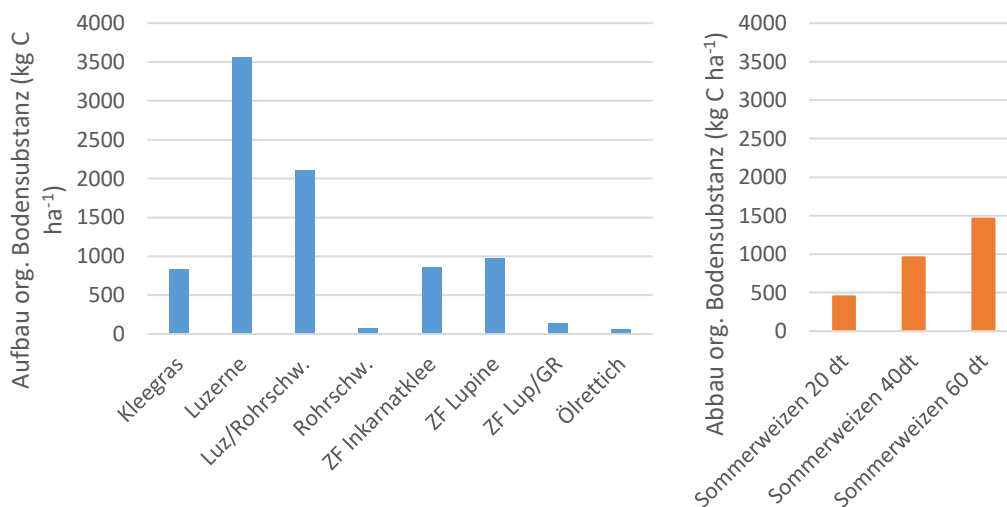


Abb. 99: Gegenüberstellung des rechnerischen Aufbaus organischer Bodensubstanz unter Futterpflanzen und Leguminosen mit dem Abbau unter Sommerweizen

Abb. 99 stellt den Aufbau organischer Bodensubstanz durch die geprüften Futterpflanzen und Zwischenfrüchte dem Abbau durch Sommerweizen mit unterschiedlichem Ertragsniveau gegenüber. Dabei wird deutlich, dass erfolgreicher Zwischenfruchtbau mit Leguminosen rechnerisch den Abbau organischer Substanz unter Sommerweizen bei mittlerem Ertragsniveau kompensieren kann, aber keinen Vorrat für weitere Fruchtfolgenfelder aufbaut. Dies ist bei den mehrjährigen Futterpflanzen anders. So konnte die Luzerne rechnerisch 3,5 Jahre der Abschöpfung von N aus der Mineralisierung organischer Substanz durch Sommerweizen bei mittlerem Ertragsniveau ausgleichen, was einem Luzerneanteil von ca. 25% in der Fruchtfolge entsprechen würde. In der Abbildung wird aber auch deutlich, dass niedrige Aufwuchsmengen und/oder eine schlechte oder fehlende N-Fixierung durch Futterpflanzen und Zwischenfrüchte in einem sehr geringen Aufbau organischer Bodensubstanz resultieren können.

5 Diskussion der Ergebnisse

5.1 Arbeitspaket 1

5.1.1 Spross- und Wurzelwachstum der Futterpflanzen (Roman Kemper)

Die Trockenmassen und Stickstoffaufnahmen (Abb. 10 und Abb. 12) zeigten die höchste Produktivität am Standort Oberfeld für Luzerne und die Luzerne-Rohrschwingel-Mischung sowohl für den Spross als auch für die Wurzel. Die Rohrschwingel-Reinsaat und die Rohrschwingel-Wegwarte-Mischung wiesen zwar hohe Wurzelmassen auf, die Sprossbiomasse war aber äußerst gering. Die Produktivität von Wegwarte und dem Rotklee gras lagen dazwischen. Rotklee war an diesen trockenen und sandigen Standort deutlich schlechter angepasst als die Luzerne. Im Gegensatz zu den Leguminosen-Reinsaaten und -Mischungen waren die nicht-legumen Reinsaaten hinsichtlich Stickstoff erheblich benachteiligt. Die insgesamt geringe Spross-Produktivität der Futterpflanzen lässt sich durch den sandigen Standort mit einer geringen Wasserspeicherkapazität und die Trockenheit in den Jahren 2019 und 2020 erklären. Auffällig waren daher die meist über 1 liegenden Wurzel-Spross-Verhältnisse. Damit zeigten die Luzerne und die Luzerne-Rohrschwingel-Mischung an diesem Standort nicht nur das höchste Potential zur Futterproduktion, sondern auch zur Stickstoff-Fixierung und Anreicherung von organischer Substanz im Boden durch die Wurzelmasse. Die hier erhobenen Wurzelmassen für die Futterpflanzen sind mit Werten aus der Literatur für das erste Hauptnutzungsjahr vergleichbar (Bolinder et al., 2002). Wurzelmassen für das zweite Hauptnutzungsjahr aus der Untersuchung von Bolinder et al. (2002) sind deutlich höher, insbesondere für die Gräser. Unterschiede von Standort, Nährstoffverfügbarkeit und hier vor allem Wasserverfügbarkeit sind als Gründe für die abweichenden Werte naheliegend.

Für die Mischungen zeigten sich in Spross und Wurzel teilweise Mischungseffekte, also höhere Werte als das Mittel der Reinsaaten. Jedoch wurde weder im Spross noch in der Wurzel ein *transgressive overyielding*, also höhere Werte der Mischung als die beste Reinsaat, gefunden. Der Mischungseffekt ist für die Produktivität der Mischungen im Vergleich zum Identitätseffekt als geringer zu bewerten.

Die geringere Durchwurzelungsintensität der Pfahlwurzler Luzerne und Wegwarte, gemessen an der Wurzellängendichte, kann durch eine Mischung mit Gräsern im Oberboden erhöht werden (Abb. 13), was einen möglichen Vorteil von Mischungen im Vergleich zur Reinsaat der Pfahlwurzler darstellt. Hinsichtlich der Wurzelmasse sind die Unterschiede zwischen den Varianten im Oberboden geringer (Abb. 14). Dennoch zeigt sich auch hier ein deutlicher Einfluss der Artenidentität. Luzerne und Rohrschwingel bilden in den oberen Bodenschichten viel Wurzelbiomasse. Im Unterboden zeigt sich sowohl in der Mischung als auch in der Reinsaat die hohe Wurzelmassebildung der Luzerne. Somit wird auch hier die Bedeutung des Identitätseffekts im Vergleich zum Mischungseffekt für die Futterpflanzen-Mischungen hinsichtlich der Durchwurzelung deutlich.

In allen drei Mischungen zeigte die FTIR-Spektroskopie die vermutete Verteilung der Wurzelmasseanteile mit einer Dominanz der Gräser im Oberboden und einer Zunahme der Pfahlwurzler mit der Tiefe (Abb. 15, Abb. 16, Abb. 17). Auffällig war dabei die im Vergleich zur Wegwarte höhere Dominanz der Luzerne gegenüber dem Rohrschwingel, insbesondere im Unterboden.

Die Bioporendichte ist am Standort Oberfeld aufgrund der sandigen Bodentextur und des Einzelkorngefüges mit unter 100 Bioporen/m² für Durchmesser zwischen 2 und 5 mm sowie mit unter 50 Bioporen/m² für Durchmesser > 5 mm gering (Abb. 18). An Standorten mit höheren Schluff- und

Tonanteilen in der Bodentextur finden sich deutlich höhere Bioporendichten. Am Campus Klein-Altenendorf in Meckenheim bei Bonn wurden auf Lössboden für Durchmesser > 5 mm zwischen 100 und 200 Bioporen/m² und für Durchmesser von 2-5 mm zwischen 200 und 300 Bioporen/m² gefunden (Han et al. 2015a). Am Campus Wiesengut in Hennef bei Bonn wurden für Durchmesser > 5 mm teilweise über 200 Bioporen/m² und für Durchmesser von 2-5 mm teilweise über 500 Bioporen/m² gefunden (Abb. 49). Die Unterschiede zwischen den Futterpflanzen-Varianten am Standort Oberfeld zeigen aber, wenn auch nicht immer signifikante, Unterschiede zur Kontrolle ohne Feldfutterbau und damit das Potential mit dem Anbau von Futterpflanzen die Bioporendichte zu erhöhen. Insbesondere scheint die Luzerne geeignet zu sein. Auch die Berechnung der Wurzelstücke/m² unterstreicht mit Werten von ca. 100 für Durchmesser von 2-5 mm sowohl in 40 cm als auch in 60 cm Tiefe das Potential mit Feldfutterbau die Bioporendichte zu erhöhen. Hierbei zeigen insbesondere Rohrschwengel und Luzerne hohe Werte. Die Anzahl der Wurzelstücke pro m² für Luzerne und Wegwarte entsprechen denen von Perkons (2018). Dort werden für Durchmesser > 2mm für Luzerne und Wegwarte 115 bzw. 53 Wurzelstücke/m² angegeben. Die Werte für Rohrschwengel liegen bei Perkons (2018) mit 6 Wurzelstücken/m² deutlich unter den hier berechneten Werten. Ein möglicher Grund für die hohe Anzahl am Standort Oberfeld könnte die aufgrund der sandigen Textur für Gräser höhere Durchwurzelbarkeit des Bodens sein.

5.1.2 Effekte auf die Nachfrüchte (Roman Kemper)

Die Kornerträge der beiden Nachfrüchte Sommerweizen und Winterroggen waren mit 1-2 t/ha Trockenmasse insgesamt sehr gering (Abb. 23). Der nährstoffarme und sandige Standort ist ein Grund dafür. Die Ertragsunterschiede zwischen den Vorfrucht-Varianten können zum Teil durch die Gehalte an mineralischem Bodenstickstoff erklärt werden (Abb. 20, Abb. 21, Abb. 22). Die höchsten N_{min}-Gehalte fanden sich nach Luzerne und nach der Luzerne-Rohrschwengel-Mischung, nach denen auch die höchsten Sommerweizen-Erträge erzielt wurden. Durch die geringe Produktivität sowie Stickstoffaufnahme von Rotklee gras war der Weizenertrag nach dieser Vorfrucht geringer als nach Luzerne oder der Mischung mit Luzerne. Zusätzlich legen die höheren Bioporendichten nach Luzerne und Luzerne-Rohrschwengel sowie die nach diesen beiden Varianten modellierte erhöhte Wasseraufnahme aus tiefen Bodenschichten einen Einfluss des verbesserten Zugangs zu Wasserreserven im Unterboden nahe. Auch die hohen Gesamt- und Kornerträge sowie N-Aufnahmen nach Wegwarte im Vergleich zu anderen nicht-legumen Vorfrüchten und im Vergleich zum Rotklee gras bei gleichzeitig durchgehend sehr niedrigen N_{min}-Gehalten legen einen Einfluss von durch die Vorfrucht generierten Bodenstruktureffekten auf die Nachfruchterträge nahe. Beim Winterroggen zeigten sich signifikant höhere Kornerträge nach Luzerne-Reinsaat und Luzerne-Rohrschwengel-Mischung im Vergleich zur Kontrolle. Da weder die Gehalte an mineralischem Bodenstickstoff noch die N-Aufnahme des Roggens signifikante Unterschiede zeigen, ist der verbesserte Zugang zu Wasserreserven hier wahrscheinlich maßgeblich. Zusätzlich zu den o.g. Aspekten stützen hohe Wurzellängendichten des Roggens im Unterboden in beiden Varianten diese Vermutung.

Auswirkungen der verschiedenen Vorfrüchte auf die Durchwurzelungsintensität der ersten Nachfrucht Sommerweizen konnte leider nicht erfasst werden. Ursprünglich war ein Herbstumbruch der Futterpflanzen geplant. Aus Gründen der Stickstoff-Konservierung wurde aber ein Frühjahrsumbruch durchgeführt. Durch den Umbruch kurz vor der Saat des Sommerweizens war die Zeit zur Verrottung der Wurzelrückstände der Vorfrüchte nicht lang genug, sodass an der Profilwand nicht sicher zwischen Vor- und Nachfruchtwurzeln unterschieden werden konnte. Daher konnte die Durchwurzelungsintensität mit der Profilwandmethode für den Sommerweizen nicht erhoben werden. Ein Jahr später

konnte die Wurzellängendichte an der Profilwand für die zweite Nachfrucht Winterroggen jedoch problemlos erfasst werden. Die Wurzeln der Futterpflanzen waren stark genug zersetzt.

Statistisch signifikante Unterschiede zeigten sich für die Wurzellänge der zweiten Nachfrucht Winterroggen nur im Unterboden zum Termin der Blüte. Dennoch kann die Tendenz festgehalten werden, dass der Winterroggen im Oberboden höhere Wurzellängen nach den Vorfrucht-Varianten mit Rohrschwengel aufweist. Der Winterroggen nutzt möglicherweise Poren, die der Rohrschwengel zuvor gebildet hatte. Im Unterboden erzielte der Winterroggen die höchsten Wurzellängen nach Luzerne und der Luzerne-Rohrschwengel-Mischung, aber auch nach der Kontrolle. Der Roggen nutzt im Unterboden Poren, die von der Luzerne gebildet worden war. An der Profilwand konnte in einigen Parzellen festgestellt werden, dass Roggenwurzeln entlang einer noch nicht vollständig verrotteten Luzernewurzeln nach unten wurzelten. Der höheren Werte nach der Kontrolle könnten jedoch einen Hinweis dafür sein, dass bereits zuvor bestehende Poren noch mit Wurzeln der Vorfrüchte besetzt waren und nicht vom Roggen genutzt werden konnten.

5.1.3 Wurzelartentrennung (Dr. Nicole Legner)

Die Bestimmung der Wurzelanteile mit Hilfe der Fourier-Transform-Infrarot Spektroskopie konnte bei den verschiedenen Gemengen der Zwischenfruchtversuche erfolgreich angewendet werden. Für alle Gemenge ließen sich zufriedenstellende bis sehr gute Modelle erstellen. Des Weiteren wurde die Bewertung der statistischen Werte der Modelle verändert und damit deutlich verbessert. Es konnten alle Gemengeproben erfolgreich ausgewertet werden. Diese Ergebnisse geben den prozentualen Anteil der Arten im Gemenge pro Tiefenschicht an und wurden an die Arbeitsgruppe INRES (AOL) der Universität Bonn zur weiteren Auswertung verschickt.

5.1.4 Eindringwiderstand und Bodenwassergehalt (Dr. Oliver Schmittmann)

Messtechnisch ist die Beurteilung des Eindringwiderstandes im Bereich 0 – 5 cm oft fehlerbehaftet und sollte bei Interpretationen vernachlässigt werden (Uppenkamp, 1986). Lockerungseffekte im Oberboden sind durch intensive Durchwurzelung erkennbar, so auch bei den Flachwurzlern Klee gras und Rohrschwengel. In tieferen Zonen resultiert aus starkem Wurzelwachstum in dicht lagerndem Boden nicht unbedingt eine Reduzierung des Eindringwiderstandes. Grundsätzlich stellt sich die Frage, ob durch die Durchwurzelung die Wasserinfiltration gefördert, die Wasserhaltekapazität des Bodens erhöht oder das Wasser für die Bildung von Biomasse (auch Wurzeln) verwendet wird (Jakobs et al., 2019). Der volumetrische Bodenwassergehalt war beim Rohrschwengel zu beiden Messzeitpunkten am höchsten. Als typische Flachwurzler sind aber nur im Oberboden Zunahmen im Wassergehalt festzustellen.

5.1.5 Bodenphysik (Dr. Marc-Oliver Göbel und Prof. Dr. Stephan Peth)

Die in 40 cm Tiefe über alle Varianten zu beobachtende höhere Lagerungsdichte lässt sich vermutlich auf eine Pflugsohle zurückführen. Obwohl sich generell kein Effekt des Futterpflanzenbaus auf die Lagerungsdichte feststellen lässt, gibt es jedoch deutliche Unterschiede hinsichtlich der Luftkapazität (LK), wobei der Anbau von Wegwarte im Oberboden (15 cm) und Luzerne im Unterboden (60 cm) mit einer signifikanten Verringerung der LK einhergeht (Abb. 100). Dies lässt vermuten, dass es in diesen Fällen auch zu einer Erhöhung der nutzbaren Feldkapazität (nFK) gekommen ist. Allerdings lässt sich

dies aufgrund fehlender Analysen zum Zeitpunkt der Berichtserstellung nicht bestätigen. Interessanterweise führen alle Anbauvarianten, d.h. sowohl homorhize als auch allorhize Arten, im Vergleich zur Kontrolle tendenziell zu einer Verringerung der LK in 60 cm Tiefe. Das lässt sich möglicherweise damit erklären, dass die Poren im Unterboden noch mit Wurzelbiomasse belegt sind, da hier aufgrund der geringeren mikrobiellen Aktivität die Zersetzung ein Jahr nach dem Umbruch der Futterpflanzen nur wenig fortgeschritten ist. Eine tendenzielle Erhöhung der LK in 15 cm Tiefe lässt sich beim Anbau des eher flachwurzelnden Rohrschwingels (auch in Kombination mit Wegwarte) beobachten, jedoch gilt dies auch für den Anbau von Luzerne, die durch ein allorhizes Wurzelsystem gekennzeichnet sind. Insgesamt lässt sich die LK in allen Tiefen als mittel bis hoch (insbesondere in 60 cm Tiefe) klassifizieren (Ad-hoc-AG Boden, 2005). Hinsichtlich der gesättigten Wasserleitfähigkeit hat der Futterpflanzenbau keine spezifischen Effekte. Auffällig ist hier die bei allen Varianten signifikant höhere Wasserleitfähigkeit in der untersten Tiefe (Abb. 37), was sich vermutlich mit den in der Tiefe zunehmenden Sandgehalten erklären lässt. Insgesamt ist die gesättigte Wasserleitfähigkeit in 15 und 40 cm Tiefe als hoch bis äußerst hoch und in 60 cm Tiefe als sehr hoch bis äußerst hoch einzustufen (Ad-hoc-AG Boden, 2005). Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass im Hinblick auf die gemessenen bodenphysikalischen Parameter nach dem derzeitigen Erkenntnisstand keine klaren Tendenzen hinsichtlich der Wirkung homorhizer und allorhizer Arten festzustellen sind.

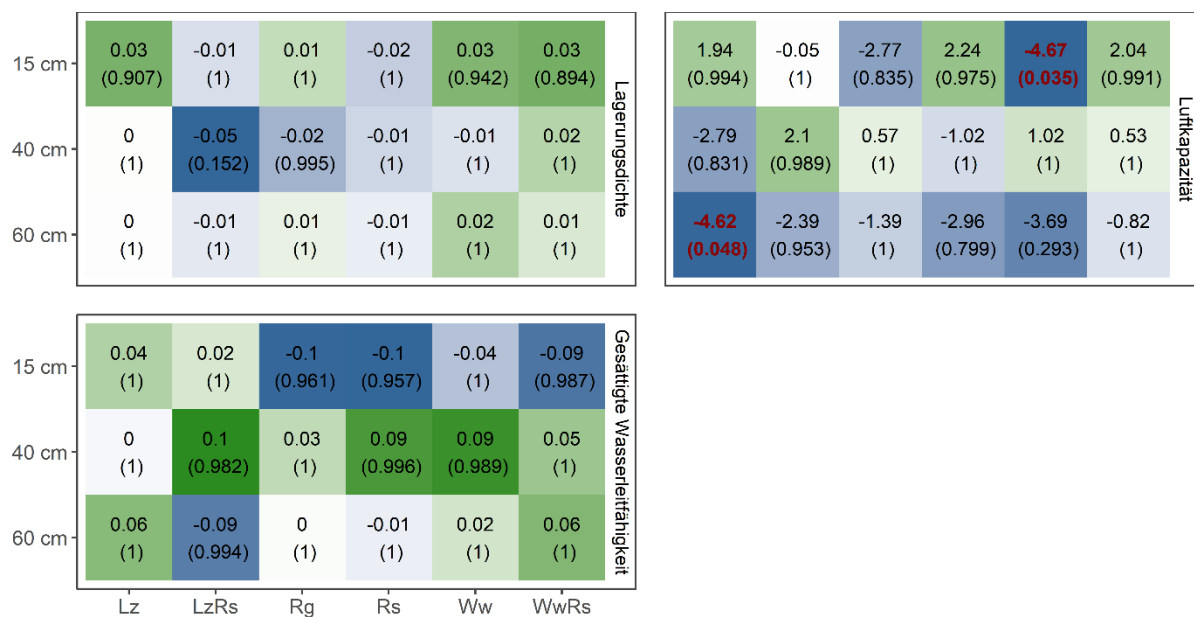


Abb. 100: Effektmatrix für den Vergleich verschiedener bodenphysikalischer Kenngrößen zwischen Anbauvariante und Kontrolle für die jeweilige Tiefe am Standort Oberfeld. Dargestellt sind die Differenzen der Mittelwerte (Lagerungsdichte: g/cm³, Luftkapazität: Vol-%, Wasserleitfähigkeit: log[cm/d]), mit den für die Mehrfachvergleiche adjustierten p-Werten (Tukey HSD Test; log-transformiert für gesättigte Wasserleitfähigkeit) in Klammern. Grün eingefärbte Zellen weisen auf eine Erhöhung, blau eingefärbte Zellen auf eine Verringerung des Parameterwertes als Folge des Futterpflanzenbaus hin. Die Farbintensität korrespondiert mit der Effektstärke. Zahlenwerte in rot weisen auf einen signifikanten Effekt (p < 0,05) hin.

5.2 Arbeitspaket 2

5.2.1 Spross- und Wurzelwachstum sowie Bioporen (Roman Kemper)

Grünroggen und Inkarnatklée wiesen durch viele Feinwurzeln eine hohe Wurzellängendichte (WLD) im Oberboden auf. Ihre WLD nahm über Winter im Ober- und Unterboden weiter zu (Abb. 38). Die Zwischenfruchtarten mit der höchsten WLD im Unterboden waren Ölrettich, Winterrüben und Phacelia. Sandhafer verhielt sich intermediär zwischen diesen zwei Gruppen. Die Blaue Lupine wies in Ober- und Unterboden eine geringe WLD auf. Phacelia, Ölrettich, Winterrüben und Sandhafer wiesen den höchsten Anteil der Wurzellänge in Bioporen auf (Tabelle 7). Diese komplementären Wurzelmerkmale deuten darauf hin, dass die Kombination von Zwischenfrüchten mit unterschiedlichen Wurzeltypen wie zum Beispiel Lupine und Grünroggen oder Ölrettich und Grünroggen bzw. Inkarnatklée für Mischungen interessant sein könnten. Eine detaillierte und weiterführende Diskussion der Ergebnisse der Profilwandmethode findet sich in Kemper et al. 2020 unter <https://doi.org/10.3390/agriculture10110503>.

Anhand dieser Ergebnisse aus dem Screening der Wurzeltypen der Zwischenfrucht-Reinsaaten wurden die Eigenschaften der folgenden Mischungen näher untersucht:

- Lupine-Grünroggen 50:50
- Lupine-Grünroggen 75:25
- Ölrettich-Grünroggen 50:50
- Ölrettich-Inkarnatklée-Grünroggen 33:33:33

Die Ergebnisse der Spross- und Wurzeltrockenmasse von den Lupine-Grünroggen-Mischungen (Abb. 39) sowie den Mischungen mit Ölrettich und Grünroggen bzw. Inkarnatklée (Abb. 40) zeigten eher geringe Unterschiede zwischen den Varianten. Es gab keine signifikanten Effekte zwischen den Mischungen und den Erwartungswerten, weder für Spross noch für die Wurzel. Somit zeigte sich, dass der Vorteil für Mischungen hinsichtlich Trockenmasse eher gering ist. Auch in der Literatur finden sich einige Ergebnisse, die zeigen, dass für die Sprossmasse die Mischungseffekte gering sind. So wird gezeigt, dass oft die Artenidentität wichtiger ist als die Artenvielfalt (Finney and Kaye 2017; Freund et al. 2020; Wendling et al. 2019), Mischungen in der Regel nicht besser als die beste Einzelkomponente sind (Elhakeem et al. 2021) und Mischungen aus zwei Komponenten meistens höhere Biomasse und N-Aufnahme als Vielfaltsmischungen haben (Wendling et al. 2019). Für die Mischungseffekte der Wurzelmasse gibt es in der Literatur weniger Vergleiche. Details dazu finden sich aber in den wissenschaftlichen Veröffentlichungen Kemper et al. 2022 und Kemper et al. 2023b unter <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05366-9> sowie <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06240-y>.

Sowohl für die Sprossmasse, als auch für die Verteilung der Anteile an der Wurzelmasse über die Tiefe (Abb. 45 und Abb. 46) zeigte sich, dass die Mischungspartner sich in der Konkurrenzkraft stark unterscheiden. Die Konkurrenzkraft der hier getesteten Mischungspartner nimmt in folgender Reihenfolge ab: Ölrettich > Grünroggen > Blaue Lupine > Inkarnatklée.

Die Wurzelmerkmale Wurzellängendichte und Wurzelmassendichte (Abb. 41, Abb. 42) zeigten über den Tiefenverlauf deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Zwischenfruchtarten. Jedoch zeigt sich keine höhere Durchwurzelungsintensität für Mischungen über das gesamte Durchwurzelungsprofil. Die relativen Mischungseffekte (Abb. 43, Abb. 44) der Wurzelmerkmale Wurzellängendichte und Wurzelmassendichte machen aber die Stärken der Mischungen deutlich. Auch wenn es für die gesamte Wurzellänge oder Wurzelmasse keine deutlich höheren Werte für die Mischungen gibt,

zeigen sich aber in einzelnen Tiefen sehr hohe und teils signifikante Mischungseffekte. So sind insbesondere in den Mischungen mit dem Tiefwurzler Ölrettich in den unteren Bodenschichten hohe Mischungseffekte für Wurzellängen- und -massendichte zu finden. Somit durchwurzeln Mischungen mit Tiefwurzlern den Unterboden besser als nicht tiefwurzelnende Reinsaaten. Auch geringe Anteile an Ölrettich oder vermutlich auch anderen tiefwurzelnenden Zwischenfruchtarten wie Winterrüben oder Phacelia in der Mischung können den Unterboden durchwurzeln und im Unterboden Funktionen wie z.B. Nitrataufnahme übernehmen. Für die relativen Mischungseffekte der spezifischen Wurzellänge zeigen sich sehr auffällig für alle Mischungen und fast alle Tiefen positive Werte. Dies könnte auf eine höhere Nährstoffaufnahmeeffizienz und höheren Wurzelumsatz in Mischungen hindeuten. Details zu diesen Aspekten werden in Kemper et al. 2023b (<https://doi.org/10.1007/s11104-023-06240-y>) ausführlicher diskutiert.

Der Vergleich der Profile der Wurzelmasseendichte der Mischungen sowie der Reinsaaten (Abb. 47, Abb. 48) zeigte, dass es keine eindeutigen Hinweise auf eine Nischendifferenzierung zwischen den Zwischenfrüchten in Reinsaat oder Mischung gibt, da erhobene und erwartete Werte weitgehend übereinstimmen und die Tiefwurzler wie Lupine oder Ölrettich in den unteren Bodenschichten nicht höhere Werte als den Erwartungswert aufweisen und flach wurzelnde Arten wie Grünroggen oder Inkarnatklée in den oberen Bodenschichten nicht höhere Werte als den Erwartungswert aufweisen. Einzig in der Lupine-Grünroggen-Mischung in 2018 zeigte sich dieser Effekt für Grünroggen im Oberboden. In den Mischungen mit Ölrettich wurden die flachwurzelnenden Arten Grünroggen und Inkarnatklée durch den Ölrettich im Vergleich zur Reinsaat in den oberen Bodenschichten sogar zurückgedrängt. Auch in der Literatur finden sich wenig Beispiele für eine vertikale Wurzel-Nischendifferenzierung. Insbesondere bei Zwischenfrüchten könnte der Grund in der Komplementarität der Wurzelarchitektur über nur wenige Dezimeter sowie in der geringen Anbaudauer liegen. Eine weitergehende Diskussion zu den Ergebnissen der Effekte auf Spross und Wurzel in den Zwischenfruchtmischungen findet sich in Kemper et al. 2022 und Kemper et al. 2023b unter <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05366-9> sowie <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06240-y>.

Im Tagungsbeitrag für die Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau 2023 wurden die Aspekte zur Bioporendichte unter Zwischenfrüchten sowie zu deren Bioporengenesepotential diskutiert (Kemper et al. 2023a): Bei der Untersuchung der Bioporendichte unter Zwischenfrüchten fiel die insgesamt hohe Bioporendichte am Standort Wiesengut auf (Abb. 49). Vermutlich ist diese die Folge langjähriger ökologischer Bewirtschaftung mit regelmäßig hohen Stallmistgaben und Förderung von Regenwürmern und somit Bioporengenesese durch Regenwürmer. Keine Unterschiede zur unbewachsenen Kontrolle und die berechneten Wurzelstücke zur Abschätzung des Bioporengenesepotentials (Tabelle 8), insbesondere > 2 mm Durchmesser, sprechen gegen eine Bioporengenesese durch Zwischenfrüchte in 40 cm Bodentiefe. Naheliegender ist, dass deren Vegetationszeit von wenigen Monaten zu kurz ist, um hinreichend dicke Pfahlwurzeln zu bilden. Für > 2 mm wurden für Wegwarte 53 und für Luzerne 115 Wurzelstücke je m² in 45-55 cm Tiefe gefunden (Perkons, 2018). Somit ist das Bioporengenesepotential von über- oder mehrjährig angebauten Futterpflanzen höher als von Zwischenfrüchten. Die Ergebnisse aus 2018/19 zeigten, dass am ehesten die Lupine mit 44 Wurzelstücken je m² Bioporen generieren kann. Studien mit kruziferen Zwischenfrüchten zeigten, dass diese Bioporen bilden und die Bioporen von nachfolgend angebauter Soja genutzt werden können (Williams und Weil, 2004). Es wurden in dieser Studie jedoch nur einzelne Poren mit Minirhizotronen untersucht, nicht aber Bioporendichte und -durchmesser wie im hier vorliegenden Versuch erfasst. Es ist nicht auszuschließen, dass auch im vorliegenden

Versuch einzelne Bioporen durch Zwischenfruchtwurzeln gebildet wurden, jedoch vor dem Hintergrund der insgesamt hohen Bioporendichte von geringer Relevanz sind. Untersuchungen zur Wurzelmorphologie bei abruptem Wechsel der Lagerungsdichte in einer Studie von Burr-Hersey et al. (2017) zeigten, dass Ölrettich von einer dicken Pfahlwurzel zu mehreren dünnen Wurzeln in der verdichteten Zone wechselt, was die Bildung von großlumigen Bioporen im dichteren Unterboden beeinträchtigen würde.

5.2.2 Stickstoffaufnahme der Zwischenfrüchte und Erträge der Nachfrucht (Roman Kemper)

Dass bei den Nicht-Leguminosen im Herbst die winterharten Arten weniger N im Spross aufnahmen als die abfrierenden Arten, liegt daran, dass die winterharten Arten eine insgesamt geringere Sprossentwicklung vor Winter haben, da sie nicht ins Streckungswachstum gehen. Trotz hoher N-Aufnahmen von circa 100 kg N/ha im Spross (Abb. 50) sind die N-Verluste über den Winter teils erheblich und mindern damit die Düngewirkung für die Nachfrucht. Die hohen Verluste von Lupine, Sandhafer und Phacelia liegen in der besonders starken Frostschädigung begründet. Die geringen Verluste der winterharten Arten sowie Ölrettich liegen daran, dass die winterharten Arten nicht vom Frost zerstört werden und Ölrettich nur im ersten Jahr richtig abgefroren ist. Somit hat der im zweiten Jahr nicht abgefrorene Ölrettich über den Winter weiter N aufgenommen, was erklärt, dass die N-Menge im Spross in den Ölrettich-Mischungen sogar höher als vor Winter war.

Die hohen C/N-Verhältnisse der nicht winterharten Arten liegen daran, dass diese im Herbst ins Streckungswachstum gehen und der Stängel verholzt. Die Zunahme der C/N-Verhältnisse über den Winter für leicht abfrierende Arten wie Phacelia, Sandhafer und Lupine ist dadurch bedingt, dass sie durch die Frostschädigung die Blätter verlieren und nur die Stängel übrigbleiben (Stumm et al., 2023). So nimmt bei den abfrierenden Arten über Winter der Stängelanteil am Spross zu, bei den winterharten Arten bleibt der Blattanteil am Spross hoch (Stumm et al., 2023).

Die deutlich geringeren N-Aufnahmen in der Wurzel und damit das geringe Verhältnis zum Spross zeigten, dass die Wurzelmasse für die Düngewirkung auf die Nachfrucht eher unbedeutend ist. Die Unterschiede in der Abbaubarkeit (C/N-Verhältnis, Lignin-Gehalt) könnten verschiedene Umsatzgeschwindigkeiten der Wurzelmassen erklären, allerdings sind die N-Mengen in der Wurzel eben nur gering. Somit sind vermutlich auch weniger die rasche Abbaubarkeit der Wurzelrückstände als die simulierten geringeren N-Auswaschungen über Winter ursächlich für die gemessenen hohen Boden- N_{min} -Werte in der folgenden Vegetationsperiode und die hohen Kornerträge der Nachfrucht Sommerweizen nach Inkarnatklée.

Die schnelle Abnahme der Gehalte an mineralischem Bodenstickstoff (Abb. 51) im Herbst unter den Zwischenfrüchten und die deutlich höheren Werte für die Kontrolle verdeutlichen die hohen N-Verluste durch Auswaschung unter der Schwarzbrache und die Bedeutung der Zwischenfrüchte für den Wasserschutz. Die hohen N_{min} -Gehalte nach Inkarnatklée liegen darin begründet, dass Inkarnatklée eine Leguminose mit geringem C/N-Verhältnis und geringem Lignin-Gehalt ist, sowie durch das Überwintern geringere Verluste im Vergleich zur Lupine hat. Die geringen N_{min} -Gehalte im Winter und Frühjahr sowie die hohen Werte im Mai nach Winterrübsen zeigen, dass Winterrübsen durch das Überwintern den Boden bis ins Frühjahr weiter entleert.

Die höchsten Weizenerträge nach den legumen Zwischenfrüchten (Abb. 52) waren aufgrund der Stickstoffdynamik erwartbar, wohingegen die geringsten Kornerträge nach Grünroggen und

Grünroggen-dominierten Mischungen vermutlich nicht aufgrund der Stickstoffdynamik zu erklären sind. Hingegen liegen diese eher im schlechten Saatbett nach Grünroggen und einem entsprechend geringen Feldaufgang sowie einem insgesamt schlechten Bestand begründet. Der Boden trocknete unter Grünroggen sehr schlecht ab, wodurch das Saatbett nicht krümelig wurde. Die geringen Unterschiede in den Kornerträgen nach den Zwischenfrüchten und der Kontrolle liegen vermutlich an dem hohen N-Nachlieferungspotential des langjährig organisch gedüngten Standorts.

5.2.3 Wurzelartentrennung (Dr. Nicole Legner)

Die Bestimmung der Wurzelanteile mit Hilfe der Fourier-Transform-Infrarot Spektroskopie konnte bei den verschiedenen Gemengen der Zwischenfruchtversuche erfolgreich angewendet werden. Für alle Gemenge ließen sich zufriedenstellende bis sehr gute Modelle erstellen. Des Weiteren wurde die Bewertung der statistischen Werte der Modelle verändert und damit deutlich verbessert. Es konnten alle Gemengeproben erfolgreich ausgewertet werden. Diese Ergebnisse geben den prozentualen Anteil der Arten pro Tiefenschicht im Gemenge an und wurden an die Arbeitsgruppe INRES (AOL) der Universität Bonn zur weiteren Auswertung verschickt.

5.2.4 Eindringwiderstand und Bodenwassergehalt (Dr. Oliver Schmittmann)

Zwischenfruchtversuch im Jahr 2018/2019:

Die Aussage über die Tiefenwirkung der Varianten im Unterboden ist aufgrund der Standortgegebenheiten und geringen Messtiefe kaum möglich. Die Angaben für den Bereich zwischen 45 und 60 cm haben eher informativen Charakter. Die Standardabweichungen waren sehr hoch und der Stichprobenumfang in dieser Schicht unterschiedlich. Tiefwurzler, wie Ölrettich, zeigten im Bereich 15 – 45 cm erhöhte Eindringwiderstände. Ein Grund kann das Vorhandensein von Pfahlwurzeln sein. Gräser, wie Sandhafer und Grünroggen, sorgten für reduzierte Eindringwiderstände. Technische Probleme führten dazu, dass im Zwischenfruchtversuch im Jahr 2018/2019 keine Bodenfeuchten ermittelt werden konnten.

Zwischenfruchtversuch im Jahr 2019/2020:

Die Eindringwiderstände im Zwischenfruchtversuch im Jahr 2019/2020 waren im Vergleich zum Zwischenfruchtversuch im Jahr 2018/19 sehr gering und variierten innerhalb der Termine kaum. Die berechneten hohen Standardabweichungen zeigen, dass viele Unterschiede im Bereich der Streuung lagen und Aussagen nur schwierig abgeleitet werden können. Signifikante Unterschiede waren im gesamten Versuch nicht vorhanden. In der Zeit zwischen erster und zweiter Bonitur hatten sich die Eindringwiderstände im Bereich von 15 – 60 cm erhöht. Dieses kann an Niederschlagsereignissen oder am Wurzelwachstum der Kultur liegen. Witterungsverlauf und Bodenzustand scheinen für die Bewirtschaftung günstig gewesen zu sein. Größere Änderungen hinsichtlich Wassergehalte oder Dichtlagerungen konnten nicht festgestellt werden, so dass die angebauten Zwischenfrüchte keine meliorative Wirkung bei diesen Untersuchungsmethoden zeigen konnten.

5.2.5 Bodenphysik (Dr. Marc-Oliver Göbel und Prof. Dr. Stephan Peth)

Die nach der Zwischenfruchtperiode entnommenen Bodenproben zeigen konsistent erhöhte Lagerungsdichten in 40 cm Tiefe, was, vergleichbar mit dem Standort Oberfeld, auf eine Pflugsohle hindeutet. Insgesamt ist die LK in 15 cm Tiefe als mittel bis hoch, in 40 cm Tiefe als gering bis mittel und in 60 cm Tiefe als mittel einzustufen (Ad-hoc-AG Boden, 2005). Der verdichtete Bereich in 40 cm Tiefe weist LK auf, die teilweise deutlich unterhalb einer subkritischen Grenze von ca. 10 Vol-% liegen, bei der die Belüftung des Bodens als eingeschränkt angesehen werden kann (Lebert et al., 2004). In dieser verdichteten Schicht führen alle Zwischenfruchtvarianten zu einer tendenziellen Erhöhung der LK im Vergleich zur Kontrolle (Abb. 101), was sich vermutlich auf eine stärkere Durchwurzelungsaktivität zurückführen lässt. Die nFK lässt sich insgesamt als gering einstufen (Ad-hoc-AG Boden, 2005). Insbesondere in 40 cm Tiefe zeigt sich für die meisten Anbauvarianten eine wechselseitige (inverse) Veränderung von LK und nFK im Vergleich zur Kontrolle. Dieser Sachverhalt lässt sich über die Porengrößenumverteilung erklären, da eine Reduktion von Grobporen, z.B. durch Verdichtung (auch im Bereich der Rhizosphäre), zu einem erhöhten Anteil an wasserhaltenden Mittelporen führt. Darüber hinaus ist in dieser Tiefe zu erkennen, dass die Erhöhung der LK mit einer Erhöhung der gesättigten Wasserleitfähigkeit einhergeht. Die wechselseitige Veränderung von LK und nFK zeigt sich insbesondere beim Anbau von Winterrüben für alle untersuchten Tiefen. Eine Ausnahme bildet der Anbau von RigolTR in 15 cm Tiefe. Hier zeigt sich, verbunden mit einer verringerten Lagerungsdichte, eine tendenzielle Erhöhung der LK und der nFK im Vergleich zur Kontrolle. Darüber hinaus führt der Anbau von RigolTR in 15 cm zu einer Erhöhung der gesättigten Wasserleitfähigkeit, so dass die Effekte des RigolTR-Anbaus in Bezug auf die oberste Tiefe als durchaus positiv bewertet werden können. In den unteren Tiefen führt der Anbau von RigolTR zwar tendenziell zu einer Verringerung der Lagerungsdichte und Erhöhung der LK im Vergleich zur Kontrolle, jedoch geht dies zu Lasten der nFK. Somit zeigt die auf intensive Durchwurzelung des Unterbodens optimierte Saatgutmischung RigolTR tendenziell einen positiven Effekt im Oberboden, aber einen negativen Effekt im Unterboden. Mit wenigen Ausnahmen führen die Anbauvarianten in allen Tiefen zu einer tendenziellen Erhöhung der gesättigten Wasserleitfähigkeit. Dies kann mit einer intensiven Durchwurzelung erklärt werden, wodurch konnektive Porenkanäle entstehen. Mit Ausnahme der Kontrollvariante in 15 cm Tiefe, die teilweise geringe Wasserleitfähigkeiten aufweist, ist die gesättigte Wasserleitfähigkeit insgesamt als mittel bis sehr hoch einzustufen (Ad-hoc-AG Boden, 2005). Signifikante Unterschiede zwischen den Zwischenfruchtvarianten lassen sich nicht erkennen. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich unmittelbar nach der Zwischenfruchtperiode nur geringe und überwiegend nicht signifikante Tendenzen hinsichtlich einer Veränderung der bodenphysikalischen Eigenschaften feststellen lassen.

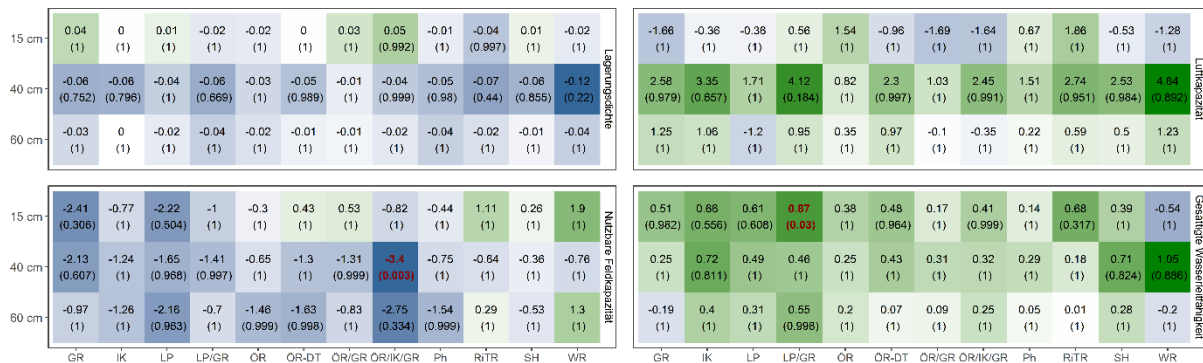


Abb. 101: Effektmatrix für den Vergleich verschiedener bodenphysikalischer Kenngrößen zwischen Anbauvariante und Kontrolle für die jeweilige Tiefe am Standort Wiesengut (nach der Zwischenfruchtperiode, März 2019). Dargestellt sind die Differenzen der Mittelwerte (Lagerungsdichte: g/cm³, Luftkapazität: Vol-%, nutzbare Feldkapazität: Vol-%, Wasserleitfähigkeit: log[cm/d]), mit den für die Mehrfachvergleiche adjustierten p-Werten (Tukey HSD Test; log-transformiert für gesättigte Wasserleitfähigkeit) in Klammern. Grün eingefärbte Zellen weisen auf eine Erhöhung, blau eingefärbte Zellen auf eine Verringerung des Parameterwertes als Folge des Zwischenfruchtanbaus hin. Die Farbintensität korrespondiert mit der Effektstärke. Zahlenwerte in rot weisen auf einen signifikanten Effekt ($p < 0,05$) hin.

Vergleichbar mit den nach der Zwischenfruchtperiode entnommenen Proben, zeigen auch die nach der Weizenernte entnommenen Proben eine Verdichtung in 40 cm, die jedoch noch ausgeprägter ist und wiederum mit geringeren LK einhergeht. Insgesamt ist die LK in allen Tiefen etwas höher als unmittelbar nach der Zwischenfruchtperiode und lässt sich in 40 cm Tiefe als mittel und in den anderen Tiefen als mittel bis hoch einstufen (Ad-hoc-AG Boden, 2005). Sowohl für die nach der Zwischenfruchtperiode als auch für die nach der Weizenernte entnommenen Bodenproben existiert somit ein starker inverser Zusammenhang zwischen der Lagerungsdichte und der LK ($R^2 = 0,765$ bzw. $R^2 = 0,617$; jeweils $P < 0,001$). Allerdings besteht nur ein schwacher Zusammenhang zwischen der Lagerungsdichte und der nFK (2019: $R^2 = 0,08$ bzw. 2020: $R^2 = 0,06$; jeweils $P < 0,001$). Die Verringerung der Lagerungsdichte bzw. Vergrößerung des Gesamtporenvolumens ist demnach vor allem auf die Zunahme des Anteils luftführender Grobporen ($> 50 \mu\text{m}$) und weniger auf die Zunahme des Mittelporenanteils ($0,2\text{--}50 \mu\text{m}$) zurückzuführen. Anders als im Jahr 2019, wo die Zwischenfrüchte den gewonnenen Porenanteil der LK in der Regel zu Lasten der nFK generiert haben (in 40 cm Tiefe), gibt es bei den im Jahr 2020 entnommenen Proben jedoch auch Varianten (in 15 cm Tiefe), die sowohl zu einer Erhöhung der LK als auch zu einer Erhöhung der nFK beigetragen haben (Abb. 102). Insgesamt ist die nFK jedoch noch immer als gering einzustufen (Ad-hoc-AG Boden, 2005). Auch die gesättigte Wasserleitfähigkeit ist unverändert als mittel bis sehr hoch einzustufen (Ad-hoc-AG Boden, 2005).

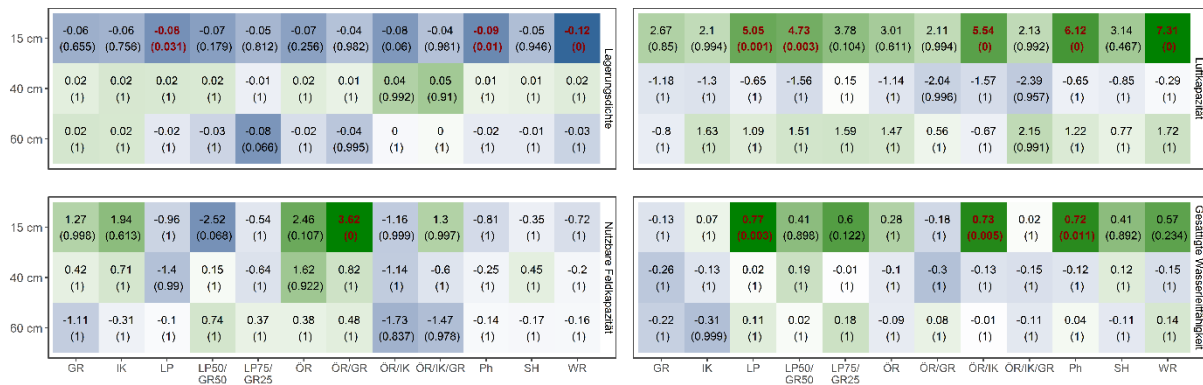


Abb. 102: Effektmatrix für den Vergleich verschiedener bodenphysikalischer Kenngrößen zwischen Anbauvariante und Kontrolle für die jeweilige Tiefe am Standort Wiesengut (nach Ernte der Nachfrucht, August 2020). Dargestellt sind die Differenzen der Mittelwerte (Lagerungsdichte: g/cm^3 , Luftkapazität: Vol-%, nutzbare Feldkapazität: Vol-%, Wasserleitfähigkeit: $\log[\text{cm}/\text{d}]$), mit den für die Mehrfachvergleiche adjustierten p-Werten (Tukey HSD Test; log-transformiert für gesättigte Wasserleitfähigkeit) in Klammern. Grün eingefärbte Zellen weisen auf eine Erhöhung, blau eingefärbte Zellen auf eine Verringerung des Parameterwertes als Folge des Zwischenfruchtanbaus hin. Die Farbintensität korrespondiert mit der Effektstärke. Zahlenwerte in rot weisen auf einen signifikanten Effekt ($p < 0,05$) hin.

Beim Vergleich der Ergebnisse des Zwischenfruchtversuchs fällt auf, dass es direkt nach der Zwischenfruchtperiode (2019), wenn auch nicht signifikant, zu einer Verringerung der LK und nFK in 15 cm Tiefe gekommen ist, wohingegen es nach der Weizenernte (2020) generell zu einer (teilweise auch signifikanten) Erhöhung der LK und nFK gekommen ist (teilweise auch in Kombination mit einer signifikant erhöhten gesättigten Wasserleitfähigkeit). In 40 cm Tiefe zeigt sich bei der LK ein umgekehrter Effekt: hier kommt es nach der Zwischenfruchtperiode tendenziell zu einer Erhöhung und nach der Weizenernte zu einer Verringerung der LK.

Eine mögliche Erklärung für die beobachteten Unterschiede zwischen den Jahren 2019 und 2020 könnte sein, dass der Effekt der durch den Zwischenfruchtanbau geschaffenen Bioporen unmittelbar nach der Zwischenfruchtperiode noch gering ist, weil die Poren noch durch nicht abgebaute Wurzelbiomasse belegt sind. Es kann vermutet werden, dass nach Ernte der Nachfrucht, d.h. 15 Monate nach dem Umbrechen der Zwischenfrüchte, der Abbau von Wurzelbiomasse zu einer Erhöhung der Porosität und einer stärkeren Veränderung der LK und nFK beigetragen hat. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die im Jahre 2020 beobachteten Effekte nicht ausschließlich auf den Zwischenfruchtanbau zurückzuführen sind, sondern zum Teil auch durch den Anbau der Nachfrucht hervorgerufen wurden. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Zwischenfruchtanbau nach Ernte der Nachfrucht positivere Effekte zeigt als unmittelbar nach dem Ende der Zwischenfruchtperiode, allerdings nur in 15 cm Tiefe.

5.3 Arbeitspaket 3

5.3.1 Effekte der Futterpflanzen und Zwischenfrüchte auf Bioporengese, Vorruchtwirkung sowie Ertragsbildung und Durchwurzelung der Nachfrüchte (Roman Kemper)

Unterschiedliche Pfahlwurzelplanzen wurden auf einem verdichteten Vorgewende angebaut, um zu testen, ob diese durch Bildung großlumiger Bioporen die Durchwurzelung und Ertragsbildung der Nachfrüchte verbessern können. Dabei wurden Futterpflanzen mit zwei (Wegwarte, Wegwarte-Rohrschwengel-Mischung) und einem Nutzungsjahr (Wegwarte Spätsaat) sowie Zwischenfrüchte (Ölrettich, Tiefenrettich, Wegwarte als Zwischenfrucht) nach zwei Hauptfrüchten verglichen. Die Erhebung der Bioporendichte zeigte, insbesondere für Durchmesser < 5 mm, hohe Werte für die Versuchsfläche im Vorgewende und keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten bzw. im Vergleich zur Kontrolle ohne den Anbau einer Pfahlwurzelplanze (Abb. 74). Somit waren keine direkten Effekte des Anbaus von Pfahlwurzelplanzen auf die Bioporendichte zu erkennen.

Die Berechnung der Wurzelstücke als Maß für das Potential zur Bildung großlumiger Bioporen zeigte deutliche Unterscheide zwischen den Versuchsvarianten (Abb. 72, Abb. 73). Die höchsten Werte für die Durchmesserklassen 1-2 mm und 2-5 mm zeigten in allen Tiefen die Futterpflanzen, insbesondere Wegwarte und die Wegwarte-Rohrschwengel-Mischung. Die Futterpflanzen erreichten Werte von über 100 Wurzelstücken/m² für Durchmesser zwischen 1 und 2 mm sowie bis zu 5 Wurzelstücken/m² für Durchmesser zwischen 2 und 5 mm. Für > 5 mm Durchmesser wurden gar keine Werte gefunden. Somit ist das Bioporengesepotential im Vergleich zu anderen Studien mit Futterpflanzen (Perkons 2018) hier insgesamt eher gering. Dennoch ist das Bioporengesepotential von den Futterpflanzen deutlich höher als das der Zwischenfrüchte, die insbesondere in den tieferen Schichten (40-60 cm) eine geringere Anzahl an Wurzelstücken aufweisen als die Futterpflanzen.

Bei den Gehalten an mineralischem Bodenstickstoff nach Umbruch der Futterpflanzen zeigten sich unter der ersten Nachfrucht Sommerweizen in der Krume höhere Werte nach den Zwischenfrüchten und nach der Kontrolle als den Futterpflanzen (Abb. 75). Zwei möglich Gründe könnten für die höheren N_{\min} -Werte nach den Zwischenfrüchten denkbar sein. Die legume Vorrucht Winterackerbohne führt durch Stickstofffixierung zu höheren N_{\min} -Gehalten. Zusätzlich erzeugte die mehrfache Bodenbearbeitung zu den Hauptfrüchten und der Zwischenfrucht eine lockere Struktur im Oberboden mit einer schnelleren Mineralisation im Gegensatz zu dem dichtlagernden Oberboden in der Futterpflanzen-Varianten.

Diese Effekte könnten auch die Unterschiede im Weizenertrag (Abb. 68) und der N-Aufnahme im Spross (Abb. 69) erklären, welche nach der Kontrolle und den Zwischenfrüchten, insbesondere nach Ölrettich und Tiefenrettich, höher war als nach den Futterpflanzen. Auch die höheren Wurzellängendichten von Sommerweizen nach Zwischenfrüchten und Kontrolle im Oberboden zur Blüte (Abb. 76) könnten durch die lockerere Bodenstruktur bedingt sein.

Bei der zweiten Nachfrucht Winterroggen gab es keine signifikanten Ertragsunterschiede (Abb. 68). Dennoch zeigte sich, dass die Varianten mit geringerem Sommerweizenertrag beim Winterroggen tendenziell höhere Erträge erzielten. 2021 war im Vergleich zu 2022 eher feucht, daher war der Sommerweizen, der von der lockeren Bodenstruktur und der Stickstofffixierung durch die Winterackerbohne profitierte, nicht auf eine Durchwurzelung der tieferen Bodenschichten angewiesen. Der Winterroggen im trockenen Jahr war das hingegen schon und profitierte möglicherweise von Bioporen im Unterboden und erreichte somit den höchsten Ertrag nach der zweijährig angebauten Wegwarte.

Die höchsten Wurzellängendichten des Sommerweizens zur Blüte in der untersten Bodenschicht nach der Kontrolle (Abb. 76) könnten auch ein Hinweis darauf sein, dass hier Poren noch mit Wurzeln der Vorfrucht belegt waren, der Winterroggen im darauffolgenden Jahr diese hingegen aber schon nutzen konnte. Die insgesamt sehr hohen Anteile der Wurzellänge in den Bioporen bei beiden Nachfrüchten (Abb. 77) zeigten die hohe Bedeutung von Bioporen für die Durchwurzelung, insbesondere für Böden mit hohen Lagerungsdichten bzw. hohen Eindringwiderständen. Die teils höheren Werte des Sommerweizens sprechen dafür, dass der Sommerweizen, wahrscheinlich aufgrund seiner kürzeren Wachstumszeit, noch stärker auf die Bioporen angewiesen war als der Winterroggen, um tiefere Bodenschichten zu erreichen.

Insgesamt zeigte sich, dass pfahlwurzelnde Futterpflanzen ein Potential zur Bildung großlumiger Bioporen in einem verdichteten Vorgewende haben, wenn auch auf einem geringen Niveau. Das Potential von pfahlwurzelnden Zwischenfrüchten ist aber noch wesentlich geringer. Dennoch konnte in zwei Nachfrüchten noch kein Ertragsvorteil nach den Futterpflanzen erzeugt werden. Ein längerer Beobachtungszeitraum würde Aussagen über kumulierte Ertragsunterschiede über die Fruchtfolge liefern. Dieser war aber aufgrund der begrenzten Projektlaufzeit und auch aufgrund der destruktiven Beprobung der begrenzten Verdichtungsfläche nicht realisierbar. Problematisch ist außerdem, dass die Kontrolle in Bezug auf die Futterpflanzenvarianten nicht aussagekräftig war, da sie ebenso von der Ackerbohnenvorfrucht und der häufigeren Bodenlockerung profitierte wie die Zwischenfruchtvarianten. Für Folgeuntersuchungen sollten einheitlich nicht legume Vorfrüchte gewählt werden.

In einem ähnlichen Versuch von Kautz et al. (2010), indem Luzerne und Rotklee gras mit einer cash crop Fruchtfolge verglichen wurden, wurden ein höherer Ertrag der Nachfrucht Sommerweizen, signifikant höhere Bioporendichte und eine höhere Regenwurm-Abundanz festgestellt. Allerdings waren auch hier die Unterschiede der Wurzellängendichten der Nachfrucht Sommerweizen gering. Ein großer Unterschied zwischen dem hier beschriebenen Versuch und denen von Kautz et al. (2010) war die Anbaudauer. Die stärkeren Effekte in der Studie von Kautz et al. (2010) liegen möglicherweise darin begründet, dass die Futterpflanzen dort über vier Jahre angebaut wurden.

5.3.2 Eindringwiderstand und Bodenwassergehalt (Dr. Oliver Schmittmann)

Die Eindringwiderstände waren im Vorgewende-Versuch unterhalb einer Tiefe von 45 cm am höchsten. Es konnte gezeigt werden, dass durch eine Bewirtschaftung mit Tief- und/oder Flachwurzeln tendenziell die Eindringwiderstände reduziert werden können. Bei der Staturerhebung waren die Eindringwiderstände bei der Wegwarte in allen Zonen am geringsten. Da sich alle anderen Varianten nicht signifikant unterschieden, deutet dieses auf heterogene Bedingungen des Standortes in diesen Bereichen hin.

5.3.3 Bodenphysik (Dr. Marc-Oliver Göbel und Prof. Dr. Stephan Peth)

Vergleichbar mit den anderen Untersuchungsflächen auf dem Standort Wiesengut, zeigt sich auch im Bereich des Vorgewendes eine verdichtete Schicht in 40 cm Tiefe, die hier jedoch mit Lagerungsdichten von teilweise $> 1.7 \text{ g/cm}^3$ deutlich ausgeprägter ist. Die Anbauvarianten zeigen generell keine signifikanten Effekte auf die untersuchten bodenphysikalischen Parameter im Bereich des Vorgewendes (Abb. 103). Einige Tendenzen sind jedoch zu erkennen. So zeigt insbesondere die Kombination von Wegwarte als tiefwurzelnender Pflanze mit dem eher flachwurzelnenden Rohrschwengel Potential, den Oberboden aufzulockern. Dass im Unterboden der Anbau von Wegwarte in Reinsaat günstigere Effekte zeigt, lässt sich möglicherweise auf ein verringertes Wachstum der Wegwarte und eine damit verbundene geringere Durchwurzelung aufgrund des konkurrierenden Wachstums in Kombination mit dem Rohrschwengel erklären. Die auflockernden Effekte der Wegwarte in Bezug auf die Lagerungsdichte in 40 cm und des kombinierten Anbaus von Wegwarte und Rohrschwengel in 15 cm Tiefe gehen einher mit einer Steigerung der LK, die generell als gering und insbesondere in 40 cm Tiefe mit teilweise $< 2 \text{ Vol-\%}$ als sehr gering einzustufen ist (Ad-hoc-AG Boden, 2005). In dieser stark verdichteten Schicht kann nur noch von einer äußerst eingeschränkten Belüftung des Bodens ausgegangen werden. Auch wenn der Effekt des Anbaus von Wegwarte aufgrund einer relativ großen Streuung der Einzelwerte statistisch nicht signifikant ist, so kann bereits eine geringfügige Erhöhung der LK, die sich auf einem derart niedrigen Niveau befindet, durchaus relevant sein. Dagegen erweist sich in Bezug auf die nFK der Anbau von Wegwarte als Spätsaat als die am besten geeignete Variante, die in 15 und 40 cm Tiefe zu einer tendenziellen Erhöhung der nFK beigetragen hat. Insgesamt ist die nFK jedoch als gering einzustufen (Ad-hoc-AG Boden, 2005). Korrespondierend mit der im Bereich des Vorgewendes insgesamt stärkeren Verdichtung des Bodens im Vergleich mit den anderen Untersuchungsflächen auf dem Wiesengut, ist die gesättigte Wasserleitfähigkeit teilweise deutlich geringer. Insgesamt weist sie für alle Tiefen und Anbauvarianten eine sehr große Spannweite auf und lässt sich als gering bis sehr hoch einstufen (Ad-hoc-AG Boden, 2005).

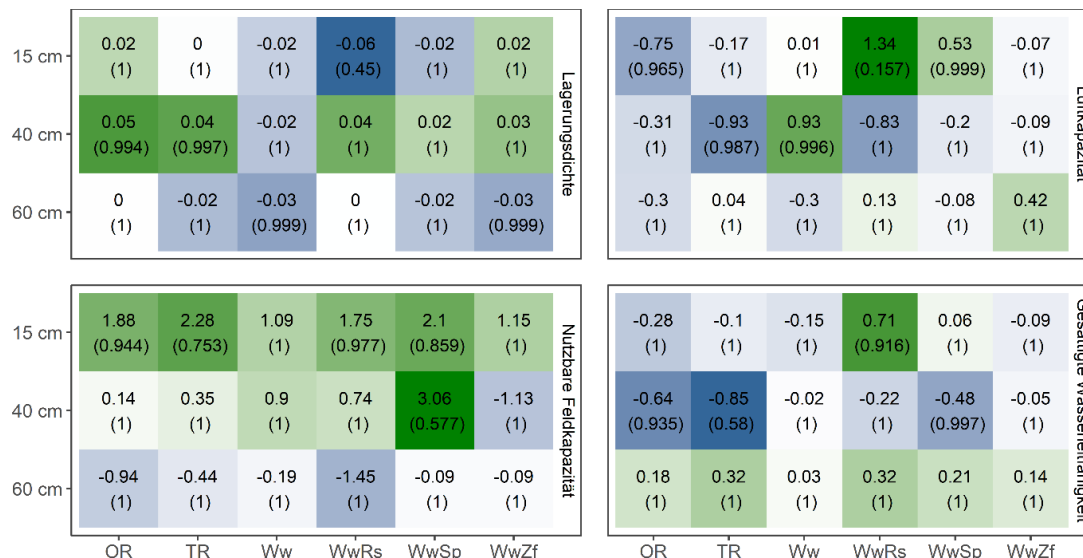


Abb. 103: Effektmatrix für den Vergleich verschiedener bodenphysikalischer Kenngrößen zwischen Anbauvariante und Kontrolle für die jeweilige Tiefe am Standort Wiesengut (Vorgewende). Dargestellt sind die Differenzen der Mittelwerte (Lagerungsdichte: g/cm^3 , Luftkapazität: Vol-%, nutzbare Feldkapazität: Vol-%, Wasserleitfähigkeit: $\log[\text{cm/d}]$), mit den für die Mehrfachvergleiche adjustierten p-Werten (Tukey HSD Test; log-transformiert für gesättigte Wasserleitfähigkeit) in Klammern. Grün eingefärbte Zellen weisen auf eine Erhöhung, blau eingefärbte Zellen auf eine Verringerung des Parameterwertes als Folge des Pflanzenanbaus hin. Die Farbintensität korrespondiert mit der Effektstärke.

Der Anbau tiefwurzelnder Zwischenfrüchte wie Öl- oder Tiefenrettich erscheint hingegen weniger effektiv, die bodenphysikalischen Eigenschaften im Unterboden (40 und 60 cm) nennenswert zu verbessern. Hier zeigt sich ein positiver Einfluss auf die nFK allenfalls im Oberboden. Allerdings muss noch einmal darauf hingewiesen werden, dass die beschriebenen Effekte nur in der Tendenz erkennbar sind und keine statistische Signifikanz erreichen. Möglicherweise war die realisierte Anbaudauer nicht ausreichend, um statistisch signifikante Effekte zu erzielen, so dass diesbezüglich längerfristige Untersuchungen wünschenswert wären. Auch möglicherweise noch nicht abgebaute Wurzelbiomasse in den Bioporen könnte eine Erklärung dafür sein, dass die Struktureffekte sich noch nicht in Änderungen der bodenphysikalischen Eigenschaften niederschlagen. Auch diesbezüglich wäre eine längerfristige Untersuchung angezeigt.

5.4 Arbeitspaket 4

5.4.1 Modellierung von Spross- und Wurzelwachstum sowie Ertragsbildung und Ertrag mit SIMPLACE (Sofia Hadir und Dr. Sabine Seidel)

Die Simulation der Erträge und N-Aufnahmen sowie der Dynamiken des Bodenstickstoffs einschließlich gasförmiger Verluste durch Denitrifizierung und N- Auswaschung erlaubt eine Quantifizierung der N-Verluste. Durch die Verwendung eines Modells können die verschiedenen Zwischenfrüchte sowie die Brache hinsichtlich dieser nur schwer bzw. aufwendig zu messenden Variablen miteinander verglichen werden. Die Simulationsergebnisse am Beispiel der Zwischenfrüchte Ölrettich, Inkarnatklée, Blaue Lupine und der Kontrolle (Brache) zeigen, dass der Zwischenfruchtanbau im Vergleich zur Brache zu einer Reduktion der N-Verluste an dem Standort führt.

Im Mittel über beide Jahre sind die simulierten N-Auswaschung und gasförmige N_2O -N Verluste in der Brache um 24% höher als nach den Zwischenfrüchten Ölrettich und Blaue Lupine und 37% höher als nach Inkarnatklée. Die geringen N-Auswaschungsverluste nach Inkarnatklée erklären die höhere Sprossbiomasse und teils höhere N-Aufnahme des Sommerweizens.

Aufgrund vereinfachter Annahmen bilden Modelle nie das gesamte Agrarökosystem ab, dennoch bieten sie die Möglichkeit verschiedene Managementvarianten hinsichtlich ihres Ertragspotentials und möglicher negativer Ökosystemdienstleistungen zu vergleichen.

5.4.2 Modellierung des Bodenwasserhaushalts mit HYDRUS-1D (Dr. Marc-Oliver Göbel und Prof. Dr. Stephan Peth)

Die Simulationsergebnisse zeigen für alle Versuchsflächen und für unterschiedliche Simulationsperioden übereinstimmend und konsistent, dass die verschiedenen Anbauvarianten zu einer spezifischen Verringerung der Sickerwasserraten und Wassergehalte sowie zu einem korrespondierenden Abfall des Matrixpotentials im Vergleich zur Kontrolle führen. Dabei ist feststellbar, dass die Unterschiede zwischen den Varianten im Oberboden am geringsten sind und tendenziell mit der Tiefe zunehmen. Die Simulationsergebnisse korrespondieren weitgehend mit dem typischen Wurzelverhalten der Pflanzen. So zeigen beispielsweise tiefwurzelnde Arten wie Ölrettich und Lupine einen stärkeren Einfluss auf den Verlauf der Matrixpotentiale und Wassergehalte im Unterboden als der flachwurzelnde Grünroggen. Erwartungsgemäß zeigen sich diese für die jeweilige Pflanzenart charakteristischen tiefenspezifischen Effekte insbesondere bei den Simulationen mit konstanten hydraulischen Eigenschaften und verstärken sich bei Annahme eines höheren Blattflächenindex und einer höheren Bestandeshöhe. Dies zeigt, wie sensitiv die simulierten Wasserhaushaltsgrößen reagieren und verdeutlicht, dass die Kenntnis von Blattflächenindex und Bestandeshöhe als Eingangsparameter für die Modellierung sehr wichtig ist, um eine realistische Einschätzung des unmittelbaren Pflanzeneffektes durch die Wasserentnahme zu erhalten. Der unmittelbare Einfluss der Pflanzen auf den Bodenwasserhaushalt lässt sich damit bei Kenntnis von Wurzellängenverteilung, Blattflächenindex und Bestandeshöhe gut nachvollziehen. Der darüber hinausgehende Pflanzeneinfluss, der durch die Veränderung der hydraulischen Eigenschaften verursacht wird, lässt sich dagegen nicht eindeutig identifizieren, da davon ausgegangen werden muss, dass die hydraulischen Eigenschaften bereits vor den Anbauversuchen ein gewisses Maß an Variabilität durch die vorgeprägte Bodenstruktur zeigten. Um diesen Effekt eindeutig zu quantifizieren, müssten Modellversuche mit initial einheitlichen Bodenverhältnissen durchgeführt werden. Die bei der Simulation unter Ausschluss

der Pflanzeneffekte durch Wasserentnahme deutlich höheren Wassergehalte der Anbauvarianten im Vergleich zur Kontrolle (insb. für den Vorgewenderversuch und nach dem Ende der Zwischenfruchtperiode), deuten jedoch auf eine generelle durch den Pflanzenanbau verursachte Veränderung des Bodenwasserhaushalts hin.

5.4.3 Modellierung der Humusbildung mit HUMOD (Dr. Christopher Brock)

Insgesamt liegen nicht viele Arbeiten zum Aufbau organischer Bodensubstanz durch Futterleguminosen und Zwischenfrüchte vor. Der Grund dafür liegt in der Tatsache, dass Effekte von Bewirtschaftungsmaßnahmen auf Mengenänderungen der organischen Bodensubstanz nur in Langzeitversuchen zuverlässig ermittelt werden können. Zwar sind entsprechende Messungen grundsätzlich auch in Kurzzeit-Feldversuchen möglich, erfordern hier jedoch einen besonders hohen Aufwand (Knebl et al. 2015).

Die bis 2015 vorliegenden Arbeiten zum Aufbau organischer Bodensubstanz durch Zwischenfrüchte wurden von Poeplau und Don (2015) im Rahmen einer Meta-Analyse ausgewertet. Die Autoren kommen zu einer mittleren C-Anreicherung durch Zwischenfrüchte von $320 \pm 80 \text{ kg C ha}^{-1}\text{a}^{-1}$. Leguminosen und Nicht-Leguminosen unterschieden sich dabei nicht. Allerdings werden keine Angaben zur Düngung gemacht. Eine Düngung nicht-legumer Zwischenfrüchte würde auch in der HUMOD-Modellierung zu höheren C-Bilanzen führen, da der zusätzliche N-Input die Aufnahme von C in die mikrobielle Biomasse -rechnerisch- erhöht. In unserer Studie kommen wir bei den Zwischenfrüchten auf eine mittlere C-Bilanz von $245,3 \text{ kg C ha}^{-1}$ und bewegen uns damit im unteren Bereich der Spannweite des Mittelwertes nach Poeplau und Don (2015).

Zum Aufbau organischer Bodensubstanz durch Futterleguminosen liegen erstaunlicherweise bislang keine Meta-Studien vor. Zwar wird die große Bedeutung von Leguminosen für die Bodenfruchtbarkeit immer wieder betont wird (z.B. Meena und Lal, 2018). In vorhandenen Meta-Studien wird jedoch nicht zwischen Futterleguminosen und Körnerleguminosen differenziert (z.B. Francaviglia et al. 2019), oder es werden keine absoluten quantitativen Angaben gemacht (Li et al. 2024). Hier wäre eine neue Auswertung der Datenbasis/Literatur sehr wünschenswert. In Einzelstudien aus Langzeit-Feldversuchen werden sehr unterschiedliche C-Akkumulationsraten berichtet. So nahmen die C-Vorräte in Rothamstead in Fruchtfolgen mit Klee gras im Mittel nur um $110 \text{ bis } 280 \text{ kg C ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ zu, wobei es sich hier um Mittelwerte für Auswertungszeiträume von >30 Jahren handelt. Jensen et al. (2022) geben im Mittel $250 \text{ kg C ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ über 20 Jahre an, bemerken dazu aber, dass die Anreicherungsraten in den ersten Jahren höher sind als in späteren und insgesamt einer abnehmenden Funktion folgen. Für Grünland-Ökosysteme haben Conant et al. (2017) eine Metastudie vorgelegt und kommen darin auf eine Akkumulationsleistung durch das Einsäen von Leguminosen in Höhe von $660 \text{ kg C ha}^{-1}\text{a}^{-1}$. Die Beobachtungszeiträume sind dabei in den einbezogenen Studien allerdings unterschiedlich lang. Insgesamt liegen so keine Vergleichswerte vor, die eine Einordnung unserer Ergebnisse erlauben.

Der Berechnungsansatz des HUMOD unterscheidet sich von den meisten anderen Modellen zur Dynamik der organischen Bodensubstanz (z.B. Roth C) in der Berücksichtigung der N-Bilanz im System Boden-Pflanze. Obwohl deren Bedeutung für die C-Dynamik im Boden mehrfach beschrieben wurde (Schimel und Weintraub 2003, Jensen et al. 2012), wird die N-Dynamik von den meisten Modellen als Faktor ignoriert. Während aus diesem Umstand in nicht N-limitierten Systemen keine Probleme entstehen müssen, können unter N-limitierten Bedingungen (ökologischer Landbau, Low-Input-Systeme allgemein) dadurch Berechnungsfehler auftreten. Vor diesem Hintergrund erscheint es zu

kurz gegriffen, den Beitrag der Zwischenfrüchte und Futterleguminosen im Versuch auf den Biomasseinput zu beziehen. Vielmehr muss berücksichtigt werden, dass alle Kulturen N aus dem Boden aufnehmen. In Fällen, wo kein N-Input in das System erfolgt, können die Kulturen daher nur N im System halten und damit ggf. den Abbau organischer Substanz ausgleichen. Ein Aufbau neuer organischer Bodensubstanz ist jedoch aus stöchiometrischer Sicht nicht bzw. nur in begrenztem Umfang möglich, da sich das C:N-Verhältnis der organischen Bodensubstanz an einem Standort nur sehr langsam und in geringem Umfang ändert (Kirkby et al. 2014).

Die mit dem HUMOD ermittelten C-Bilanzen beruhen auf der Berechnung einer N-Bilanz im System Boden-Pflanze. Eine zutreffende Einschätzung der N-Pools und -Flüsse im System ist daher von großer Bedeutung und stellt zugleich die wichtigste mögliche Fehlerquelle dar. Die wesentlichen N-Input-Flüsse im Modell sind die N-Zufuhr mit der Düngung und, bei Leguminosen, der N-Eintrag über biologische Fixierung. Die biologische N-Fixierung stellt dabei eine variable Größe dar, deren Parametrisierung ohne vorliegende Messwerte mit einiger Unsicherheit behaftet ist. Bei den Output-Flüssen (N-Export mit dem Erntegut, N-Verluste) besteht die zentrale Herausforderung in der Abschätzung der N-Verluste aus dem System.

Bei der biologischen N-Fixierleistung weisen verschiedene Leguminosenarten zwar jeweils ein spezifisches Niveau auf, das allerdings eine erhebliche Variation zeigt (Anglade et al., 2015). Feinkörnige Leguminosen, wie Klee und Luzerne, weisen in der Regel das höchste Niveau bei der biologischen N-Fixierung auf, gefolgt von Erbsen und Ackerbohnen (Anglade et al. 2015, Knebl et al. 2022). Bei Lupinen sind die Werte besonders variabel, ebenso vermutlich bei Leguminosen in Zwischenfruchtnutzung, wie Wicken oder Platterbsen. Zu den letzteren liegt allerdings keine ausreichende Datenlage für eine Beurteilung vor. Innerhalb einer Art wird die biologische N-Fixierung vom Vorhandensein der Symbionten, der Nährstoffversorgung und den klimatischen Bedingungen beeinflusst. Da die biologische N-Fixierung im Versuch nicht gemessen wurde, mussten in der Modellierung Standardwerte verwendet werden. Der hierdurch möglicherweise entstandene Fehler kann mit den Daten aus dem Versuch leider nicht ermittelt werden.

Weiterhin ist eine fehlerhafte Einschätzung der N-Verluste aus dem System eine mögliche Quelle in der Modellierung. Das HUMOD verwendet zur Berechnung der Auswaschung die sehr einfache Formel von Burns (1976), da diese mit Angaben zu Niederschlag und Porenvolumen des Bodens nur wenige Angaben erfordert und damit unter Praxisbedingungen gut anwendbar ist. Zugleich lässt diese sehr vereinfachte Form der Auswaschungsberechnung natürlich nur eine grobe Schätzung der potentiellen N-Verluste zu. Im Versuch wurden die N_{\min} -Mengen in 0-90 cm Bodentiefe wiederholt gemessen, aber eine Erfassung der tatsächlichen Verluste aus dem System fand nicht statt. Hadir und Seidel berechneten Verluste in Höhe von 85 – 162 kg N ha⁻¹ für die Zwischenfrüchte am Standort Bonn (Tabelle 15). In der Humusbilanz-Modellierung wurden demgegenüber nur Verluste in Höhe von 11,3 kg N für den Standort Darmstadt (Mehrj. Futterpflanzen) und von 31,5 kg N für den Standort Bonn (Zwischenfrüchte) angenommen. Falls die Schätzungen von Hadir und Seidel zutreffen, wären die Humusbilanzen für die meisten der geprüften Fruchtarten negativ.

6 Angaben zum voraussichtlichen Nutzen und zur Verwertbarkeit der Ergebnisse

6.1 Spross, Wurzel und Bioporen

Es wurden umfassende Erhebungen von Wurzelmerkmalen, Spross- und Wurzelmasse, Nährstoffaufnahmen, Bioporennutzung und -genese der Zwischen- und Vorfrüchte sowie der Getreide-Nachfrüchte durchgeführt. Alle diese Ergebnisse, insbesondere zu den Wurzeln, sind für die landwirtschaftliche Praxis und Beratung extrem wertvoll und hilfreich, um auch die bisher noch nicht in großem Umfang untersuchten, mit dem voranschreitenden Klimawandel aber zunehmend wichtiger werdenden Auswirkungen von Zwischenfrüchten und Futterpflanzen auf die Bodenstruktur zu verstehen und auf dieser Basis das pflanzenbauliche Management von Futterpflanzen- sowie Zwischenfruchtbau und Fruchtfolgeplanung im ökologischen aber auch im konventionellen Landbau zu optimieren. Wie in Kapitel 10 deutlich wird, wurden diese Ergebnisse bereits sehr umfassend in die Praxis und Beratung hineingetragen.

6.2 Wurzelartentrennung

Die Artunterscheidung bei Wurzeln ist praxisrelevant, um das Verhalten einzelner Arten im Gemenge besser einschätzen und Gemenge daraufhin auch auf ihre unterirdischen Effekte hin optimieren zu können. Mit der Fourier-Transform-Infrarot Spektroskopie ist es möglich, in Gemengen die Wurzelanteile der Arten zu unterscheiden. Es ist bisher keine bessere und schnellere Methode vorhanden. Eine direkte Verwertung in der Praxis ist jedoch im Moment noch wenig erfolgversprechend, da für jedes Arten- und Sortengemisch eine Kalibrierung mit Reinsaaten durchgeführt werden muss. Diese ist zeitaufwendig und schwer zu automatisieren bzw. im Feld durchzuführen.

6.3 Eindringwiderstand und Bodenwassergehalt

Es hat sich gezeigt, dass die Interpretation der Eindringwiderstände hinsichtlich der Effekte der Durchwurzelung und Bodenlockerung schwierig ist. Messtechnisch können nicht nur Verdichtungen, sondern auch Wurzeln zu erhöhten Eindringwiderständen führen.

Eindringwiderstände und Bodenfeuchten sind prinzipiell hochrelevant für die Praxis, für aussagekräftige Ergebnisse wären aber deutlich häufigere Messungen nötig. Die Messungen mit dem am ILT entwickelten Unterbodenpenetrometer stehen für weitere Messungen bzw. Fragestellungen zur Verfügung.

6.4 Bodenphysik/ Bodenphysikalische Modellierung

Auf Basis mehrerer Feldwiederholungen und technischer Replikate wurde eine umfassende Analyse bodenphysikalischer Parameter und wichtiger Kenngrößen des Wasser- und Lufthaushalts durchgeführt, die eine solide Grundlage für statistisch aussagekräftige Ergebnisse darstellt. Die darauf aufbauende numerische Simulation ermöglichte es darüber hinaus, die durch den Pflanzenanbau

verursachten zeitlichen Veränderungen im Bodenwasserhaushalt zu analysieren. Für die landwirtschaftliche Praxis können die Ergebnisse somit wichtige Erkenntnisse über die Auswirkungen des Futter- und Zwischenfruchtanbaus auf die Bodenstruktur und den Bodenwasserhaushalt liefern.

6.5 Modellierung von Spross- und Wurzelwachstum sowie Ertragsbildung und Ertrag

Es wurden eine umfassende Datenanalyse und zeitgemäße Modellierungsansätze zur Bewertung des standortspezifischen Stickstoffhaushalts und der Quantifizierung von N-Verlustminderungspotentialen durch Zwischenfruchtanbau im Pflanzenbau angewendet. Die Ergebnisse können Beratern und Landwirten dienen, Aussagen zum Zwischenfruchtanbau im Pflanzenbau mit Zahlen zu hinterlegen und insbesondere Stickstoffverluste während der Sickerwasserperiode präziser abzuschätzen.

6.6 Modellierung der Humusbildung mit HUMOD

Es wurden neue Zahlen zur Bewertung von Zwischenfrüchten und Futterpflanzen in der Humusbilanzierung vorgelegt. Die wichtigste Erkenntnis ist dabei, dass der Aufbau organischer Bodensubstanz durch Zwischenfrüchte von der N-Verfügbarkeit abhängt. Nicht-Leguminosen können eine positive Wirkung auf die Humusbilanz durch die Rückhaltung von mobilem N im System erreichen, bauen aber an sich kaum neue organische Bodensubstanz auf. Legume Zwischenfrüchte und Futterpflanzen können demgegenüber aufgrund der biologischen N-Fixierung erhebliche Mengen an organischer Bodensubstanz aufbauen. Im Falle von Zwischenfrüchten kann der Aufbau organischer Bodensubstanz rechnerisch den Abbau organischer Bodensubstanz unter einer nicht-legumen Marktfrucht möglicherweise ausgleichen, wobei dies vom N-Entzug der Marktfrucht abhängig ist. Feldfutterbau mit über- oder mehrjährigen Leguminosenbeständen kann demgegenüber rechnerisch mehrere Anbaujahre nicht-legumer Marktfrüchte ausgleichen, sofern die Leguminosenbestände (auch Gemenge) eine ausreichende Biomassebildung und N-Fixierleistung aufweisen.

7 Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten zu den tatsächlich erreichten Zielen; Hinweise auf weiterführende Fragestellungen

7.1 Spross, Wurzel und Bioporen

Es konnten fast alle der ursprünglich geplanten Ziele umgesetzt werden. Ausnahmen bildeten die Profilwanderhebung der ersten Nachfrucht im AP1 und die Lignin-Analyse im AP2. Im AP1 in Darmstadt war für die erste Nachfrucht Sommerweizen die Profilwanderhebung nicht möglich, da die Vorfruchtwurzeln zu dem entsprechenden Zeitpunkt noch nicht stark genug verrottet waren. Ursprünglich war ein Herbstumbruch der Futterpflanzen geplant. Aus Gründen der Stickstoff-Konservierung wurde jedoch ein Frühjahrsumbruch durchgeführt. Durch den Umbruch kurz vor der Saat des Sommerweizens war die Zeit zur Verrottung der Wurzelrückstände der Vorfrüchte nicht lang genug, sodass an der Profilwand nicht sicher zwischen Vor- und Nachfruchtwurzeln unterschieden werden konnte. Im AP2 konnte aufgrund der sehr aufwändigen Analyse der Lignin-Gehalt nicht von allen, sondern nur von einer Auswahl an Proben ermittelt werden. Für das AP3 wäre eine Wiederholung des Versuchs mit einer Kontrolle ohne legume Vorfrucht sowie einem längeren Beobachtungszeitraum und weniger destruktiven Probennahmen zielführend.

7.2 Wurzelartentrennung

Die ursprünglich geplanten Ziele, die Artunterscheidung in den Gemengen des Futterpflanzenversuchs (AP1) und des Zwischenfruchtversuches (AP2) konnten erfolgreich und vollständig umgesetzt werden.

7.3 Eindringwiderstand und Bodenwassergehalt

Die Penetrometermessungen konnten auf allen Standorten erfolgreich durchgeführt werden. Auf dem Wiesengut waren aufgrund der Flachgründigkeit des Standortes, des Steinbesatzes und der Witterungen teilweise nur geringe Eindringtiefen möglich. Effekte im Unterboden konnten so nicht immer untersucht werden. Aus technischen Gründen konnten nicht alle Wasserdaten mit der notwendigen Präzision ermittelt werden und wurden aus diesen Gründen im Bericht nicht erwähnt.

7.4 Bodenphysik/ Bodenphysikalische Modellierung

Aufgrund eines Kompressorschadens konnte eine Reihe von Proben bei der Messung der Wasserretentionskurven nicht bei der höchsten Druckstufe (pF 4,2) entwässert werden. Aus diesem Grund konnten von den insgesamt 336 Proben, die auf dem Hofgut Oberfeld (Arbeitspaket 1) entnommen wurden, bislang nur 76 Proben vollständig analysiert werden. Von den insgesamt 336 Proben, die im Bereich des Vorgewendes auf dem Standort Wiesengut (Arbeitspaket 3) entnommen wurden, konnten bislang nur 243 Proben vollständig analysiert werden. Sobald der Kompressor wieder einsatzbereit ist, werden die fehlenden Proben analysiert und die Gesamtergebnisse im Rahmen eines Artikels veröffentlicht.

7.5 Modellierung von Spross- und Wurzelwachstum sowie Ertragsbildung und Ertrag

Die Modellierung von Spross- und Wurzelwachstum sowie Ertragsbildung und N Dynamiken mit SIMPLACE für AP2 sind abgeschlossen. Die Simulation von weiteren Standorten (AP1 oder Praxisbetriebe) zur Validierung ist aufgrund der reduzierten Arbeitszeit der Mitarbeiterin (Mutterschutz und Elternzeit) noch nicht abgeschlossen. Dies wird für Sommer 2024 angestrebt.

7.6 Modellierung der Humusbildung mit HUMOD

Die im Antrag formulierten Ziele wurden erreicht. Weiterführende Fragestellungen zur Bewertung von Zwischenfrüchten und Futterpflanzen in der Humusbilanzierung betreffen u.a. die biologische N-Fixierung bei Leguminosen und die Rückhaltung von mobilem N im System. Für eine robuste Einschätzung der biologischen N-Fixierleistung unter Praxisbedingungen sind einfach anwendbare Feldmethoden notwendig, die bislang noch nicht vorliegen. Eine robuste Schätzung der N-Fixierleistung wäre aber für die Humusbilanzierung von großer Bedeutung. Auch für die Aufnahme von mobilem N aus der Mineralisierung von organischer Substanz und Düngern müssen Schätzverfahren entwickelt werden, die die Wurzelarchitektur der Kulturen und damit die Fähigkeit der Aufnahme von N aus verschiedenen Bodenschichten berücksichtigen. Eine zutreffende Einschätzung der N-Rückhaltung im System und umgekehrt der N-Auswaschung wäre nicht nur für die Humusbilanzierung von großem Interesse.

Arbeitspaket 1: Mehrjähriger Feldfutterbau – Futterpflanzenkombinationen mit maximierter Durchwurzelung des Ober- und Unterbodens (Hofgut Oberfeld bei Darmstadt)

Die angebauten Futterpflanzen zeigten am Standort Oberfeld in den Jahren 2019 und 2020 insgesamt geringe Sprosserträge. Die höchsten Erträge wurden dabei von Luzerne und der Luzerne-Rohrschwengel-Mischung erreicht. Es wurden Wurzel-Spross-Verhältnisse von über 1 und damit hohe Wurzelmassen erreicht. Für die Trockenmassen der Futterpflanzenmischungen zeigten sich nur geringe Mischungseffekte und die Bedeutung des Identitätseffekts für die Futterpflanzenmischungen wurde deutlich. Eine intensive Durchwurzelung des Oberbodens wurde durch Gräser und Mischungen mit Gräsern erreicht, eine intensive Durchwurzelung des Unterbodens durch Luzerne. Aufgrund der sandigen Bodentextur wurde nur eine geringe Dichte großlumiger Bioporen im Unterboden an diesem Standort festgestellt. Das Potential zur Erhöhung der Bioporendichte war für Luzerne am höchsten. Auch die Erträge beider Nachfrüchte waren standortbedingt gering, die höchsten Erträge zeigten sich nach Luzerne und der Luzerne-Rohrschwengel-Mischung. Die bodenphysikalischen Untersuchungen zeigten keinen Effekt der Anbauvarianten auf die Lagerungsdichte. Hingegen zeigte sich eine Verringerung der Luftkapazität für Wegwarte im Oberboden und Luzerne im Unterboden sowie eine tendenzielle Erhöhung der Luftkapazität für Rohrschwengel im Oberboden.

Arbeitspaket 2: Zwischenfruchtoptionen zur pflanzenbaulichen Optimierung der Bodenstruktur (Wiesengut)

Das Wurzel-Screening mit der Profilwandmethode differenzierte unterschiedliche Wurzeltypen von Zwischenfrüchten. Dabei fiel eine intensive Durchwurzelung des Oberbodens von Grünroggen und Inkarnatklée sowie eine intensive Durchwurzelung des Unterbodens von Ölrettich, Winterrüben und Phacelia auf. Für die Spross- und Wurzel-trockenmassen der Zwischenfruchtmischungen zeigten sich keine bis geringe Mischungseffekte. Deutlich positive Mischungseffekte zeigten sich für die Wurzelmerkmale im Unterboden, insbesondere in Mischungen mit Ölrettich. Mit Hilfe der Fourier-Transform-Infrarot Spektroskopie konnte in allen Gemengen erfolgreich die Zusammensetzung der Wurzeln nach Arten durchgeführt werden. Dies trägt entscheidend zum Verständnis des Wurzelwachstums im Gemenge bei und komplementiert daher das Verständnis, wie sich Wurzeln im Gemenge im Vergleich zur Reinsaat verhalten. Dabei zeigte sich keine eindeutige Nischendifferenzierung der Wurzelmassendichte für die Gemengepartner im Vergleich zum Anbau in Reinsaat. Die Untersuchungen zeigten ein eher geringes Bioporengenesepotential für Zwischenfrüchte im Unterboden. Am höchsten ist dieses für die die Blaue Lupine zu bewerten.

Die abfrierenden Zwischenfruchtarten zeigten höhere Stickstoffaufnahmen im Spross vor dem Winter als die winterharten Arten. Über den Winter zeigten sich teilweise sehr hohe Verluste des Stickstoffs aus der Sprossmasse, diese waren bei den abfrierenden Arten höher als bei den winterharten Arten. Letztere zeigten zum Zeitpunkt der Einarbeitung geringe C/N-Verhältnisse der Sprossmasse als die abfrierenden Arten. Im Vergleich zum Spross war die Stickstoffaufnahme in der Wurzelbiomasse der Zwischenfrüchte gering. Die Schwarzbrache zeigte einen deutlichen Verlust an mineralischem Bodenstickstoff über den Winter, wohingegen alle Zwischenfrucht-Varianten mit Nicht-Leguminosen

geringe mineralische Bodenstickstoffgehalte über Winter und damit eine geringe Auswaschungsgefährdung zeigten. Insgesamt waren die Unterschiede in den Kornerträgen der Nachfrucht Sommerweizen eher gering, die höchste Erträge wurden nach den legumen Zwischenfrüchten erreicht.

Die bodenphysikalischen Untersuchungen zeigten für die Zwischenfrüchte im Vergleich zur Schwarzbrache keine Effekte auf die Lagerungsdichte, eine Erhöhung der Luftkapazität und der gesättigten Wasserleitfähigkeit sowie variable Effekte auf die nutzbare Feldkapazität. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Zwischenfrucht-Varianten waren hingegen gering. Auffällig war das die Zwischenfrüchte im Bereich der Pflugsohle mit generell hoher Lagerungsdichte und geringer Luftkapazität letztere im Vergleich zur Schwarzbrache erhöhten.

Arbeitspaket 3: Anbauoptionen zur Minderung von Bodenverdichtungen im Vorgewende (Wiesengut)

Es zeigten sich keine direkten signifikanten Effekte des Anbaus von Pfahlwurzelpflanzen in der Bioporendichte im verdichtenden Unterboden im Vergleich zur Kontrolle ohne Pfahlwurzel. Jedoch ist das Bioporengenesepotential, berechnet anhand von Wurzelstücken/m², für Futterpflanzen, insbesondere Wegwarte und die Wegwarte-Rohrschwengel-Mischung, deutlich höher als für Zwischenfrüchte. Dennoch konnte in den zwei Nachfrüchten Sommerweizen und Winterroggen noch kein signifikanter Ertragsvorteil nach den Futterpflanzen erzeugt werden. Ein längerer Beobachtungszeitraum würde Aussagen über kumulierte Ertragsunterschiede über die Fruchtfolge liefern. Die bodenphysikalischen Erhebungen zeigten eine hohe Lagerungsdichte in 40 cm Bodentiefe, jedoch keine signifikanten Effekte der verschiedenen Kulturen auf die bodenphysikalischen Parameter. Dennoch zeigten sich die Tendenzen, dass die Wegwarte-Rohrschwengel-Mischung den Oberboden sowie die Wegwarte den Unterboden auflockerte. Beide Effekte gingen mit einer Erhöhung der Luftkapazität einher. Die Zwischenfrüchte hingegen zeigten geringe Effekte auf die bodenphysikalischen Parameter.

Arbeitspaket 4: Modellierung der Effekte von Futterpflanzen und Zwischenfrüchten auf Wasserhaushaltskomponenten, Wasser- und Nährstoffaufnahme, Ertrag und Humus

Die Modellierung mit der Modellplattform SIMPLACE erlaubte eine Quantifizierung der Stickstoff-Verluste im Zwischenfruchtanbau. Die Modellierung des Bodenwasserhaushalts mit HYDRUS-1D zeigte, dass alle Anbauvarianten im Vergleich zur Kontrolle zu einer Verringerung der Sickerwasserraten und der Wassergehalte sowie zu einem Abfall des Matrixpotentials führten. Dabei waren die Unterschiede zwischen den Varianten im Oberboden gering und nahmen mit der Tiefe zu. Zudem korrespondierten die Simulationsergebnisse mit dem Wurzelverhalten der verschiedenen Kulturen. Die Modellierung mit HUMOD zeigte relevante positive Humusbilanzen nur für die Leguminosen bzw. die Mischungen mit Leguminosen. Der Humusaufbau durch Futterpflanzen war dabei deutlich höher als durch die Zwischenfrüchte.

9 Literaturverzeichnis

- Ad-hoc-AG Boden (2005). *Bodenkundliche Kartieranleitung*, 5. Auflage, Hannover.
- Anglade, J., Billen, G., Garnier, J. (2015): Relationships for estimating N₂ fixation in legumes: incidence for N balance of legume-based cropping systems in Europe. *Ecosphere* 6, 37, <http://dx.doi.org/10.1890/ES14-00353.1>.
- Athmann, M., Kautz, T., Banfield, C., Bauke, S., Hoang, D. T., Lüsebrink, M., Pausch, J., Amelung, W., Kuzyakov, Y., and Köpke, U. (2017). Six months of *L. terrestris* L. activity in root-formed biopores increases nutrient availability, microbial biomass and enzyme activity. *Applied Soil Ecology* 120, 135-142.
- Athmann, M., Kautz, T., Pude, R., and Köpke, U. (2013). Root growth in biopores—evaluation with in situ endoscopy. *Plant and Soil* 371, 179-190.
- Bengough, A. G., McKenzie, B. M., Hallett, P. D., and Valentine, T. A. (2011). Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of Experimental Botany* 62, 59-68.
- Benjamin, J., Mikha, M., Nielsen, D., Vigil, M., Calderon, F., and Henry, W. (2007). Cropping intensity effects on physical properties of a no-till silt loam. *Soil Science Society of America Journal* 71, 1160-1165.
- Berendonk, C. (2013): Erfolgreicher Luzerneanbau 2013. http://www.landwirtschaftskammer.de/riswick/pdf/erfolgreicher_luzerneanbau_2013.pdf
- Böhm, W., 1979. *Methods of Studying Root Systems*. Springer, Berlin.
- Bolinder, M. A., Angers, D. A., Bélanger, G., Michaud, R., & Laverdière, M. R. (2002). Root biomass and shoot to root ratios of perennial forage crops in eastern Canada. *Canadian journal of plant science*, 82(4), 731-737.
- Bonser, A. M., Lynch, J., and Snapp, S. (1996). Effect of phosphorus deficiency on growth angle of basal roots in *Phaseolus vulgaris*. *New Phytologist* 132, 281-288.
- Burns, I.G. (1976): Equations to predict the leaching of nitrate uniformly incorporated to a known depth or uniformly distributed throughout a soil profile. *The Journal of Agricultural Science* 86, 305-313, doi:10.1017/S0021859600054769.
- Burr-Hersey JE, Mooney SJ, Bengough AG, Mairhofer S, Ritz K (2017) Developmental morphology of cover crop species exhibit contrasting behaviour to changes in soil bulk density, revealed by X-ray computed tomography. *PloS one* 12:e0181872. doi:10.1371/journal.pone.0181872
- Conant, R.T., Cerri, C.E.P., Osborne, B.B., Paustian, K. (2017): Grassland management impacts on soil carbon stocks: a new synthesis. *Ecological Applications*, 27, 662–668.
- Cuttle, S. P. (2006): Development of the FBC model to estimate the nitrogen available from fertility-building crops in organic rotations. In: *Aspects of Applied Biology* 79, What will organic farming deliver? COR 2006, Association of Applied Biologists, edited by Atkinson, C., Ball, B., Davies, D. H. K., Rees, R., Russell, G., Stockdale, E. A., Watson, C. A., Walker, R., Younie, D.p. 259-262.
- Dexter, A. (2004). Soil physical quality: part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120, 201-214.
- Djodjic, F., Börling, K., and Bergström, L. (2004). Phosphorus Leaching in Relation to Soil Type and Soil Phosphorus Content. *Journal of Environmental Quality* 33, 678-684.
- Döring, T.F., Baddeley, J.A., Brown, R., Collins, R., Crowley, O., Cuttle, S., Howlett, S.A., Jones, H.E., McCalman, H., Measures, M., Pearce, B.D., Pearce, H., Roderick, S., Stobart, R., Storkey, J., Tilston, E.L., Topp, K., Watson, C., Winkler, L.R., and Wolfe, M.S. (2013): Using legume-based mixtures to enhance the nitrogen use efficiency and economic viability of cropping systems. Project Report for DEFRA RD-3447. 190 pp.
- Dresemann T, Athmann M, Heringer L, Kautz T (2018) Effects of Continuous Vertical Soil Pores on Root and Shoot Growth of Winter Wheat: A Microcosm Study. *Agricultural Sciences* 9: 750-764.

- Elhakeem A, Bastiaans L, Houben S, Couwenberg T, Makowski D, van der Werf W (2021) Do cover crop mixtures give higher and more stable yields than pure stands? *Field Crops Research* 270:108217. doi:10.1016/j.fcr.2021.108217
- Elzhov, T.V., Mullen, K.M., Spiess, A., Bolker, B. (2023). `_minpack.lm`: R interface to the Levenberg-Marquardt nonlinear least-squares algorithm found in MINPACK, plus support for bounds_ (version 1.2-4).
- Enders, Andreas; Vianna, Murilo; Gaiser, Thomas; Krauss, Gunther; Webber, Heidi; Srivastava, Amit Kumar; Seidel, Sabine Julia; Tewes, Andreas; Rezaei, Ehsan Eyshi; Ewert, Frank, SIMPLACE – A versatile modelling and simulation framework for sustainable crops and agroecosystems, in *silico Plants*, 2023, diad006.
- Feddes, R.A., Kowalik, P.J., Zaradny, H. (1978). Simulation of field water use and crop yield. Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen, 189 S.
- Finney DM, Kaye JP (2017) Functional diversity in cover crop polycultures increases multifunctionality of an agricultural system. *Journal of Applied Ecology* 54:509–517. doi:10.1111/1365-2664.12765
- Francaviglia, R., Álvaro-Fuentes, J., Di Bene, C., Gai, L., Regina, K., Turtola, E. (2019): Diversified Arable Cropping Systems and Management Schemes in Selected European Regions Have Positive Effects on Soil Organic Carbon Content. *Agriculture* 9, 261, <https://doi.org/10.3390/agriculture9120261>
- Freund L, Mariotte P, Santonja M, Buttler A, Jeangros B (2020) Species identity, rather than species mixtures, drives cover crop effects on nutrient partitioning in unfertilized agricultural soil. *Plant and Soil*. doi:10.1007/s11104-020-04782-z
- Gaiser, T., Perkons, U., Küpper, P. M., Kautz, T., Uteau-Puschmann, D., Ewert, F., Enders, A., and Krauss, G. (2013). Modeling biopore effects on root growth and biomass production on soils with pronounced sub-soil clay accumulation. *Ecological Modelling* 256, 6-15.
- Graves, S., Piepho, H.P., Selzer, L., Dorai-Raj, S. (2019). `multcompView`: Visualizations of paired comparisons (version 0.1-8).
- Han E, Smith AG, Kemper R, White R, Kirkegaard JA, Thorup-Kristensen K, Athmann M (2021) Digging roots is easier with AI. *Journal of experimental botany* 72:4680–4690. doi:10.1093/jxb/erab174
- Han, E., Kautz, T., Perkons, U., Lüsebrink, M., Pude, R., and Köpke, U. (2015a). Quantification of soil biopore density after perennial fodder cropping. *Plant and Soil* 394, 73-85.
- Han, E., Kautz, T., Perkons, U., Uteau, D., Peth, S., Huang, N., Horn, R., and Köpke, U. (2015b). Root growth dynamics inside and outside of soil biopores as affected by crop sequence determined with the profile wall method. *Biology and Fertility of Soils* 51, 847-856.
- Hartge, K.H., Horn, R. (2009). *Die physikalische Untersuchung von Böden* (4. Auflage). Schweizerbart, Stuttgart, 178 S.
- Hume, D.E., Lyons, T.B., Hay, R.J.M (1995): Evaluation of Grasslands Puna' chicory (*Cichorium intybus* L.) in various grass mixtures under sheep grazing. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 38, 317-328.
- Jakobs, I.; Schmittmann, O.; Athmann, M.; Kautz, T.; Schulze Lammers, P. 2019: Cereal Response to Deep Tillage and Incorporated Organic Fertilizer. *Agronomy*, 9, 296.
- Jensen, E.S., Peoples, M.B., Boddey, R.M., Gresshoff, P.M., Hauggaard-Nielsen, H., Alves, B.J.R., Morrison, M.J (2012): Legumes for mitigation of climate change and the provision of feedstock for biofuels and biorefineries. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 32, 329–364, <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0056-7>.
- Jensen, J.L., Beucher, A.M., Eriksen, J. (2022): Soil organic C and N stock changes in grass-clover leys: Effect of grassland proportion and organic fertilizer. *Geoderma* 424, 116022, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116022>.
- Jones, D. L., Hodge, A., and Kuzyakov, Y. (2004). Plant and mycorrhizal regulation of rhizodeposition. *New Phytologist* 163, 459-480.

- Kautz, T., Stumm, C., Kösters, R., & Köpke, U. (2010). Effects of perennial fodder crops on soil structure in agricultural headlands. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 173(4), 490-501.
- Kemper R, Bublitz TA, Müller P, Kautz T, Döring TF, Athmann M (2020) Vertical Root Distribution of Different Cover Crops Determined with the Profile Wall Method. *Agriculture* 10:503. doi:10.3390/agriculture10110503
- Kemper R, Döring T, Athmann M (2023a) Schaffen Zwischenfrüchte großlumige Bioporen in Unterböden? In: Bibic, V.; Schmidtke, K. (Hrsg.) One Step Ahead - einen Schritt voraus! Beiträge zur 16. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Frick (CH), 07. bis 10. März 2023, Verlag Dr. Köster, Berlin.
- Kemper R, Döring TF, Legner N, Meinen C, Athmann M (2022) Root traits in cover crop mixtures of blue lupin and winter rye. *Plant and Soil* 475:309–328. doi:10.1007/s11104-022-05366-9
- Kemper R, Döring TF, Legner N, Meinen C, Athmann M (2023b) Oil radish, winter rye and crimson clover: root and shoot performance in cover crop mixtures. *Plant and Soil*. doi:10.1007/s11104-023-06240-y
- Kirkby, C.A., Richardson, A.E., Wade, L.J., Passioura, J.B., Batten, G.D., Blanchard, C., Kirkegaard, J.A. (2014): Nutrient availability limits carbon sequestration in arable soils. *Soil Biology and Biochemistry* 68, 402-409, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.09.032>.
- Kivelitz, H. (2017): Ertrags- und Qualitätsreserven des Grünlands nutzen. <http://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/gruenland/gruenlandqualitaeten.html>
- Knebl, L., Binacchi, F., Gattinger, A., Brock, C. (2022): Verbundprojekt: ACKERBONUS - Differenzierte Bewertung der Leistung von Ackerbohnen, Erbsen, Lupinen und Soja in der Versorgung der Böden mit organischer Substanz. Gemeinsamer Schlussbericht. *Orgprints* 52254, <https://orgprints.org/52254>.
- Knebl, L., Leithold, G., Brock, C. (2015): Improving minimum detectable differences in the assessment of soil organic matter change in short-term field experiments. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 178, 35-42, <https://doi.org/10.1002/jpln.201400409>
- Kutschera, L., E. Lichtenegger und M. Sobotik *Wurzelatlas der Kulturpflanzen gemäßiger Gebiete mit Arten des Feldgemüsebaues, Wurzelatlas-Reihe, Band 7, DLG-Verlag, Frankfurt am Main*
- Lebert, M., Brunotte, J., Sommer, C. (2004). *Ableitung von Kriterien zur Charakterisierung einer schädlichen Bodenveränderung, entstanden durch nutzungsbedingte Verdichtung von Böden/Regelungen zur Gefahrenabwehr.* Umweltbundesamt, Berlin, Deutschland.
- Li, G., Yu, C., Shen, P., Hou, Y., Ren, Z., Li, N., Liao, Y., Li, T., Wen, X. (2024): Crop diversification promotes soil aggregation and carbon accumulation in global agroecosystems: A meta-analysis, *Journal of Environmental Management* 350, 119661, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119661>.
- Li, Y., and Ghodrati, M. (1994). Preferential Transport of Nitrate through Soil Columns Containing Root Channels. *Soil Science Society of America Journal* 58, 653-659.
- Logsdon, S. D., and Linden, D. R. (1992). Interactions of earthworms with soil physical conditions influencing plant growth. *Soil Science* 154, 330–337.
- Materechera, S., Alston, A., Kirby, J., and Dexter, A. (1993). Field evaluation of laboratory techniques for predicting the ability of roots to penetrate strong soil and of the influence of roots on water sorptivity. *Plant and Soil* 149, 149-158.
- Meena, R.S., Lal, R. (2018): Legumes and Sustainable Use of Soils. In: Meena, R., Das, A., Yadav, G., Lal, R. (Hrsg.): *Legumes for Soil Health and Sustainable Management.* Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0253-4_1.
- Meinen C, Rauber R (2012) FTIR-ATR spectroscopy – a new approach in root discrimination of crop and weed species. *Julius-Kühn-Archiv* 434, Vol. 2, 702-707.

- Meinen C, Rauber R (2015) Root discrimination of closely related crop and weed species using FT MIR-ATR spectroscopy. *Frontiers in Plant Science* 6, 765.
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research* 12: 513–522.
- Naumann A, Heine G, Rauber R (2010) Efficient discrimination of oat and pea rots by cluster analysis of Fourier transform infrared (FTIR) spectra. *Field Crop Research* 119: 78-84.
- Perkons UK (2018) Bioporengenese durch homo- und allorhize Kulturpflanzen: Einfluss auf das Wurzelwachstum der Nachfrüchte. Dissertation. Universität Bonn, Bonn
- Perkons, U., Kautz, T., Uteau, D., Peth, S., Geier, V., Thomas, K., Lütke Holz, K., Athmann, M., Pude, R., and Köpke, U. (2014). Root-length densities of various annual crops following crops with contrasting root systems. *Soil and Tillage Research* 137, 50-57.
- Poeplau, C., and Don, A. (2015). Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops—A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 200, 33-41.
- R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org>.
- Richards, L.A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics* 1: 318–333.
- Sanderson, M.A., Labreux, M., Hall, M.H., and Elwinger, G.F. (2003): Nutritive Value of Chicory and English Plantain Forage. *Crop Science* 43, 1797-1804.
- Schimel, J.P., Weintraub, M.N. (2003): The implications of exoenzyme activity on microbial carbon and nitrogen limitation in soil: a theoretical model. *Soil Biology & Biochemistry* 35, 549-563.
- Schmittmann, O.; Lammers, P.S. (2023) Assessing Subsoil Conditions with an ASABE Conform Vertical Penetrometer—Development and Evaluation. *Sensors* 2023, 23, 1306. <https://doi.org/10.3390/s23031306>
- Šimůnek, J., Šejna, M., Saito, H., Sakai, M., van Genuchten, M.T. (2013). The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media, Version 4.17, HYDRUS Software Series 3, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, California, USA, 343 S.
- Smith AG, Han E, Petersen J, Olsen NAF, Giese C, Athmann M, Dresbøll DB, Thorup-Kristensen K (2022) RootPainter: Deep Learning Segmentation of Biological Images with Corrective Annotation. *New Phytologist*. doi:10.1111/nph.18387
- Smith, S.R., Bouton, J.H., and Hoveland, C.S. (1991): Persistence of Alfalfa under Continuous Grazing in Pure Stands and in Mixtures with Tall Fescue. *Crop Science* 32, 1259-1264.
- Stewart, J. B., Moran, C. J., and Wood, J. T. (1999). Macropore sheath: quantification of plant root and soil macropore association. *Plant and Soil* 211, 59-67.
- Streit, J., Meinen, C., and Rauber, R. (2017): Oberirdische Biomasse und Wurzelverteilung verschiedener Weißklee-Genotypen im Gemenge mit Deutschem Weidelgras und Zichorie. *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss.* 29, 112–113.
- Stumm, Christoph; Kemper, Roman und Döring, Thomas (2023) Einfluss des Zwischenfruchtanbaus auf den Stickstofftransfer über Winter und den Ertrag der Folgefrucht Sommerweizen. In: One Step Ahead - einen Schritt voraus! Beiträge zur 16. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Frick (CH), 7. bis 10. März 2023, Verlag Dr. Köster, Berlin.
- Sun, Y., Ma, D., Schulze Lammers, P., Schmittmann, O. a. M. Rose (2005) On-the-go-measurement of soil water content and mechanical resistance by a combined horizontal penetrometer. *Soil & Tillage Research* 86, 209-217.
- Thorup-Kristensen, K. (2001). Are differences in root growth of nitrogen catch crops important for their ability to reduce soil nitrate-N content, and how can this be measured? *Plant and Soil* 230, 185-195.
- Uppenkamp, N (1986) Mechanische Massnahmen zur Sicherung des Feldaufganges von Zuckerrüben bei verkrusteter Bodenoberfläche. Dissertation Bonn, VDI-MEG Schriftenreihe Agrartechnik, Band 127

- van Genuchten, M.T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44: 892–898.
- Wendling M, Charles R, Herrera J, Amossé C, Jeangros B, Walter A, Büchi L (2019) Effect of species identity and diversity on biomass production and its stability in cover crop mixtures. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 281:81–91. doi:10.1016/j.agee.2019.04.032
- White, R. G., and Kirkegaard, J. A. (2010). The distribution and abundance of wheat roots in a dense, structured subsoil—implications for water uptake. *Plant, Cell & Environment* 33, 133-148.
- Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York.
- Williams SM, Weil RR (2004) Crop Cover Root Channels May Alleviate Soil Compaction Effects on Soybean Crop. *Soil Science Society of America Journal* 68:1403–1409. doi:10.2136/sssaj2004.1403
- Williamson, L. C., Ribrioux, S. P., Fitter, A. H., and Leyser, H. O. (2001). Phosphate availability regulates root system architecture in *Arabidopsis*. *Plant physiology* 126, 875-882.

10 Übersicht über alle im Berichtszeitraum vom Projektnehmer realisierten Veröffentlichungen zum Projekt

Peer-reviewed Publikationen:

- Kemper R, Döring TF, Legner N, Meinen C, Athmann M (2023) Oil radish, winter rye and crimson clover: root and shoot performance in cover crop mixtures. *Plant and Soil*. doi:10.1007/s11104-023-06240-y.
- Kemper R, Döring TF, Legner N, Meinen C, Athmann M (2022) Root traits in cover crop mixtures of blue lupin and winter rye. *Plant and Soil* 475:309–328. doi:10.1007/s11104-022-05366-9.
- Bublitz TA, Kemper R, Müller P, Kautz T, Döring TF, Athmann M (2022) Relating Profile Wall Root-Length Density Estimates to Monolith Root-Length Density Measurements of Cover Crops. *Agronomy* 12:48. doi:10.3390/agronomy12010048.
- Han E, Smith AG, Kemper R, White R, Kirkegaard JA, Thorup-Kristensen K, Athmann M (2021) Digging roots is easier with AI. *Journal of experimental botany* 72:4680–4690. doi:10.1093/jxb/erab174
- Kemper R, Bublitz TA, Müller P, Kautz T, Döring TF, Athmann M (2020) Vertical Root Distribution of Different Cover Crops Determined with the Profile Wall Method. *Agriculture* 10:503. doi:10.3390/agriculture10110503.
- Schmittmann O, Lammers PS. Assessing Subsoil Conditions with an ASABE Conform Vertical Penetrometer—Development and Evaluation. *Sensors*. 2023; 23(3):1306. <https://doi.org/10.3390/s23031306>

Konferenz-Beiträge:

- Kemper R, Döring T, Athmann M (2023) Schaffen Zwischenfrüchte großlumige Bioporen in Unterböden? In: Bibic V, Schmidtke K (Hrsg.) *One Step Ahead - einen Schritt voraus! Beiträge zur 16. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Frick (CH), 07. bis 10. März 2023*, Verlag Dr. Köster, Berlin.
- Kemper R, Oltmanns M, Brock C, Han E, Döring TF, Athmann M (2021) Bedeutung der Wurzellänge im Unterboden für den Sprossertrag von Futterpflanzen auf einem Sandstandort. In: Stützel H, Fricke A (Hrsg.) *CLOSING THE CYCLE - Pflanze und Tier im Agrarsystem*. Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften (Band 32). 63. Tagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e. V., Rostock, 28. bis 30. September 2021, Verlag Liddy Halm, Göttingen.
- R Kemper, TF. Döring, N Legner, C Meinen, M Athmann (2021) Root growth of rye and lupin in cover crop mixtures, 11th Symposium of the International Society of Root Research, 24-28 May 2021, Missouri, USA.
- R Kemper, P Müller, TF Döring, M Athmann (2021) Exploring The Total Soil Volume: Root Length Densities And Rooting Depth Of Different Cover Crops Determined With The Profile Wall Method, Organic World Congress 2021, September 8-10, 2021, Rennes, France.

Berichte in Agrar-Praxis-Fachzeitschriften

Charlotte Junker (2023) Zwischenfrüchte für die Bodenstruktur? LZ Rheinland 38-2023.

Kemper R, Döring T, Athmann M (2022) Ein Blick auf die Wurzeln – Wurzelforschung: Untersuchungen bei Zwischenfruchtmischungen. Lumbrico, 12: 23-27.

Annegret Grafen (2020) Der Blick in der Wurzelraum – Tiefwurzler erschließen den Unterboden. Bioland 2020.

Poster und Präsentationen für den Wissenstransfer auf Feldtagen/Praktikerveranstaltungen

Roman Kemper. Wurzelleistungen von Zwischenfrüchten und Futterpflanzen. Vortrag für das Humus-Klima-Netz, 3. Humus-Club der Betriebsgruppe Nordwest 28.11.2023, Kiebitzhof, Gütersloh.

Stephan Peth. Beeinflussung von Bodenstruktur durch Feldfutter und Zwischenfruchtbau. MIKODU Abschluss-Workshop. Wiesengut (Hennef). 11.09.2023.

Sabine Seidel und Christopher Brock. C- und N- Dynamiken im Zwischenfruchtbau. MIKODU Abschluss-Workshop. Wiesengut (Hennef). 11.09.2023.

Roman Kemper. Futterpflanzen und Zwischenfrüchte – Ein Blick auf die Wurzeln. MIKODU Abschluss-Workshop. Wiesengut (Hennef). 11.09.2023.

Kemper R. Perspektive Boden - Wurzeleigenschaften von Zwischenfrüchten und Futterpflanzen. NutriNet-Feldtag des Regionetzwerks Brandenburg: Luzernekleegrass und Alternativen? Briesen (Spreewald). 03. Mai 2023.

Roman Kemper. Durchwurzelung von Zwischenfruchtbeständen. Vortrags- und Praxistag Bodenstruktur: Erkennen – Beurteilen – Fördern. Fachhochschule Kiel, Osterröfeld. 20. April 2023.

Roman Kemper. Zwischenfruchtmischungen: Ein Blick auf die Wurzeln. NutriNet Online-Abend des Regionetzwerks Bayern: Zwischenfrüchte und deren Leistung. 14. Februar 2023.

Roman Kemper. MIKODU: Fruchtfolgen für optimierte Nutzung der Bodenressourcen: Mischbau allorhizer und homorhizer Arten zur komplementären Durchwurzelung. BÖL-Veranstaltung Nährstoffmanagement im ökologischen Landbau. Fulda. 24. und 25. November 2022.

Roman Kemper, Muhammad Arslan, Thomas Döring. Wurzel- und Bioporenforschung. Ökofeldtage, Gladbacher Hof 28. bis 30. Juni 2022.

Roman Kemper, Miriam Athmann. Dürre oder Land unter auf dem Acker: Die ökologische Antwort auf Wetterextreme. Was können wir aus der Wurzelforschung im Projekt MIKODU lernen? DLG-Feldtage. Versuchsgut Kirschgartshausen, Mannheim. 14. bis 16. Juni 2022.

Roman Kemper. Wurzeleigenschaften in Zwischenfruchtmischungen. Nachwuchswissenschaftliches Kolloquium der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e. V. (GPW). 30.04.2021.

Roman Kemper. Optimierung der Bodennutzung durch Mischbau von Fein- und Pfahlwurzlern. Naturland-Feldtag Zwischenfruchtmanagement im Ökolandbau. Naturland Hof Bredtmann. Velbert, 29. Oktober 2020.

Roman Kemper. Optimierung der Bodennutzung durch Mischbau von Fein- und Pfahlwurzlern. Feldtag Zwischenfruchtanbau und Klimaanpassung auf dem Versuchsbetrieb Wiesengut, Hennef, 7. November 2019.

Roman Kemper, Phillip Müller, Thomas Döring, Miriam Athmann. Wurzelwachstum und N-Aufnahme von Zwischenfrüchten in Reinsaaten und Mischungen. Ökofeldtage, Frankenhäusen, 3. und 4. Juli 2019.

11 Anhang

Tabelle A1: Parametrisierung des Humusbilanzmodells (HU-MOD) für die Auswertung des MIKODU-Versuchs am Standort Bonn/Wiesengut. Erläuterung der Parameter s. Kap. 3.4.3. Varianten: TR=Tiefenrettich, GR=Grünroggen, ÖR=Ölrettich, LP=Lupine, IK=Inkarnatklée, PC=Phacelia, SAHA=Sandhafer, WIRÜ=Winterrübsen. Zahlen geben Mischungsanteile an.

Block	Variante	SITECN	DMMP	DMSP	DMRTS	NPB	NBNF	NFTLZ	NDEP	NLOSS	CSUP_RRS	CSUP_FTLZ	NSUP_RRS	NSUP_FTLZ	SOMLOSS	SOMSUP	SOMBALC
			Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	Kg N ha ⁻¹	Kg N ha ⁻¹	Kg N ha ⁻¹	Kg N ha ⁻¹	Kg N ha ⁻¹	Kg N ha ⁻¹	Kg C ha ⁻¹	Kg C ha ⁻¹	Kg N ha ⁻¹	Kg N ha ⁻¹	Kg C ha ⁻¹	Kg C ha ⁻¹
3	TR	9,28	2,66	0,00	1,64	107,59	0,00	0,00	5,81	0,00	698,04	0,00	30,81	0,00	944,51	998,47	53,96
5	TR	9,28	3,01	0,00	1,78	116,16	0,00	0,00	5,81	0,00	690,51	0,00	36,01	0,00	1023,97	1077,93	53,96
6	TR	9,28	0,00	0,00	1,32	29,52	0,00	0,00	5,81	0,00	512,92	0,00	29,52	0,00	219,95	273,91	53,96
1	GR	9,28	4,03	0,00	1,48	124,25	0,00	0,00	5,81	0,00	547,62	0,00	12,07	0,00	1099,03	1153,00	53,96
2	GR	9,28	3,25	0,00	0,98	78,61	0,00	0,00	5,81	0,00	270,34	0,00	10,79	0,00	675,55	729,51	53,96
3	GR	9,28	3,37	0,00	0,81	79,23	0,00	0,00	5,81	0,00	349,49	0,00	7,11	0,00	681,33	735,29	53,96
4	GR	9,28	2,73	0,00	0,79	69,15	0,00	0,00	5,81	0,00	245,20	0,00	8,93	0,00	587,79	641,75	53,96
5	GR	9,28	3,09	0,00	1,07	88,43	0,00	0,00	5,81	0,00	424,05	0,00	10,64	0,00	766,70	820,66	53,96
6	GR	9,28	2,87	0,00	1,02	73,34	0,00	0,00	5,81	0,00	416,97	0,00	10,41	0,00	626,64	680,60	53,96
1	IK	9,28	2,73	0,00	0,54	114,57	91,57	0,00	5,81	0,00	203,56	0,00	13,75	0,00	159,49	1063,24	903,75
2	IK	9,28	2,64	0,00	0,15	100,56	79,66	0,00	5,81	0,00	50,25	0,00	2,90	0,00	139,98	933,21	793,23
3	IK	9,28	3,51	0,00	0,49	127,47	102,53	0,00	5,81	0,00	210,36	0,00	10,75	0,00	177,44	1182,92	1005,49
4	IK	9,28	2,59	0,00	0,22	75,02	57,95	0,00	5,81	0,00	56,70	0,00	3,01	0,00	104,42	696,15	591,72
5	IK	9,28	3,54	0,00	0,46	132,08	106,45	0,00	5,81	0,00	176,59	0,00	10,48	0,00	183,85	1225,66	1041,81
6	IK	9,28	2,56	0,00	0,49	102,80	81,56	0,00	5,81	0,00	147,69	0,00	8,38	0,00	143,10	953,97	810,87
1	LP	9,28	3,02	0,00	0,38	100,61	79,70	0,00	5,81	0,00	155,34	0,00	4,37	0,00	140,05	933,66	793,61
2	LP	9,28	3,44	0,00	0,32	120,70	96,78	0,00	5,81	0,00	123,81	0,00	4,79	0,00	168,02	1120,11	952,09
3	LP	9,28	3,30	0,00	0,46	114,65	91,63	0,00	5,81	0,00	181,27	0,00	6,84	0,00	159,59	1063,91	904,32
4	LP	9,28	2,97	0,00	0,22	118,45	94,87	0,00	5,81	0,00	65,44	0,00	2,67	0,00	164,88	1099,19	934,32
5	LP	9,28	5,02	0,00	1,00	173,75	141,87	0,00	5,81	0,00	421,03	0,00	14,78	0,00	241,85	1612,36	1370,50
6	LP	9,28	3,68	0,00	0,22	115,09	92,01	0,00	5,81	0,00	77,80	0,00	4,63	0,00	160,20	1067,99	907,79
1	LP50/GR50	9,28	3,81	0,00	0,59	138,50	22,31	0,00	5,81	0,00	190,03	0,00	7,52	0,00	1024,22	1285,26	261,04
2	LP50/GR50	9,28	3,07	0,00	0,42	75,89	0,00	0,00	5,81	0,00	123,32	0,00	5,33	0,00	650,26	704,22	53,96
3	LP50/GR50	9,28	3,82	0,00	1,29	105,86	0,88	0,00	5,81	0,00	579,49	0,00	15,93	0,00	920,28	982,41	62,13
4	LP50/GR50	9,28	3,75	0,00	0,22	117,13	17,53	0,00	5,81	0,00	66,15	0,00	3,19	0,00	870,39	1086,99	216,60
5	LP50/GR50	9,28	4,46	0,00	1,11	137,28	13,91	0,00	5,81	0,00	433,16	0,00	13,74	0,00	1090,90	1273,97	183,07
6	LP50/GR50	9,28	3,99	0,00	0,84	98,11	0,00	0,00	5,81	0,00	344,55	0,00	9,39	0,00	856,46	910,43	53,96

Tabelle A1 (Forts.): Parametrisierung des Humusbilanzmodells (HU-MOD) für die Auswertung des MIKODU-Versuchs am Standort Bonn/Wiesengut. Erläuterung der Parameter s. Kap. 3.4.3. Varianten: TR=Tiefenrettich, GR=Grünroggen, ÖR=Ölrettich, LP=Lupine, IK=Inkarnatklee, PC=Phacelia, SAHA=Sandhafer, WIRÜ=Winterrüben. Zahlen geben Mischungsanteile an.

Block	Variante	SITECN	DMMP	DMSP	DMRTS	NPB	NBNF	NFTLZ	NDEP	NLOSS	CSUP_RRS	CSUP_FTLZ	NSUP_RRS	NSUP_FTLZ	SOMLOSS	SOMSUP	SOMBALC
			Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	Kg N ha ⁻¹	Kg N ha ⁻¹	Kg N ha ⁻¹	Kg N ha ⁻¹	Kg N ha ⁻¹	Kg N ha ⁻¹	Kg N ha ⁻¹	Kg C ha ⁻¹	Kg C ha ⁻¹	Kg N ha ⁻¹	Kg N ha ⁻¹	Kg C ha ⁻¹
1	LP75/GR25	9,28	4,89	0,00	0,74	176,48	53,68	0,00	5,81	0,00	277,31	0,00	7,96	0,00	1085,61	1637,73	552,12
2	LP75/GR25	9,28	4,45	0,00	0,17	139,54	36,83	0,00	5,81	0,00	53,13	0,00	2,67	0,00	899,18	1294,92	395,74
4	LP75/GR25	9,28	3,49	0,00	0,19	128,82	37,07	0,00	5,81	0,00	62,89	0,00	3,32	0,00	797,42	1195,43	398,01
1	ÖR	9,28	6,17	0,00	1,18	140,34	0,00	0,00	5,81	0,00	453,87	0,00	13,86	0,00	1248,43	1302,39	53,96
2	ÖR	9,28	5,03	0,00	0,34	92,12	0,00	0,00	5,81	0,00	139,21	0,00	4,32	0,00	800,90	854,86	53,96
3	ÖR	9,28	4,29	0,00	1,02	87,84	0,00	0,00	5,81	0,00	277,90	0,00	14,88	0,00	761,18	815,14	53,96
4	ÖR	9,28	4,37	0,00	0,82	111,09	0,00	0,00	5,81	0,00	329,92	0,00	9,51	0,00	976,93	1030,89	53,96
5	ÖR	9,28	4,90	0,00	0,68	86,07	0,00	0,00	5,81	0,00	294,09	0,00	8,30	0,00	744,73	798,69	53,96
6	ÖR	9,28	6,04	0,00	0,68	110,69	0,00	0,00	5,81	0,00	286,05	0,00	12,30	0,00	973,29	1027,25	53,96
1	ÖR50/GR50	9,28	6,91	0,00	1,35	141,21	0,00	0,00	5,81	0,00	531,17	0,00	18,83	0,00	1256,42	1310,39	53,96
2	ÖR50/GR50	9,28	6,74	0,00	0,44	144,61	0,00	0,00	5,81	0,00	160,24	0,00	5,91	0,00	1288,03	1342,00	53,96
3	ÖR50/GR50	9,28	3,82	0,00	0,23	94,05	0,00	0,00	5,81	0,00	102,15	0,00	4,12	0,00	818,79	872,75	53,96
4	ÖR50/GR50	9,28	5,75	0,00	0,68	118,24	0,00	0,00	5,81	0,00	253,32	0,00	8,49	0,00	1043,33	1097,29	53,96
5	ÖR50/GR50	9,28	4,70	0,00	0,62	104,44	0,00	0,00	5,81	0,00	239,70	0,00	7,22	0,00	915,22	969,18	53,96
6	ÖR50/GR50	9,28	4,89	0,00	0,56	117,27	0,00	0,00	5,81	0,00	237,74	0,00	8,49	0,00	1034,30	1088,26	53,96
1	ÖR25/IK75	9,28	6,68	0,00	0,44	206,77	0,00	0,00	5,81	0,00	149,86	0,00	6,29	0,00	1864,89	1918,85	53,96
2	ÖR25/IK75	9,28	5,58	0,00	0,32	171,28	0,00	0,00	5,81	0,00	122,39	0,00	3,90	0,00	1535,49	1589,45	53,96
4	ÖR25/IK75	9,28	6,39	0,00	0,95	127,61	0,00	0,00	5,81	0,00	392,30	0,00	9,40	0,00	1130,22	1184,18	53,96
1	ÖR33/IK33/GR33	9,28	5,20	0,00	0,82	166,96	0,00	0,00	5,81	0,00	298,18	0,00	11,08	0,00	1495,47	1549,43	53,96
2	ÖR33/IK33/GR33	9,28	4,47	0,00	0,92	99,04	0,00	0,00	5,81	0,00	362,62	0,00	15,39	0,00	865,17	919,13	53,96
3	ÖR33/IK33/GR33	9,28	4,06	0,00	0,72	131,14	0,00	0,00	5,81	0,00	298,65	0,00	9,39	0,00	1162,99	1216,95	53,96
4	ÖR33/IK33/GR33	9,28	5,47	0,00	0,63	118,63	0,00	0,00	5,81	0,00	264,41	0,00	7,12	0,00	1046,94	1100,90	53,96
5	ÖR33/IK33/GR33	9,28	4,22	0,00	1,19	146,85	0,00	0,00	5,81	0,00	475,65	0,00	20,18	0,00	1308,81	1362,77	53,96
6	ÖR33/IK33/GR33	9,28	4,55	0,00	0,30	140,68	0,00	0,00	5,81	0,00	110,35	0,00	4,28	0,00	1251,53	1305,49	53,96
3	PC	9,28	5,46	0,00	0,52	97,10	0,00	0,00	5,81	0,00	181,68	0,00	9,86	0,00	847,12	901,08	53,96
5	PC	9,28	5,97	0,00	0,80	109,71	0,00	0,00	5,81	0,00	322,46	0,00	13,03	0,00	964,15	1018,11	53,96
6	PC	9,28	5,14	0,00	0,56	91,50	0,00	0,00	5,81	0,00	238,09	0,00	11,93	0,00	795,15	849,11	53,96

Tabelle A1 (Forts.): Parametrisierung des Humusbilanzmodells (HU-MOD) für die Auswertung des MIKODU-Versuchs am Standort Bonn/Wiesengut. Erläuterung der Parameter s. Kap. 3.4.3. Varianten: TR=Tiefenrettich, GR=Grünroggen, ÖR=Ölrettich, LP=Lupine, IK=Inkarnatklee, PC=Phacelia, SAHA=Sandhafer, WIRÜ=Winterrüben. Zahlen geben Mischungsanteile an.

Block	Variante	SITECN	DMMP	DMSP	DMRTS	NPB	NBNF	NFTLZ	NDEP	NLOSS	CSUP_RRS	CSUP_FTLZ	NSUP_RRS	NSUP_FTLZ	SOMLOSS	SOMSUP	SOMBALC
		Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	Kg N ha ⁻¹	Kg N ha ⁻¹	Kg N ha ⁻¹	Kg N ha ⁻¹	Kg N ha ⁻¹	Kg C ha ⁻¹	Kg C ha ⁻¹	Kg N ha ⁻¹	Kg N ha ⁻¹	Kg C ha ⁻¹	Kg C ha ⁻¹	Kg C ha ⁻¹
3	Rigol-TR (DSV)	9,28	4,93	0,00	0,34	96,34	0,00	0,00	5,81	0,00	148,52	0,00	6,13	0,00	840,10	894,06	53,96
5	Rigol-TR (DSV)	9,28	4,11	0,00	0,36	119,84	0,00	0,00	5,81	0,00	142,94	0,00	9,96	0,00	1058,12	1112,08	53,96
6	Rigol-TR (DSV)	9,28	3,56	0,00	0,46	77,39	0,00	0,00	5,81	0,00	139,46	0,00	5,97	0,00	664,26	718,22	53,96
3	SAHA	9,28	6,03	0,00	0,79	109,28	0,00	0,00	5,81	0,00	290,32	0,00	10,45	0,00	960,18	1014,14	53,96
5	SAHA	9,28	6,44	0,00	0,61	108,55	0,00	0,00	5,81	0,00	232,14	0,00	6,14	0,00	953,41	1007,37	53,96
6	SAHA	9,28	5,65	0,00	0,79	108,13	0,00	0,00	5,81	0,00	316,09	0,00	9,06	0,00	949,45	1003,41	53,96
3	WIRÜ	9,28	3,96	0,00	0,56	92,34	0,00	0,00	5,81	0,00	221,99	0,00	9,26	0,00	802,92	856,88	53,96
5	WIRÜ	9,28	3,00	0,00	0,74	88,32	0,00	0,00	5,81	0,00	291,40	0,00	13,75	0,00	765,64	819,60	53,96
6	WIRÜ	9,28	3,29	0,00	0,35	80,18	0,00	0,00	5,81	0,00	146,53	0,00	6,27	0,00	690,11	744,07	53,96

Tabelle A2: Parametrisierung des Humusbilanzmodells (HU-MOD) für die Auswertung des MIKODU-Versuchs am Standort Darmstadt/Oberfeld. Erläuterung der Parameter s. Kap. 3.4.3. Varianten: KLG=Klee gras, LUZ=Luzerne, ROHRS=Rohrschwengel, WEGWA=Wegwarte.

Block	Variante	SITECN	DMMP	DMSP	DMRTS	NPB	NBNF	NFTLZ	NDEP	NLOSS	CSUP_RRS	CSUP_FTLZ	NSUP_RRS	NSUP_FTLZ	SOMLOSS	SOMSUP	SOMBALC
			Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	Kg N ha ⁻¹	Kg N ha ⁻¹	Kg N ha ⁻¹	Kg N ha ⁻¹	Kg N ha ⁻¹	Kg N ha ⁻¹	Kg C ha ⁻¹	Kg C ha ⁻¹	Kg N ha ⁻¹	Kg N ha ⁻¹	Kg C ha ⁻¹	Kg C ha ⁻¹
A	KLG	13,4	0,63	0,00	0,00	23,73	6,48	1,03	10,16	0,00	250,00	207,96	12,75	6,62	115,29	304,27	188,98
B	KLG	13,4	2,30	0,00	3,70	150,92	80,26	8,33	10,16	0,00	2167,49	824,20	92,77	37,25	733,09	1910,71	1177,62
C	KLG	13,4	0,76	0,00	1,54	43,75	18,95	1,32	10,16	0,00	938,50	285,65	30,86	8,80	212,50	568,54	356,04
D	KLG	13,4	3,76	0,00	3,31	209,06	112,66	13,00	10,16	0,00	2685,61	1335,91	113,75	58,86	1015,53	2627,23	1611,70
A	LUZ	13,4	6,64	0,00	0,00	340,69	252,90	29,07	10,16	0,00	2656,00	1863,24	135,46	108,38	684,80	4127,58	3442,79
B	LUZ	13,4	4,16	0,00	6,40	285,24	220,35	14,49	10,16	0,00	3886,08	1282,71	162,51	66,02	573,33	3587,83	3014,49
C	LUZ	13,4	5,62	0,00	5,96	362,99	279,39	21,53	10,16	0,00	4231,01	1636,02	202,41	86,79	729,60	4545,55	3815,95
D	LUZ	13,4	5,84	0,00	5,77	380,86	292,61	23,51	10,16	0,00	4347,98	2013,40	206,47	105,12	765,53	4728,48	3962,95
A	LUZ/ROHRS	13,4	3,77	0,00	0,00	172,85	88,70	12,20	10,16	0,00	1507,20	1163,76	76,87	53,83	828,10	2152,83	1324,74
B	LUZ/ROHRS	13,4	4,37	0,00	7,89	286,76	163,17	17,19	10,16	0,00	4610,77	1450,60	165,99	70,66	1289,57	3612,25	2322,68
C	LUZ/ROHRS	13,4	5,50	0,00	2,80	263,84	146,70	18,97	10,16	0,00	2683,38	1578,23	110,29	77,51	1179,27	3281,20	2101,94
D	LUZ/ROHRS	13,4	6,84	0,00	5,84	381,31	190,80	33,27	10,16	0,00	5075,98	2780,60	194,51	136,62	1970,81	4663,71	2692,90
A	ROHRS	13,4	0,71	0,00	0,00	27,13	0,00	1,42	10,16	0,00	285,60	313,83	14,57	10,74	287,89	339,04	51,15
B	ROHRS	13,4	0,40	0,00	4,59	50,89	0,00	0,98	10,16	0,00	2094,88	177,06	42,75	6,85	603,43	664,62	61,19
C	ROHRS	13,4	0,58	0,00	2,50	39,35	0,00	1,34	10,16	0,00	1361,71	254,58	29,00	8,86	429,97	507,31	77,34
D	ROHRS	13,4	0,84	0,00	5,72	70,99	0,00	2,26	10,16	0,00	2919,46	378,76	54,31	14,05	841,54	916,08	74,54
A	WEGWA	13,4	3,19	0,00	0,00	111,76	0,00	5,76	10,16	0,00	1274,40	1019,93	64,99	34,34	1318,25	1420,35	102,10
B	WEGWA	13,4	3,61	0,00	5,70	157,85	0,00	6,02	10,16	0,00	3580,53	1221,54	106,51	38,83	1932,44	2034,54	102,10
C	WEGWA	13,4	2,84	0,00	1,29	107,84	0,00	5,09	10,16	0,00	1562,83	1046,44	67,14	32,99	1274,70	1341,65	66,95
D	WEGWA	13,4	2,95	0,00	2,70	136,02	0,00	5,06	10,16	0,00	2202,78	1069,28	94,83	32,95	1652,69	1712,34	59,64
A	WEGWA/ROHRS	13,4	0,74	0,00	0,00	28,35	0,00	1,92	10,16	0,00	296,80	308,29	15,14	10,99	264,03	350,13	86,09
B	WEGWA/ROHRS	13,4	2,45	0,00	6,15	122,46	0,00	4,43	10,16	0,00	3520,76	1034,15	86,73	29,91	1479,40	1562,99	83,59
C	WEGWA/ROHRS	13,4	0,65	0,00	2,68	41,37	0,00	1,38	10,16	0,00	1462,41	255,69	30,63	8,53	433,78	524,69	90,91
D	WEGWA/ROHRS	13,4	2,11	0,00	3,86	97,47	0,00	3,69	10,16	0,00	2452,57	843,21	66,77	24,95	1154,53	1256,63	102,10