



Foto: J. Siebigeroth

Zwischenfrüchte und Wurzeleistung

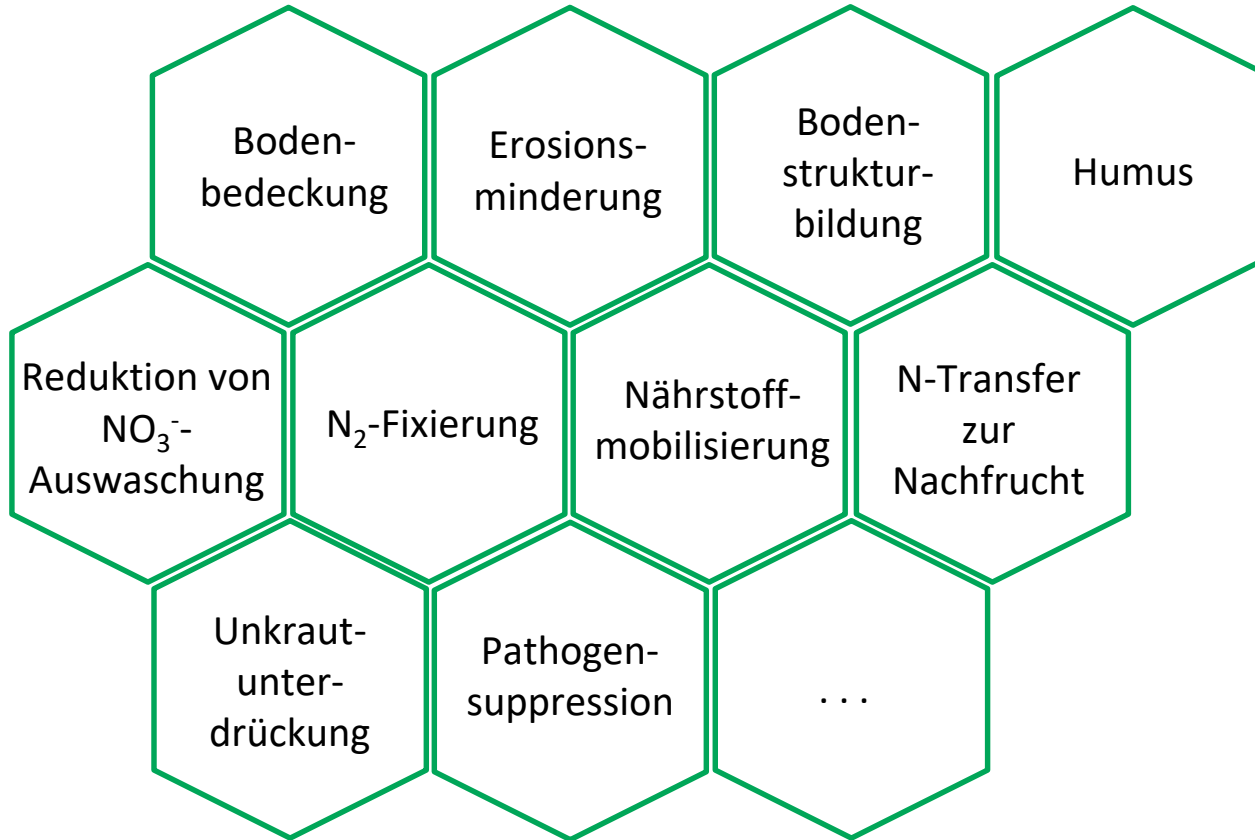
– Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt MIKODU –

25. Öko-Kartoffeltag

Roman Kemper

10. Januar 2024

- Zwischenfrüchte werden zwischen den Hauptkulturen angebaut
- sie erfüllen viele unterschiedliche Funktionen:



- Für viele dieser Funktionen sind die Wurzeln der Zwischenfrüchte von zentraler Bedeutung.

Warum sind die Wurzeln für Humus wichtig?



- Wurzeln bringen organische Substanz in den Boden
→ **Wurzelmasse**
- Langsamere Abbau organischer Substanz im Unterboden
→ **Tiefwurzler**
→ **Nutzung großlumiger Bioporen**

- Rhizodeposition
„hidden half of hidden half“
→ **abgestorbene Wurzelzellen**
→ **Wurzelausscheidungen**

Kohlenstoffquelle	Humifizierungs- koeffizient
Spross	0,17
Wurzel	0,39
Rottemist	0,32
Torf	0,71
Klärschlamm	0,54

Kätterer et al. 2011 *Agriculture, Ecosystems & Environment*

Bei Grünroggen machte die Rhizodeposition mehr als 30% des unterirdischen Inputs von Kohlenstoff aus.

Austin et al. (2017) *GCB Bioenergy*

Bioporen:

- runde, vertikal verlaufende Poren im Boden
- von anözischen Regenwurmarten oder Pfahlwurzeln gebildet
- großlumige Bioporen: $\varnothing > 2\text{mm}$

Funktionen: (Kautz, 2015; Xiong et al., 2022):

- Gasaustausch, Wasserinfiltration, Unterboden-Durchwurzelung
- Wasser- und Nährstoffaufnahme aus dem Unterboden

Bioporengenes durch Anbau von Pfahlwurzeln

- möglich durch Anbau mehrjähriger Futterpflanzen (Han et al., 2015)
- für Zwischenfrüchte angenommen, aber nicht gezeigt (Zhang und Peng, 2021)
- Schaffen Zwischenfrüchten großlumige Bioporen im Unterboden?



- Reinsaaten und Mischungen
- Zwischenfrüchte am Wiesengut auf Auenlehm über Kies
- Futterpflanzen am Hofgut Oberfeld in Darmstadt auf Sandboden
- Sprossbiomasse- und Nährstoffaufnahme
- Wurzelmasse und Wurzellängendichte sowie Nährstoffaufnahme
- FTIR-Spektroskopie zur „Wurzelartentrennung“
- Mischungseffekte im Wurzelraum
- Bioporennutzung und Bioporengenesse
- Effekte auf Bodenstruktur
- Nachfruchteffekte



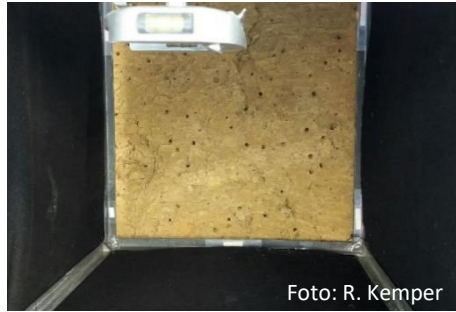
Fotos: J. Siebigteroth



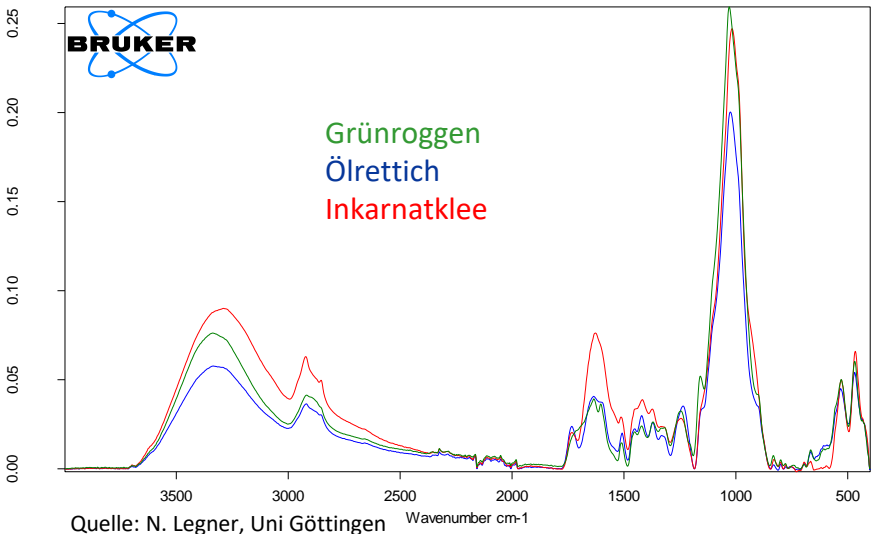
Profilwand-Methode



Monolith-Methode

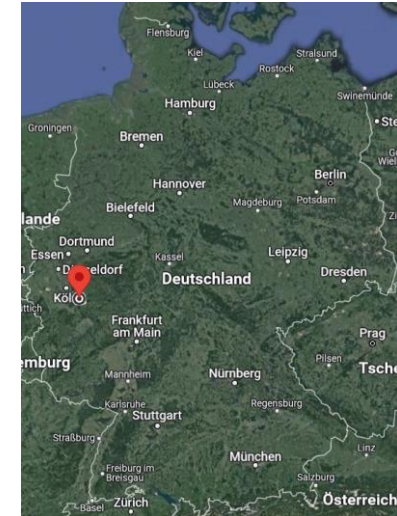
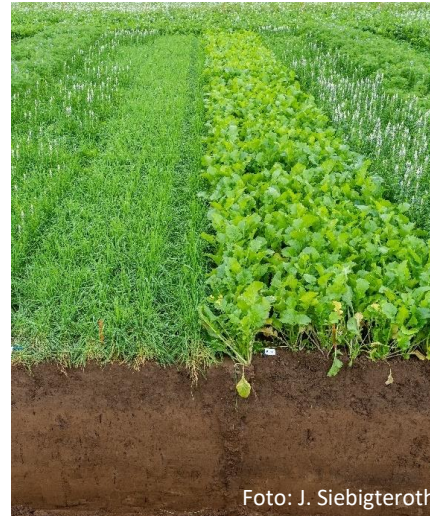


Bioporen-Fotografie



Fourier-Transform-Infrarot-Spektroskopie zur Wurzelartentrennung,

Wie unterscheiden sich die Wurzelprofile der unterschiedlichen Zwischenfrucht-Arten?



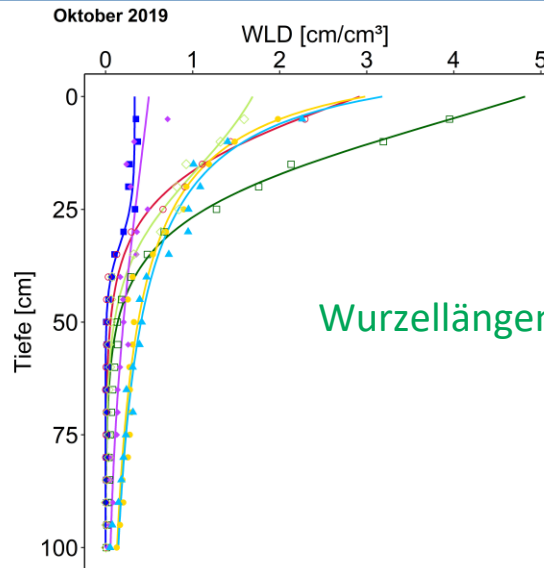
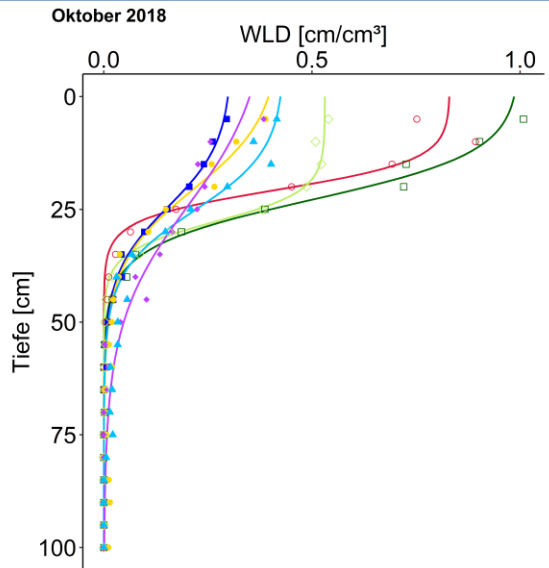
Zwischenfrucht-Arten:

- Phacelia
- Grünroggen
- Ölrettich
- Sandhafer
- Winterrübsen
- Blaue Lupine
- Inkarnatklee

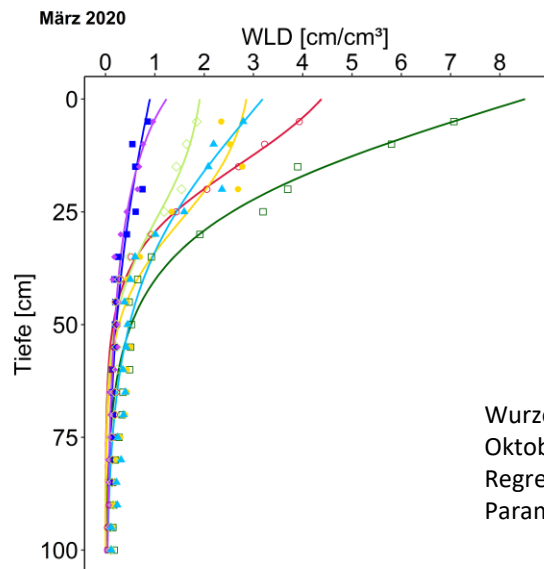
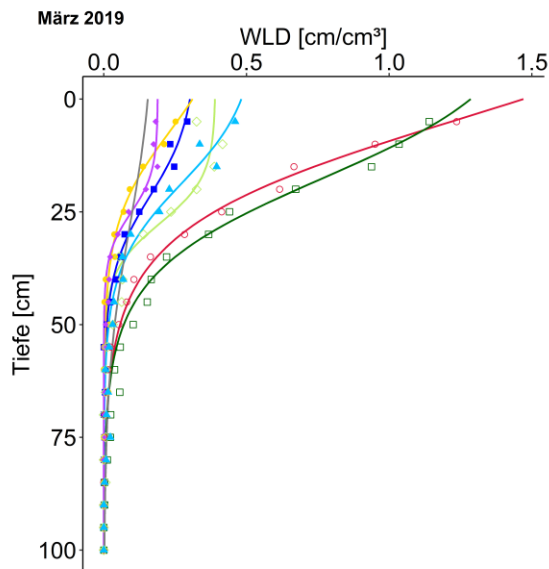
Feldversuche:

- 2018/19 und 2019/20
- ökologisch bewirtschaftet
- in Hennef (Sieg)
- bewässert
- 840 mm, 10.3 °C
- Saat Mitte August
- Auenlehm
- Vorfrucht Ackerbohne

WLD von Zwischenfrüchten vor und nach Winter



$$\text{Wurzellängendichte (WLD)} = \frac{\text{Wurzellänge}}{\text{Bodenvolumen}}$$



- Inkarnatklee
- Grünroggen
- ◇ Sandhafer
- Blaue Lupine
- Ölerrettich
- ▲ Winterrübsen
- ◆ Phacelia

Wurzellängendichte (WLD) von Zwischenfrüchten in Oktober und März in 2018/19 und 2019/20. Nichtlineare Regression mit einer logistischen Funktion mit drei Parametern sowie Mittelwerte (n=3).

Mittelwerte (n=3) des Anteils der Wurzellänge in großlumigen Bioporen im Unterboden (30-90 cm) für verschiedene Zwischenfrüchte in Oktober und März 2018/19 und 2019/20.

Termin	Zwischenfrucht	Anteil der Wurzellänge in großlumigen Bioporen (%)		
		2018/19	2019/20	
Oktober	Inkarnatklee	0,0	4,6	b
	Grünroggen	5,2	8,4	ab
	Sandhafer	0,0	17,5	ab
	Blaue Lupine	15,0 n.s.	2,1	b
	Ölrettich	22,2	14,8	ab
	Winterrübsen	9,7	11,3	ab
	Phacelia	4,0	31,3	a
März	Inkarnatklee	2,4	6,1	
	Grünroggen	1,8	6,2	
	Sandhafer	9,6	5,6	
	Blaue Lupine	0,0 n.s.	4,9	n.s.
	Ölrettich	9,7	21,8	
	Winterrübsen	7,4	16,3	
	Phacelia	4,8	31,7	

($p \leq 0,05$, HSD Tukey-Test)

Kemper et al. (2020) *Agriculture*



Foto: J. Siebigteroth

Welche Typen hat das Screening gezeigt?

	Grünroggen	Inkarnatklees	Sandhafer	Lupine	Ölrettich	Winterrüben	Phacelia	
viele Feinwurzeln	++	+	0	--	-	-	-	
Intensive Oberbodendurchwurzelung	++	+	0	--	0	0	-	
Zunahme an Wurzellänge über Winter	+	+	-	-	-	0	-	
Pfahlwurzler	-	0	-	++	+	+	+	
Intensive Unterbodendurchwurzelung	0	--	-	-	++	++	+	
Bioporen-Nutzung	-	-	0	-	+	+	+	
	1		2		3		4	

Klassifizierung angepasst nach Bodner et al. 2013 und Bodner et al. 2019:

1. Oberboden-Typen mit vielen Feinwurzeln
2. Typen mit wenig verzweigten Primärwurzeln
3. Oberboden-Typen mit großem Wurzel Durchmesser
4. Wurzeldichte-Typen mit starker Verzweigung

→ Arten mit verschiedenen Wurzeltypen können als Mischungspartner interessant sein

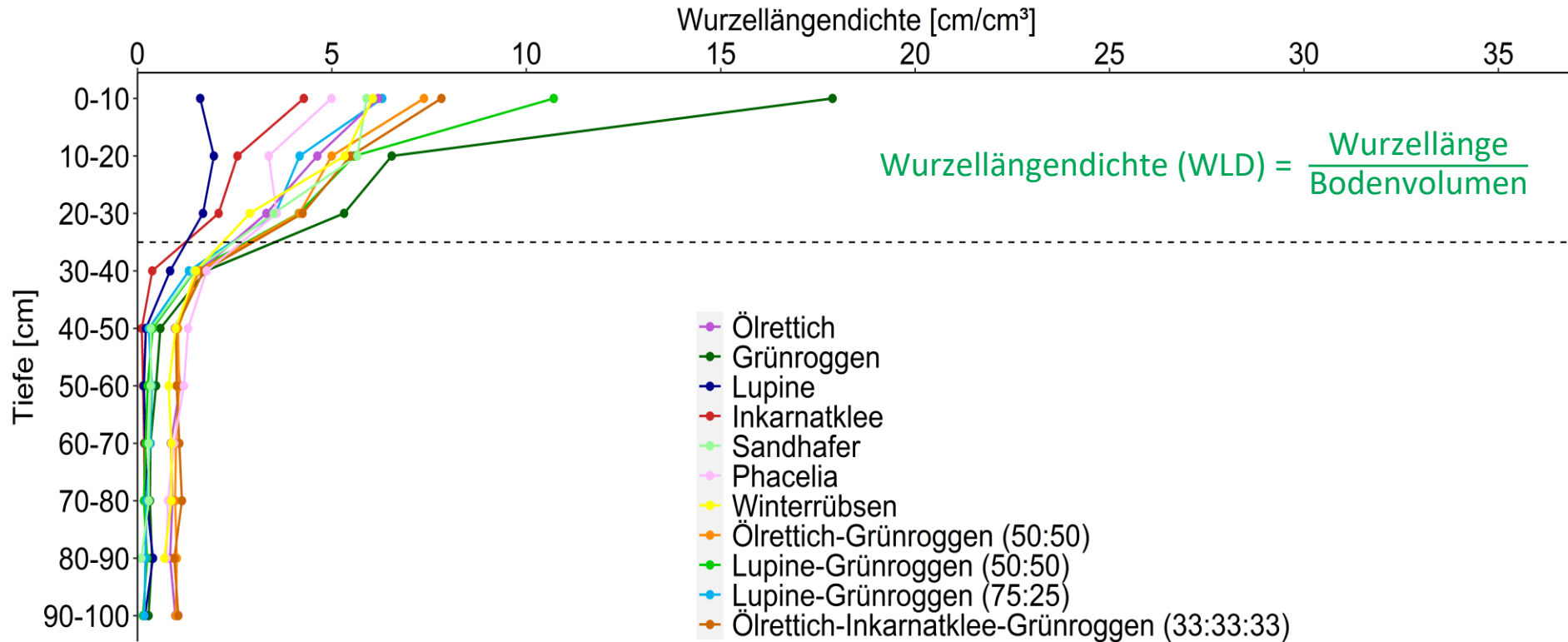
Im Screening an der Profilwand wurden als komplementär identifiziert:



Fotos: J. Siebigieroth

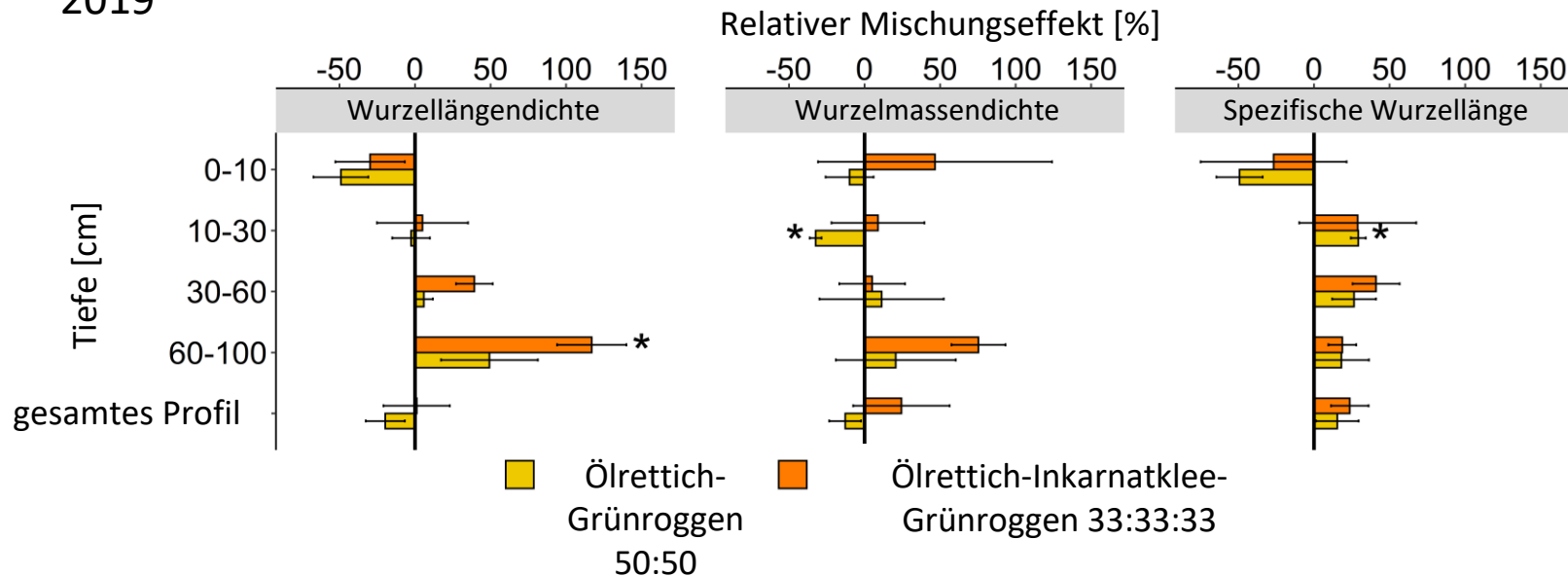
Folgende Mischungen wurden getestet:

- Lupine + Grünroggen (50:50)
- Grünroggen + Ölrettich (50:50)
- Lupine + Grünroggen (75:25)
- Ölrettich + Grünroggen + Inkarnatklee (33:33:33)



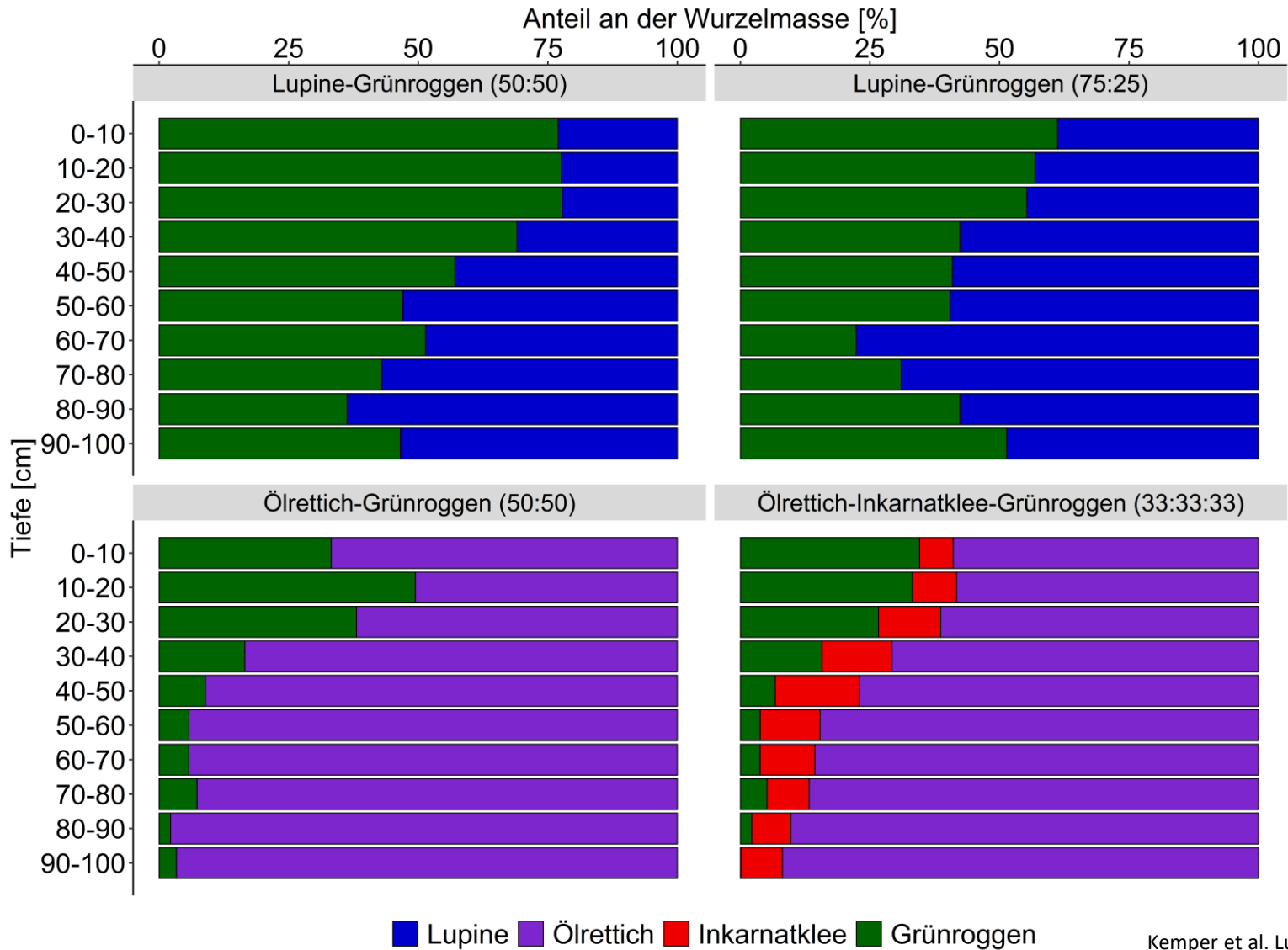
- insgesamt geringe WLD von Lupine
- hohe WLD im Oberboden von Grünroggen
- hohe WLD im Unterboden von Ölrettich, Phacelia, Winterrübsen und Ölrettich-Mischungen

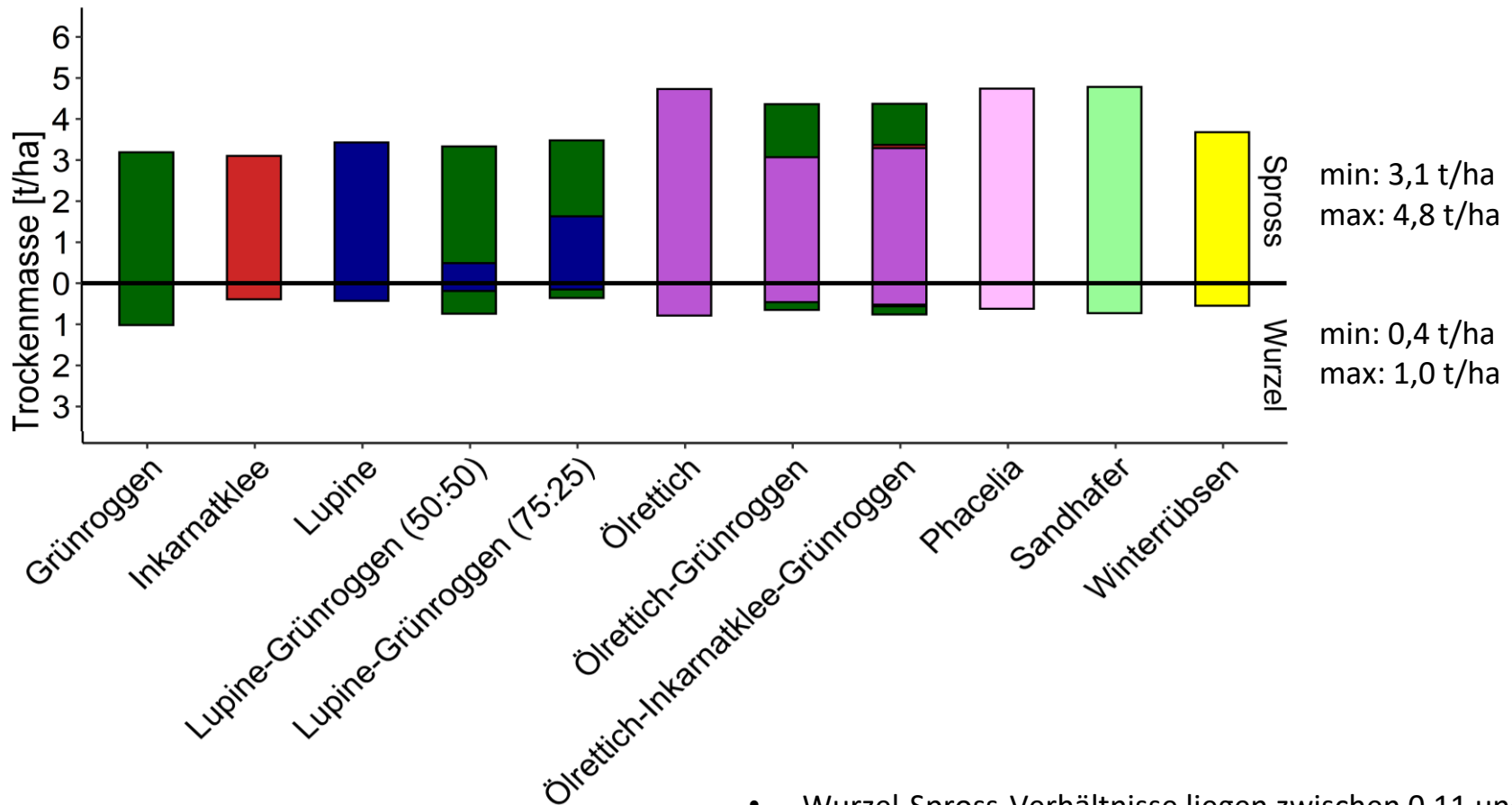
2019



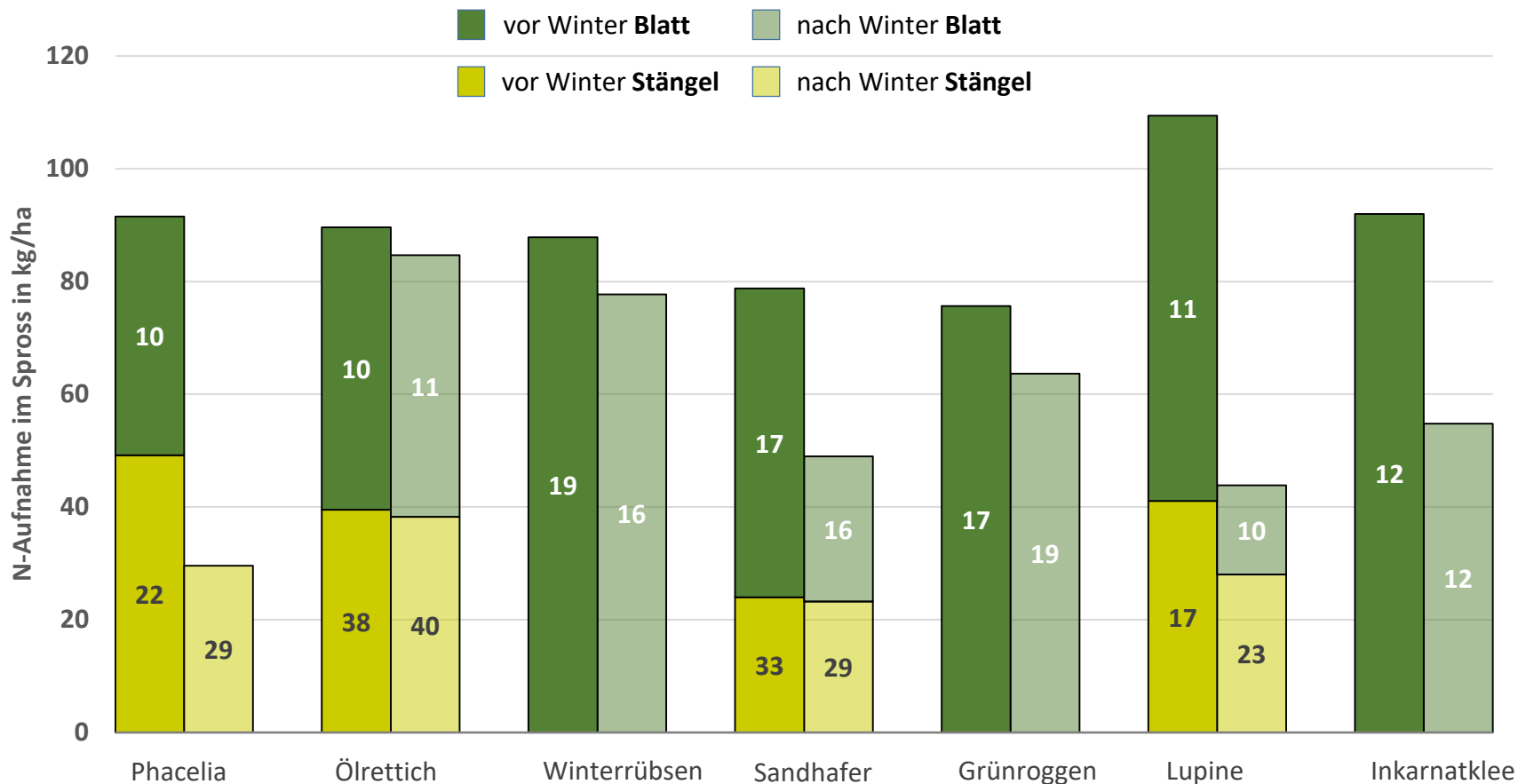
- relativer Mischungseffekt:
 - negativ: Reinsaaten „besser“
 - positiv: Mischung „besser“
- über das gesamte Bodenprofil kaum Mischungseffekte, aber starke positive Effekte im Unterboden
- höhere Wurzellängen- und -massendichte im Unterboden in Mischungen mit Ölrettich
- höhere spezifische Wurzellänge in Mischungen = dünnere Wurzeln = effizientere Nährstoffaufnahme?

Mischungen: Wurzelmasse nach Arten getrennt





- Wurzel-Spross-Verhältnisse liegen zwischen 0,11 und 0,32
- schwach positive Mischungseffekte im Spross
- keine Mischungseffekte für die Wurzelmasse

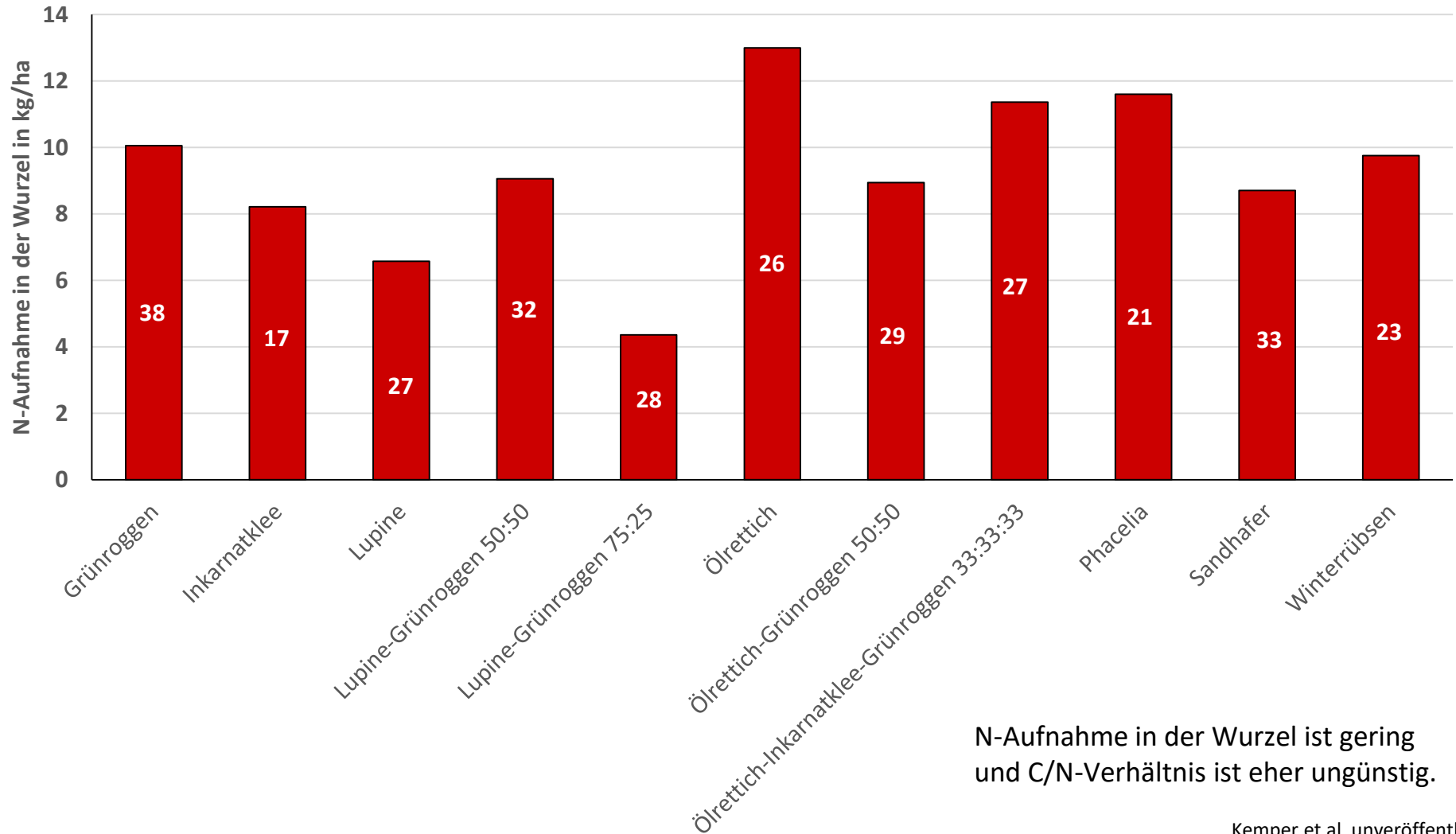


Einfluss verschiedener Zwischenfrüchte auf die Stickstoffaufnahme in den Spross (Balken) und das CN-Verhältnis (Zahlen in Balken) auf dem **Versuchsbetrieb Wiesengut** in Hennef vor und nach Winter 2019/20.

- C/N-Verhältnisse in Blatt günstiger als im Stängel
- nicht abfrierende Arten verlieren weniger N über Winter

Quelle: Christoph Stumm, Leitbetriebe
Ökologischer Landbau NRW

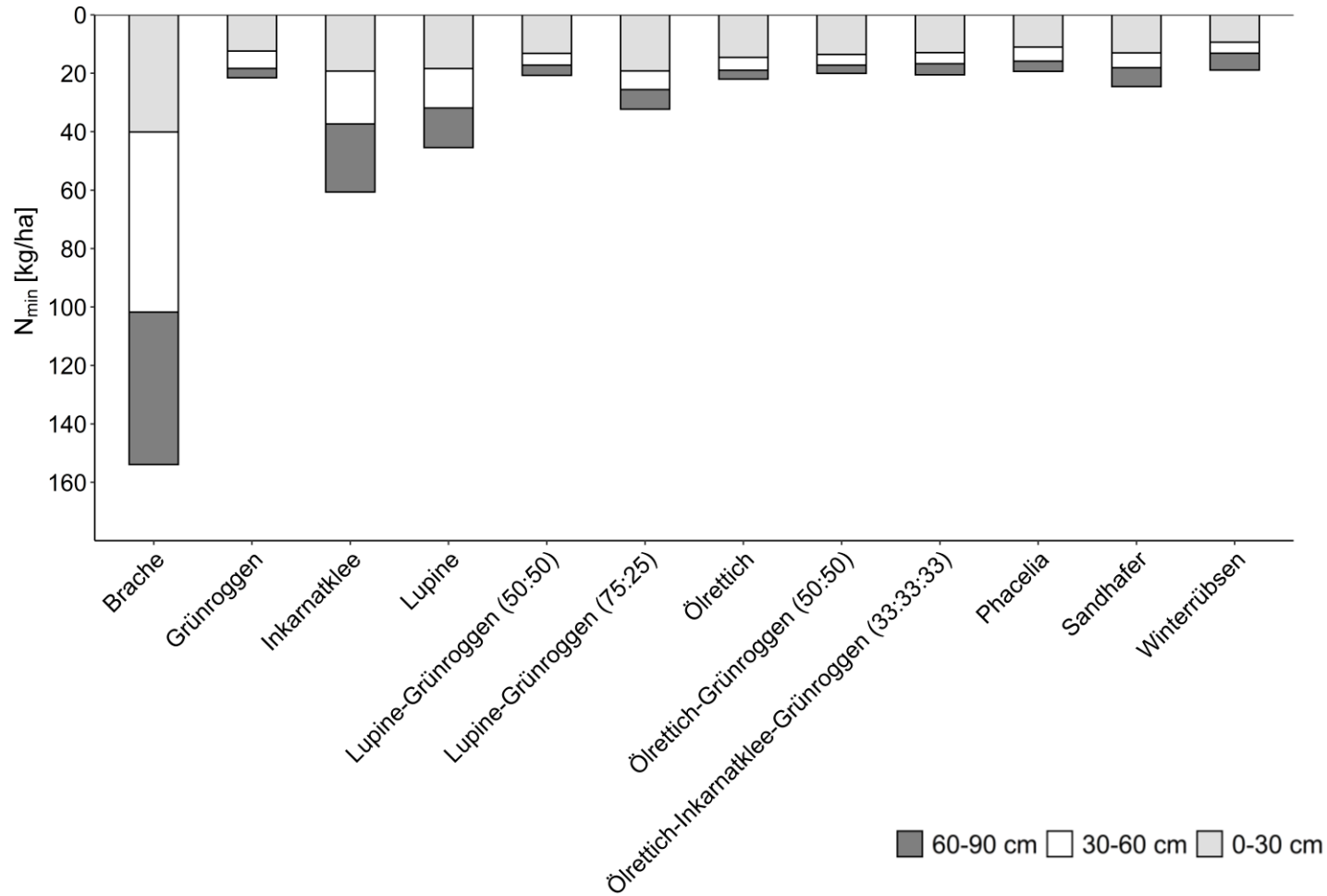
N-Aufnahme & C/N-Verhältnis in Wurzel



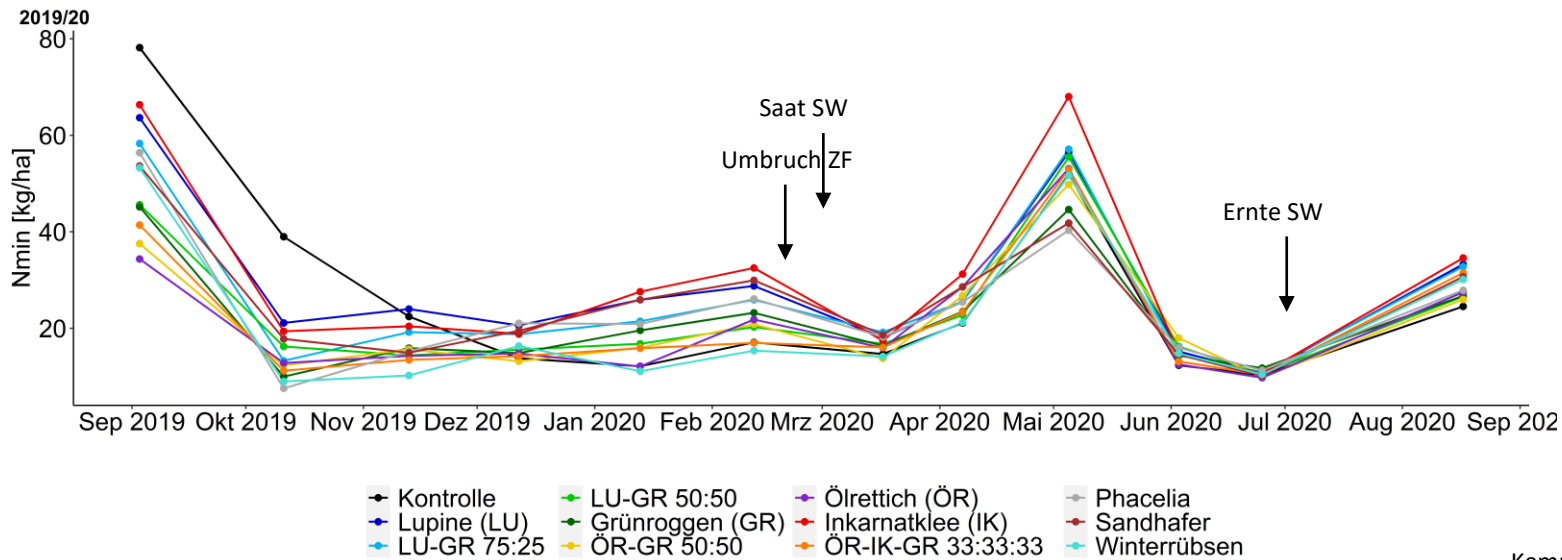
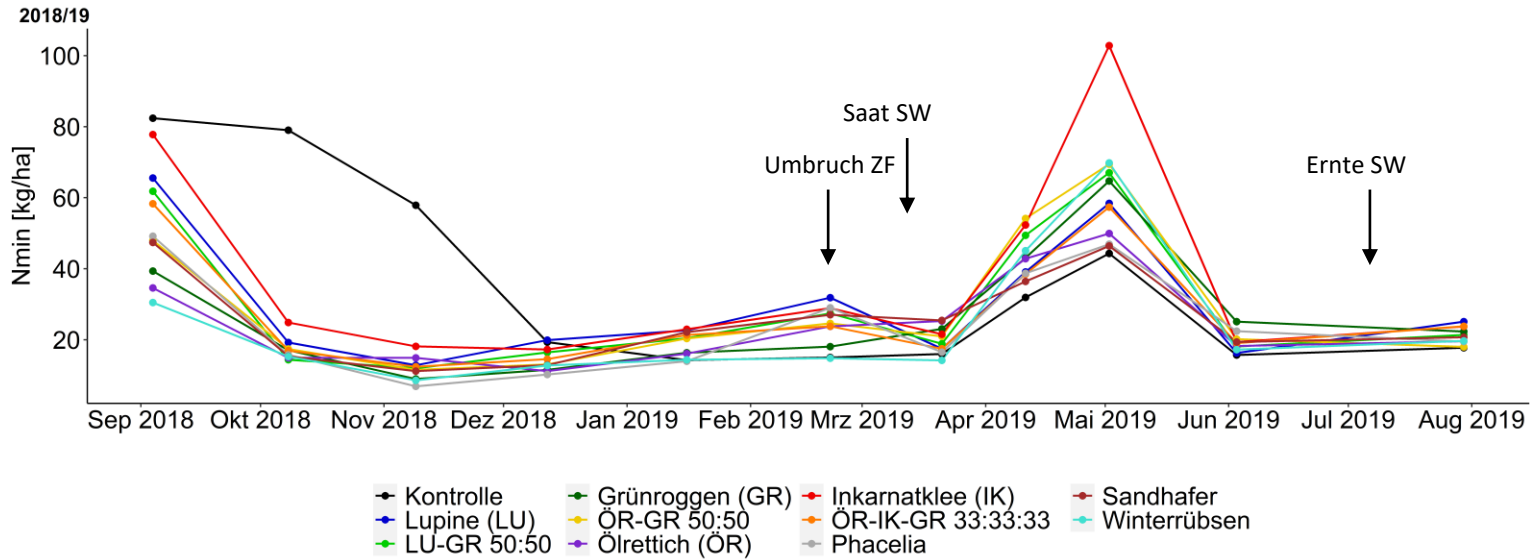
N-Aufnahme in der Wurzel ist gering und C/N-Verhältnis ist eher ungünstig.

Kemper et al. unveröffentlicht

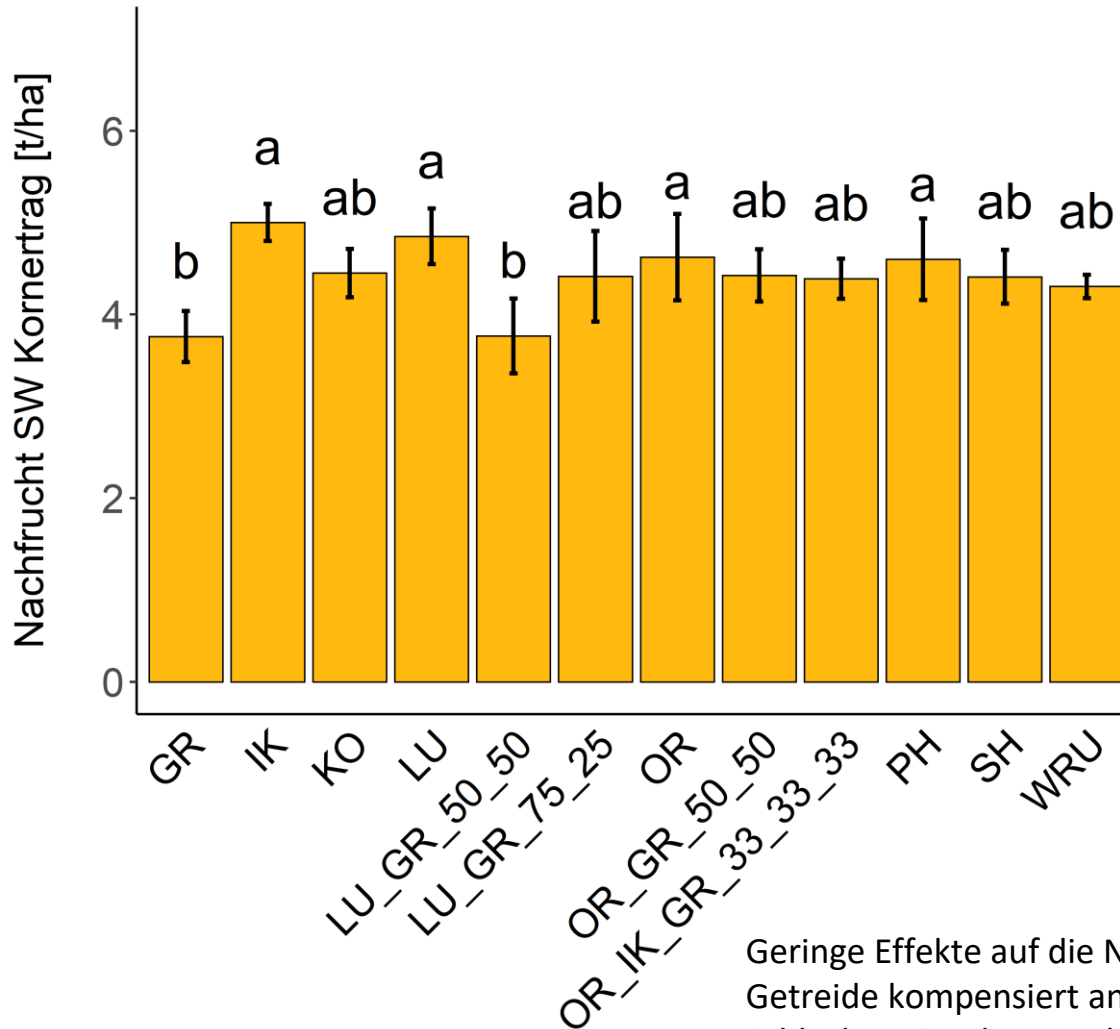
N_{\min} unter Zwischenfrüchten im November



N_{min} (0-30 cm) unter ZF und Nachfrucht SW



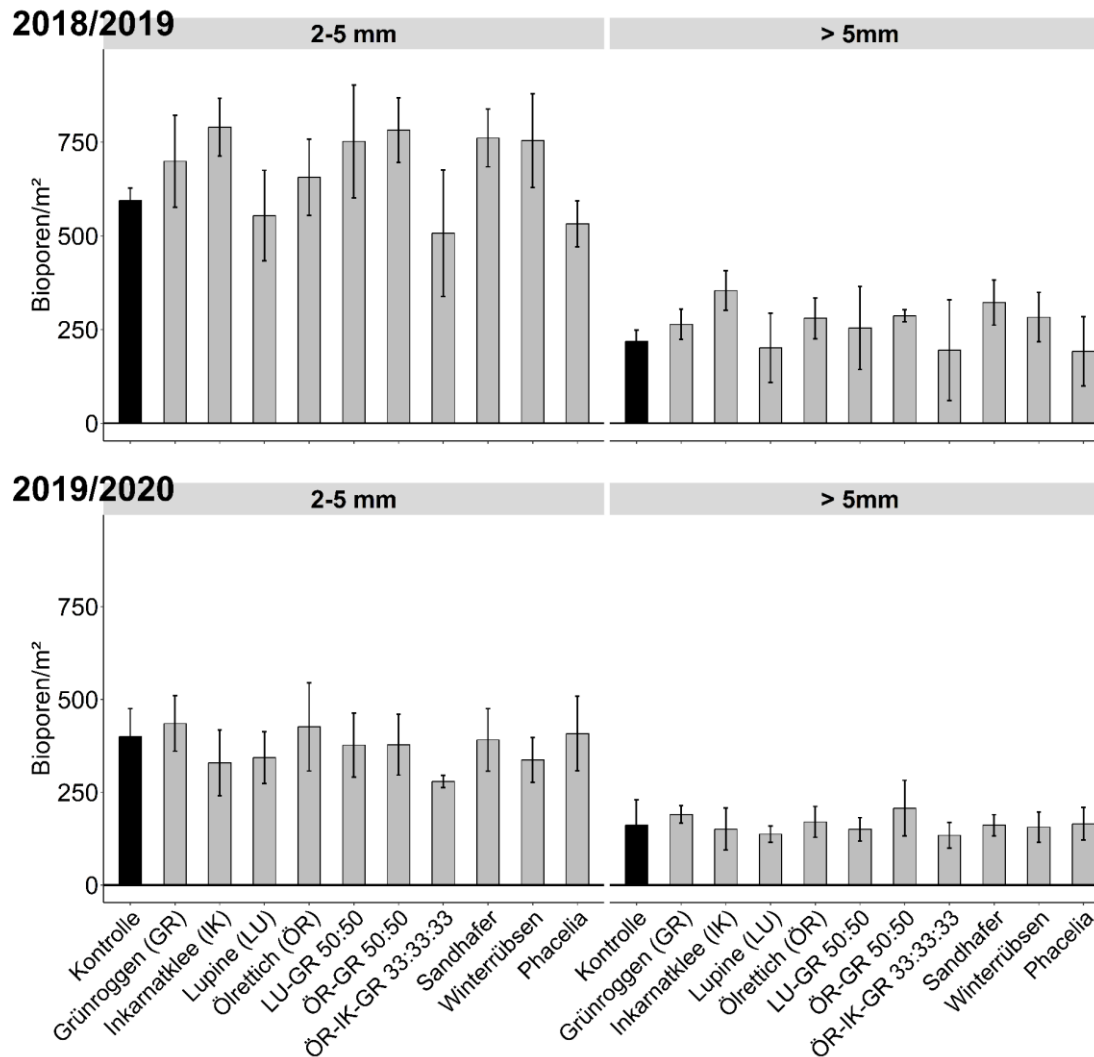
Kemper et al. unveröffentlicht



Geringe Effekte auf die Nachfrucht, nach Leguminosen tendenziell erhöht.
Getreide kompensiert anfängliche Unterschiede bis zur Ernte.
Schlechtes Saatbett nach Grünroggen im Versuch.

Kemper et al. unveröffentlicht

Bioporendichte unter Zwischenfrüchten



Insgesamt hohe Bioporendichte am Wiesengut durch langjährig ökologische Bewirtschaftung mit Stallmistgaben → Regenwürmer!

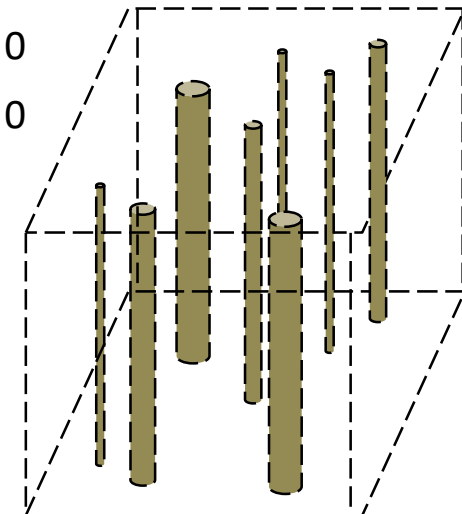
Bioporendichte (m⁻²) nach Durchmesser unter Zwischenfrüchten in 2018/19 und 2019/20 in 40 cm Tiefe (p ≤ 0,05, Dunnett-Test).

Wurzelstücke in 40-50 cm Tiefe

Berechnete Wurzelstücke je m² der Zwischenfrüchte in zwei Durchmesserklassen in der Bodenschicht 40-50 cm in 2018/19 und 2019/20.

Zwischenfrucht	2018/19		2019/20	
Durchmesserklasse	2-5 mm	>5 mm	2-5 mm	>5 mm
Grünroggen (GR)	12	0	6	0
Inkarnatklee (IK)	0	0	0	0
Lupine (LU)	44	0	0	0
LU-GR 50:50	13	0	0	0
Ölrettich (ÖR)	9	0	0	0
ÖR-GR 50:50	1	0	0	0
ÖR-IK-GR 33:33:33	0	0	0	0
Phacelia	1	0		
Sandhafer	0	0		
Winterrübsen	4	0		

Bioporengenesse-Potential von Zwischenfrüchten ist gering.
Potenzial von Lupine ist am höchsten.



Was leisten Zwischenfruchtwurzeln?

Funktion	“Oberboden- struktur/ Aggregatstabilität”	“Nährstoffaufnahme im Unterboden/ Minderung von Nitratverlagerung”	“Kohlenstoff- Speicherpotential”	“Bioporegenese- Potential”
Wurzeleigenschaft	WLD [cm cm ⁻³] in 0-30 cm Tiefe	WLD [cm cm ⁻³] in 30-90 cm Tiefe	Wurzel-Trockenmasse [t ha ⁻¹]	Wurzelstücke m ⁻² (> 2 mm) in 40-50 cm Tiefe
Inkarnatklee	2,3	0,2	0,39	0
Blaue Lupine	1,4	0,3	0,43	22
Grünroggen	7,5	0,6	1,02	9
Sandhafer	5,0	0,5	0,73	0
Ölrettich	3,8	1,1	0,79	5
Winterrübsen	4,8	1,0	0,55	4
Phacelia	4,0	1,1	0,62	1
mehrj. Klee gras	22	0,6	2,85	74
mehrj. Luzerne	12	0,9	6,04	87 - 115
mehrj. Rohrschwengel	20	0,9 - 3,2	4,27	6 - 195
mehrj. Wegwarte	9	0,6 - 2,0	3,23	53 - 76

Han et al. (2015a), Han et al. (2015b), Perkons (2018), Kemper (2024), Kemper et al. unveröffentlicht

Zwischenfrucht-Wurzeln

- Pfahlwurzler nutzen bestehende Bioporen intensiv
- intensive Oberbodendurchwurzelung v.a. durch Gräser und Inkarnatklees
- Wurzellänge winterharter Arten nimmt über Winter zu
- Bioporengenes-Potential gering
- geringe Wurzelmasse und -länge im Vergleich zu mehrjährigem Futterbau
- Wurzelwachstum durch Früh-, Unter-, Mähdrusch-, Vorerntesaat oder Tiefenlockerung fördern?



Foto: J. Siebigteroth

N-Transfer durch Zwischenfrüchte

- winterharte Arten bilden bis zum ersten Frost weniger Sprossbiomasse
- geringerer N-Verlust über Winter bei winterharten Arten
- C/N-Verhältnis im Blatt ist für Mineralisierung günstiger als im Stängel
- kaum Ertragsunterschiede in der Getreide-Nachfrucht
- sobald Nichtleguminose in Mischung Versicherung gegen Nitratverlagerung



Foto: I. Reinhard

Zwischenfrucht-Mischungen

- Mischung meist nicht von bester Einzelkomponente verschieden
- Unterschiede in der Sprossbiomasse zwischen Mischungen und Reinsaaten eher gering
- schwache Mischungskomponenten werden auch in der Wurzelmasse unterdrückt
- absolut gibt es keinen Mischungsvorteil für Wurzellänge oder Wurzelmasse
- nach Tiefe differenziert betrachtet gibt es Mischungsvorteil für Wurzellänge oder Wurzelmasse
- positive Mischungseffekte v.a. bei ausbalancierten Mischungen
- Saatanteile entscheidend (dominante Art ↓, schwache Art ↑)
- Dominanz in der Mischung hängt auch von Bedingungen im Feld ab (N_{\min} , Bodenfeuchte)
- abfrierende + winterharte Partner ergänzen sich gut, v.a. im Hinblick auf die N-Dynamik
- Mischungen sind Risikoabsicherung gegen Totalausfall



**Danke für die
Aufmerksamkeit!**

Gefördert durch:



BÖLN

Bundesprogramm Ökologischer Landbau
und andere Formen nachhaltiger
Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Roman Kemper
Fachgebiet Agrarökologie und Organischer Landbau
Universität Bonn
Mail: rkemper@uni-bonn.de

- Austin EE, Wickings K, McDaniel MD, Robertson GP, Grandy AS (2017) Cover crop root contributions to soil carbon in a no-till corn bioenergy cropping system. *GCB Bioenergy* 9:1252–1263. doi:10.1111/gcbb.12428
- Bodner G, Leitner D, Nakhforoosh A, Sobotik M, Moder K, Kaul H-P (2013) A statistical approach to root system classification. *Frontiers in Plant Science* 4:292. doi:10.3389/fpls.2013.00292
- Bodner G, Loiskandl W, Hartl W, Erhart E, Sobotik M (2019) Characterization of Cover Crop Rooting Types from Integration of Rhizobox Imaging and Root Atlas Information. *Plants* 8. doi:10.3390/plants8110514
- Han E, Kautz T, Perkons U, Lüsebrink M, Pude R, Köpke U (2015a) Quantification of soil biopore density after perennial fodder cropping. *Plant and Soil* 394:73–85. doi:10.1007/s11104-015-2488-3
- Han E, Kautz T, Perkons U, Uteau D, Peth S, Huang N, Horn R, 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. doi:10.1007/s00374-015-1032-1
- Kätterer T, Bolinder MA, Andrén O, Kirchmann H, Menichetti L (2011) Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 141:184–192. doi:10.1016/j.agee.2011.02.029
- Kautz T (2015) Research on subsoil biopores and their functions in organically managed soils: A review. *Renewable Agriculture and Food Systems* 30:318–327. doi:10.1017/S1742170513000549
- 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 (2022) Ein Blick auf die Wurzeln – Wurzelforschung: Untersuchungen bei Zwischenfruchtmischungen. *Lumbrico*, 12: 23-27.
- 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 (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
- Kemper R, Oltmanns M, Brock C, Stumm C, Döring T, Athmann M (2024) Wurzel- und Sprosstrockenmasse von Zwischenfrüchten und Futterpflanzen Beiträge zur 17. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Gießen.
- Kemper, R (2024): Root growth of sole and mixed cover crops in organic farming. Dissertation. Universität Bonn.
- Perkons UK (2018) Bioporengeneese durch homo- und allorhize Kulturpflanzen: Einfluss auf das Wurzelwachstum der Nachfrüchte. Dissertation. Universität Bonn, Bonn
- Kemper Roman, Seidel Sabine, Hadir Sofia, Schmittmann Oliver, Oltmanns Meike, Brock Christopher, Legner Nicole, Göbel Marc-Oliver, Peth Stephan (unveröffentlicht): Abschlussbericht des Verbundprojektes Fruchtfolgen für optimierte Nutzung der Bodenressourcen: Mischbau allorhizer und homorhizer Arten zur komplementären Durchwurzelung des Ober- und Unterbodens (MIKODU)
- Xiong P, Zhang Z, Peng X (2022) Root and root-derived biopore interactions in soils: A review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. doi:10.1002/jpln.202200003
- Zhang Z, Peng X (2021) Bio-tillage: A new perspective for sustainable agriculture. *Soil and Tillage Research* 206:104844. doi:10.1016/j.still.2020.104844

Tabelle 3: Versuchsvarianten der beiden Zwischenfrucht-Versuche am Wiesengut

2018/2019

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

Blaue Lupine + Grünroggen (60 + 60 kg/ha)

Ölrettich + Inkarnatklée + Grünroggen (8,5+ 10 + 40 kg/ha)
RigoITR (DSV) - 22 kg/ha

2019/2020

Kontrolle (ohne Zwischenfrucht, unkrautfrei)
Phacelia (Sorte Beehappy (DSV) - 12 kg/ha)
Ölrettich (Sorte Silentina (Petersen) - 25 kg/ha)

Winterrübsen (Sorte Jupiter (Petersen) - 15 kg/ha)
Sandhafer (Sorte Pratex (Petersen) - 80 kg/ha)
Grünroggen (Sorte Bonfire (DSV) - 120 kg/ha)
Blaue Lupine (Sorte Boruta (Bingenheimer) - 120 kg/ha)
Inkarnatklée (Sorte Linakarus (DSV) - 30 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 (90 + 30 kg/ha)
Ölrettich + Inkarnatklée + Grünroggen (8,5+ 10 + 40 kg/ha)