

# **Phosphoraufnahme und -mobilisierungspotenziale von drei Zwischenfrucht-Gemengen im ökologischen Ackerbau - Ergebnisse eines Praxis-Feldversuchs (Auersthal, Niederösterreich)**

## ***Phosphorus Uptake and Mobilization Potential of Three Cover Crop Mixtures in Organic Arable Farming - Outcomes from an On-Farm Field Trial (Auersthal, Lower Austria)***

Lili Bauer, Andreas Surböck, Gabriele Gollner

### ***Einleitung***

Die Verfügbarkeit von Phosphor (P) zählt im ökologischen Ackerbau zu den zentralen limitierenden Faktoren, insbesondere aufgrund der eingeschränkten Verfügbarkeit außerbetrieblicher P-haltiger Düngemittel. Der Anbau von P-mobilisierenden Zwischenfrüchten (ZF) wird daher in Forschung und Praxis intensiv diskutiert, da er ein vielversprechender Ansatz zur Mobilisierung von im Boden gebundenem Phosphor darstellt. Zwischenfrüchte können so zu einer effizienteren Nutzung vorhandener P-Reserven beitragen und gleichzeitig betriebsinterne Nährstoffkreisläufe stärken und schließen. Der primäre Beitrag von Zwischenfrüchten zur P-Verfügbarkeit erfolgt über deren P-Aufnahme in Spross und Wurzel sowie der anschließenden P-Mobilisierung aus ihren Rückständen. Die Erkenntnislage zum P-Aufnahme- und Mobilisierungspotenzial von Zwischenfruchtgemengen ist jedoch bislang wenig umfassend (Lavergne et al., 2021), insbesondere hinsichtlich der Rolle der Wurzeln. Ziel dieser Masterarbeit war es, ausgewählte Zwischenfrucht-Gemenge zur P-Aufnahme und zum P-Mobilisierungspotenzial unter Praxisbedingungen im ökologischen Ackerbau zu untersuchen. Anhand eines Praxis-Feldversuchs mit drei unterschiedlichen ZF-Gemengen am Standort Auersthal (Niederösterreich) wurde untersucht, in welchem Umfang P in der Wurzel- und Sprossmasse der Zwischenfrüchte aufgenommen wird und welche Bedeutung dies für die P-Verfügbarkeit für nachfolgende Kulturen haben kann. Die Beurteilung des Mobilisierungspotenzials erfolgte auf Basis von Bodenuntersuchungen sowie der quantifizierten P-Aufnahme der ZF in Spross- und Wurzelbiomasse. Diese Masterarbeit war Teil des EIP-Forschungsprojekts PhosVer („Verbesserte Beurteilung der Nährstoffversorgung für biologisch wirtschaftende Betriebe am Beispiel Phosphor“, Projektlaufzeit 2022–2025), das die P-Dynamik im ökologischen Ackerbau untersucht. Im Rahmen dieses Projekts wurden auf 6 Bio-Betrieben und 1 konventionellem Betrieb in Nieder- und Oberösterreich von 2022-2024 Praxis-Feldversuche mit verschiedenen ZF-Gemengen durchgeführt, mit dem Ziel, das Potenzial von ZF-Gemengen für die P-Mobilisierung zu untersuchen, sowie Landwirt:innen eine praxisnahe Entscheidungshilfe zur Abschätzung ihres P-Mobilisierungspotentials zu bieten.

### ***Material und Methoden***

**Standort und Boden:** Die Zwischenfrucht-Gemenge wurden im Rahmen eines On-farm-Feldversuchs rund 35 km nordöstlich von Wien auf 190 m ü. M. angebaut und untersucht. Die drei ZF-Varianten wurden in jeweils dreifacher Wiederholung auf 300 m<sup>2</sup> großen Parzellen am 18.08.2023 ausgesät. Die Vorfrüchte auf der Fläche waren Winterdurum (2023) - Zwischenfrucht-Gemenge (2022) -Dinkel (2022), und als Nachfrucht wurde Mais (2024) angebaut. Im Rahmen der Masterarbeit wurde die Zeitperiode von Juli 2023 bis Dezember 2023 untersucht. Das Projekt PhosVer umfasste einen längeren Fruchtfolgeausschnitt, d.h. die Zeitperiode von Aussaat der Zwischenfrüchte 2022 bis zur Ernte von Mais 2024. Der vorliegende Bodentyp ist ein Tschernosem, die Bodenart ist schluffiger Lehm mit ca. 30 % Ton- und 45 % Schluff-Anteil. Der Boden am Standort wird als (stark) kalkhaltig, tiefgründig sowie als trocken bis mäßig feucht eingestuft, mit einem Boden-pH-Wert von 7,6. Der durchschnittliche

$P_{CAL}$  (Calcium-Acetat-Lactat)-Gehalt lag bei 21,63 mg/kg Boden zu Versuchsbeginn im Juli 2022, was der Gehaltsklasse „sehr niedrig“ entspricht (BMLRT, 2022). Der Versuchsstandort unterliegt dem kontinentalen, gemäßigten Klima im pannonischen Raum mit einer Durchschnittstemperatur (1991–2020) von 10,4 °C und einer durchschnittlichen jährlichen Niederschlagsmenge von 526 mm (GeoSphere Austria, 2024). Im Versuchsjahr 2023 betrug die Jahresdurchschnittstemperatur 11,93 °C bei einer Gesamtniederschlagsmenge von 624 mm, jedoch mit sehr geringen Niederschlagsmengen um den Aussaatzeitpunkt und der gesamten Anbauperiode der Zwischenfrüchte.

**ZF-Varianten:** Insgesamt wurden drei ZF-Varianten mit 4, 8 bzw. 17 Arten untersucht. Die in der ZF-Variante 1 enthaltenen Arten umfassten die Brassicaceae Ölrettich (*Raphanus sativus* var. *oleiformis*) und Leindotter (*Camelina sativa*), die Leguminosen Sommerwicke (*Vicia sativa*), Futtererbse (*Pisum sativum*), Ackerbohne (*Vicia faba*) und Platterbse (*Lathyrus sativus*) sowie Ramtillkraut (*Guizotia abyssinica*) aus der Familie der Asteraceae und Phacelia (*Phacelia tanacetifolia*) als Vertreterin der Boraginaceae. ZF-Variante 2 bezeichnete die Mischung TERRALIFE® – MAISPRO TR 50 Mix, die von der Deutschen Saatveredelung AG (DSV) vertrieben wird und in der Praxis häufig Anwendung findet. Mit insgesamt 17 Arten war diese Mischung deutlich artenreicher als Variante 1 (8 Arten) und Variante 3 (4 Arten). Die Zusammensetzung umfasste etwa 46 % Leguminosen und 11 % Brassicaceae sowie Vertreter weiterer Pflanzenfamilien. Zu den darin enthaltenen Leguminosen zählten Alexandrinerklee (*Trifolium alexandrinum*), Felderbse (*Pisum sativum*), Inkarnatklee (*Trifolium incarnatum*), Perserklee (*Trifolium resupinatum*), Rotklee (*Trifolium pratense*), Schwedenklee (*Trifolium hybridum*), Sommerwicke (*Vicia sativa*), Winterwicke (*Vicia villosa*), Weißklee (*Trifolium repens*) und Serradella (*Ornithopus sativus*). Die Brassica-Arten waren durch Abessinischen Kohl (*Brassica carinata*) und Tiefenrettich (*Raphanus sativus* var. *longipinnatus*) vertreten. Weitere Bestandteile waren Ramtillkraut (*Guizotia abyssinica*) und Sonnenblume (*Helianthus annuus*) (Asteraceae), Öllein (*Linum usitatissimum*) (Linaceae), Phacelia (*Phacelia tanacetifolia*) (Boraginaceae) sowie Sorghum (*Sorghum bicolor*) als Vertreter der Poaceae (Deutsche Saatveredelung AG, 2023). Die ZF-Variante 3 setzte sich aus Senf (*Sinapis alba*), Kresse (*Lepidium sativum*) und Futterraps (*Brassica napus*) – alle aus der Familie der Brassicaceae – sowie Sudangras (*Sorghum bicolor* subsp. *sudanense*) aus der Familie der Poaceae zusammen.

**Methodik:** Die oberirdische Biomasse der ZF-Gemenge wurde auf 5 m<sup>2</sup> je Parzelle geerntet, Beikräuter wurden entfernt und die Frischmasse der ZF gewogen. Drei Teilproben wurden zur Bestimmung von C/N-Gehalt (Trocknung bei 60 °C), Elementgehalten (80 °C) und Trockensubstanz-Gehalt (105 °C) aufbereitet, getrocknet und vermahlen. Die artspezifische Biomasse wurde auf 2 m<sup>2</sup> je Parzelle separat erhoben. Zur Wurzelanalyse wurden zehn Bodenkerne (0–30 cm Tiefe, ø 10 cm) pro Parzelle entnommen, zunächst bei –18 °C gefroren und anschließend aufgetaut, die Wurzeln gewaschen, sortiert, getrocknet (60 °C für C/N, 105 °C für TM) und vermahlen. Zusätzlich wurden zwischen 20–40 Pflanzenwurzeln je Art pro Parzelle entnommen und analog zur Sprossmasse analysiert. Der Gesamtgehalt an C und N wurde per Elementaranalyse bestimmt. Die Nährstoffgehalte an P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn und B wurden mittels ICP-OES analysiert. Die Bodenbedeckung (%), die Bodenfeuchte (%) sowie der Beikrautdruck durch *Cirsium arvense* (Anzahl Pflanzen pro m<sup>2</sup>) wurden alle zwei Wochen über die gesamte Vegetationsperiode hinweg erfasst. Die Bodenbedeckung wurde mittels digitaler Bildanalyse, die Bodenfeuchte mit einem HydraGO-Flex-Sensor und der Beikrautdruck durch Auszählung der Pflanzen dokumentiert. Die statistische Auswertung der Versuchsparameter erfolgte mit der Software R und RStudio. Die Nullhypothesen wurden mithilfe von Signifikanztests auf einem Signifikanzniveau von 5 % überprüft. Zur Analyse wurden je nach Datenverteilung und Varianzhomogenität ANOVA, Welch-ANOVA, Kruskal-Wallis-Tests sowie Post-hoc-Tests verwendet.

## **Ergebnisse und Diskussion**

Die drei untersuchten ZF-Varianten unterschieden sich signifikant in Trockenmasse und Gesamt-P-Aufnahme, jedoch nicht in der P-Konzentration in Spross und Wurzel (siehe Tabelle 1). Variante 1 (8 Arten) erreichte mit 2.330 kg ha<sup>-1</sup> in der Gesamt-Biomasse und mit 4,3 kg ha<sup>-1</sup> P-Aufnahme gesamt die höchsten Werte. Damit lag die erzielte Biomasse und P-Aufnahme aller Varianten deutlich unter den in anderen Studien berichteten Werten von bis zu 30 kg ha<sup>-1</sup> (Wendling et al., 2016; Heuermann et al., 2022), was vor allem auf die trockene Witterung während der Wachstumsphase und den späten Aussaatzeitpunkt zurückzuführen ist. Auffallend ist, dass die maximale Bodenbedeckung aller Varianten bereits Ende September erreicht wurde. Trotz der geringsten Biomasse zeigte Variante 3 die

höchsten Phosphorkonzentrationen in Spross und Wurzel, was mit den hohen P-Gehalten der in der Mischung enthaltenen Arten übereinstimmt, jedoch waren diese Unterschiede zu den anderen Varianten statistisch nicht signifikant. Insgesamt wurde die Gesamt-P-Aufnahme der ZF-Varianten jedoch vorrangig durch die Biomasseentwicklung bestimmt (vgl. Finney et al., 2016; Liu et al., 2015), nicht durch die P-Konzentration. Auch die Bodenbedeckung, als Maß für die Biomasseentwicklung, war bei Variante 1 und 2 signifikant höher als bei Variante 3 und korrelierte stark mit der Spross- ( $r = 0,83$ ) und Wurzeltrockenmasse ( $r = 0,716$ ). Ein linearer Zusammenhang zwischen der Anzahl der Arten in einem Gemenge und der Biomasseentwicklung sowie Gesamt-P-Aufnahme war nicht nachweisbar. Vielmehr scheinen die funktionelle Komplementarität sowie die Auswahl standortgeeigneter Arten entscheidend. Die Ergebnisse dieser Masterarbeit zeigen außerdem, dass die Wurzelbiomasse maßgeblich zur P-Aufnahme durch die Zwischenfrüchte beitrug, sowohl durch ihren hohen Anteil an der Gesamttrockenmasse (59–77 %) als auch durch relevante P-Konzentrationen (1,54–1,86 g/kg) in den Wurzeln. In allen Varianten entfiel der größere Anteil des aufgenommenen Phosphors auf die Wurzel, im Vergleich zum Spross. Damit wird die in vielen Studien (z. B. Finney et al., 2016; Liu et al., 2015) häufige Fokussierung auf die Sprosstrockenmasse zumindest teilweise hinterfragt. Auch andere Arbeiten bestätigen die zentrale Rolle der Wurzelbiomasse für die Nährstoffaufnahme und das Mobilisierungspotenzial (Heuermann et al., 2022; Kemper et al., 2023). Literaturangaben zur P-Aufnahme in den Wurzeln variieren stark und zeigen teils deutliche Unterschiede zwischen Kulturen (z. B. Heuermann et al., 2019; Franchini et al., 2004). Darüber hinaus belegen mehrere Studien (z. B. Gentsch et al., 2020), dass Mischungen gegenüber Reinkulturen tendenziell höhere Wurzeltrockenmassen aufweisen. Insgesamt deuten die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit darauf hin, dass zur besseren Bewertung des P-Aufnahmevermögens von Zwischenfruchtgemengen die Wurzeltrockenmasse stärker berücksichtigt werden sollte.

Die untersuchten Boden-P-Gehalte (wasserlösliches P,  $P_{CAL}$ , Phosphatase-Aktivität) zeigten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Zwischenfruchtvarianten und konnten die in Biomasse und P-Aufnahme beobachteten Effekte statistisch nicht bestätigen. Ein Anstieg des  $P_{CAL}$ -Gehalts um 6,9 mg/kg über den Versuchszeitraum weist jedoch auf einen möglichen Effekt des Zwischenfruchtanbaus hin, auch wenn eine sichere Zuordnung zur P-Mobilisierung nicht möglich ist. Unterschiede zwischen den Varianten waren auffällig, aber nicht signifikant.

Alle Varianten lagen mit ihren C/P-Verhältnissen unter dem Schwellenwert von 300:1, was grundsätzlich auf ein gegebenes P-Mobilisierungspotenzial hindeutet. Die Variante 3 zeigte sowohl im Spross als auch in der Wurzel die engsten C/P-Werte, jedoch bei der geringsten Gesamt-P-Aufnahme. Offen bleibt, wie die Phosphormobilisierung und -mineralisierung der im Wurzelgewebe gebundenen Phosphorverbindungen im Boden verläuft und wieviel von diesem Phosphor für die nachfolgende Kulturpflanzen tatsächlich verfügbar wird.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse im Praxisversuch Auersthal 2023 für die Varianten 1, 2 und 3

Untersuchungsparameter	Einheit	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Spross TM	kg ha <sup>-1</sup>	947 <sup>a</sup>	688 <sup>b</sup>	300 <sup>c</sup>
Wurzel TM	kg ha <sup>-1</sup>	1382 <sup>a</sup>	1362 <sup>a</sup>	983 <sup>b</sup>
Gesamt TM	kg ha <sup>-1</sup>	2329 <sup>a</sup>	2050 <sup>a</sup>	1283 <sup>b</sup>
max. Bodenbedeckung	%	55 <sup>a</sup>	48 <sup>b</sup>	33 <sup>c</sup>
P-Konz. Spross	g/kg	1,79 <sup>a</sup>	2,34 <sup>a</sup>	2,91 <sup>a</sup>
P-Konz. Wurzel	g/kg	1,54 <sup>a</sup>	1,77 <sup>a</sup>	1,86 <sup>a</sup>
C/P Spross	-	218:1	185:1	146:1
C/P Wurzel	-	244:1	286:1	221:1
C/N Spross	-	15:1	29:1	20:1
C/N Wurzel	-	26:1	31:1	34:1
P-Aufnahme Spross	kg ha <sup>-1</sup>	1,696	1,607	0,873
P-Aufnahme Wurzel	kg ha <sup>-1</sup>	2,570	2,098	1,739
P-Aufnahme gesamt	kg ha <sup>-1</sup>	4,270	3,705	2,612
$P_{wasserlöslich}$ (12/2023)	mg/kg	0,43 <sup>a</sup>	0,36 <sup>a</sup>	0,36 <sup>a</sup>
$P_{CAL}$ (12/2023)	mg/kg	31,5 <sup>a</sup>	27,5 <sup>a</sup>	26,5 <sup>a</sup>
Phosphatase-Aktivität	nmol g <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>	67,2 <sup>a</sup>	82,3 <sup>a</sup>	59,4 <sup>a</sup>

Legende: TM: Trockenmasse; Werte mit unterschiedlichen hochgestellten Buchstaben unterscheiden sich signifikant voneinander ( $p < 0,05$ )

Die vorliegenden Ergebnisse (nicht dargestellt) zu den einzelnen Arten in den ZF-Gemengen zeigen deutliche Unterschiede im P-Aufnahme und P-Mobilisierungspotenzial zwischen den Arten in den Varianten 1 und 3. Besonders hervorzuheben ist der Ölrettich, der sich durch eine hohe Biomasse, überdurchschnittliche P-Konzentration sowie ein günstiges C/P-Verhältnis auszeichnete. Ramtillkraut zeigte bei geringer Biomasse mit Abstand die höchste P-Konzentration im Spross. In Variante 3 wies das Sudangras mit 60 % Anteil an der Sprosstrockenmasse (40 % Saatgutanteil) und P-Konzentrationen von 1,49 g/kg (Wurzel) und 3,35 g/kg (Spross), offenbar relativ unabhängig von den Standortbedingungen (vgl. Wendling et al., 2016), auf ein hohes P-Mobilisierungspotenzial hin. Insgesamt zeigten die Untersuchungen der einzelnen Arten keine signifikante Korrelation zwischen der P-Konzentration in Wurzel- ( $p = 0,64$ ) und Sprosstrockenmasse, was die Relevanz separater Wurzelanalysen verdeutlicht. Die Bewertung der Arten ist aufgrund des fehlenden Anbaus in Reinkulturen nur eingeschränkt aussagekräftig.

### **Zusammenfassung**

Phosphor (P) gilt als limitierte Ressource aufgrund global begrenzter Vorkommen in Lagerstätten. Daher ist eine effizientere und nachhaltige Nutzung auch in der ökologischen Landwirtschaft erforderlich. Der Anbau von Zwischenfrucht-Gemengen im ökologischen Landbau stellt eine mögliche Strategie dar, um innerbetrieblich P aus dem Boden zu mobilisieren und so die P-Verfügbarkeit und -effizienz zu verbessern. In der vorliegenden Arbeit wurden in einem Praxis-Feldversuch in Auersthal im Jahr 2023 in Niederösterreich drei Zwischenfrucht-Gemenge mit 4, 8 und 17 Arten, unter P-limitierten Bedingungen angebaut und hinsichtlich ihrer P-Aufnahme und ihres Potenzials zur P-Mobilisierung untersucht. Hierfür wurden die Spross- und Wurzelbiomasse, die Phosphor-, Kohlenstoff- und Stickstoffkonzentrationen, die Boden-Phosphor-Gehalte, sowie die Bodenbedeckung und die Bodenfeuchte der drei Zwischenfrucht-Gemenge untersucht. Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten wurden für die Wurzel- und Sprosstrockenmasse, die Gesamt-P-Aufnahme sowie die Bodenbedeckung festgestellt. Variante 1 (8 Arten: Sommerwicke, Ackerbohne, Futtererbse, Platterbse, Ramtillkraut, Ölrettich, Leindotter und Phacelia) konnte insgesamt  $4,27 \text{ kg ha}^{-1}$  P in der Spross- und Wurzelrockenmasse aufnehmen, was 14 % mehr als Variante 2 (17 Arten) und 40 % mehr als Variante 3 (4 Arten) entspricht. Es konnte ebenfalls festgestellt werden, dass die Biomassemenge gegenüber der P-Konzentration im Pflanzengewebe die Gesamtaufnahme an P maßgeblich beeinflusst hat und dass bei allen Varianten die Wurzelbiomasse einen höheren Anteil an der Gesamt-P-Aufnahme stellte als die Sprossbiomasse. Generell wurde die ungünstige Entwicklung der Zwischenfrüchte aufgrund der trockenen Witterungsbedingungen um den Aussaatzeitpunkt und des späten Aussaattermines deutlich, sowohl durch die geringe Bodenbedeckung von maximal 55 % sowie der geringen Trockenmasse von maximal  $2330 \text{ kg ha}^{-1}$ . Die Ergebnisse der weiteren Praxisversuche in NÖ und OÖ werden im Rahmen von weiteren Veröffentlichungen des Projektes PhosVer präsentiert.

### **Abstract**

Phosphorus (P) is considered a limited resource due to globally limited deposits. Therefore, a more efficient and sustainable use also in organic agriculture is required. The cultivation of catch crops in organic farming is a promising strategy to mobilize phosphorus from soils at field level and thus improve phosphorus availability and efficiency. The current knowledge on the potential of cover crops for phosphorus mobilization is limited, especially with regard to the contribution made by roots. In the present study, three cover crop mixtures (4, 8 and 17 species) were grown under phosphorus-limited conditions in a field experiment in Lower Austria in 2023 and investigated regarding their phosphorus uptake and their potential for phosphorus mobilization. For this purpose, the shoot and root biomass of the three cover crop mixtures, the phosphorus, carbon and nitrogen concentrations and ratios, the three soil P contents water-soluble P,  $P_{\text{CAL}}$ , phosphatase activity as well as the soil cover and soil moisture were examined. Significant differences between the three variants were found for root and shoot dry matter, total P uptake and ground cover. Variant 1 (with these 8 species: camelina, common vetch, fava bean, common pea, grass pea, niger, oil seed radish and phacelia) was able to take up a total of  $4.27 \text{ kg ha}^{-1}$  of phosphorus in the dry shoot and root mass, which corresponds to 14 % more than variant 2 (17 species) and 40 % more than variant 3 (4 species). It was also found that the amount of biomass had a

significant influence on the total uptake of phosphorus compared to the P concentration in the plant tissue and that the roots accounted for a higher proportion of the total uptake than the shoot biomass in all variants. The low development of the catch crops, which is shown by the low maximum coverage of 55 % and the low maximum dry matter of 2330 kg ha<sup>-1</sup> compared to other studies, is attributed to the dry weather conditions as well as the relatively late sowing date. The results of the additional field trials in Lower and Upper Austria will be presented in further publications of the PhosVer project.

## Literatur

BMLRT. (2022). Richtlinie für die sachgerechte Düngung im Ackerbau und Grünland. Eigenverlag: Wien.

Deutsche Saatveredelung AG. (2023). Produktbeschreibung: TERRALIFE®—MAISPRO TR 50. <https://www.dsvsaaten.de/pdf/sorte/2764>

Finney, D. M., White, C. M., & Kaye, J. P. (2016). Biomass Production and Carbon/Nitrogen Ratio Influence Ecosystem Services from Cover Crop Mixtures. *Agronomy Journal*, 108(1), 39–52. <https://doi.org/10.2134/agronj15.0182>

Franchini, J. C., Pavan, M. A., & Miyazawa, M. (2004). Redistribution of phosphorus in soil through cover crop roots. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 47(3), 381–386. <https://doi.org/10.1590/S1516-89132004000300007>

Gentsch, N., Boy, J., Batalla, J. D. K., Heuermann, D., Von Wirén, N., Schweneker, D., Feuerstein, U., Groß, J., Bauer, B., Reinhold-Hurek, B., Hurek, T., Céspedes, F. C., & Guggenberger, G. (2020). Catch crop diversity increases rhizosphere carbon input and soil microbial biomass. *Biology and Fertility of Soils*, 56(7), 943–957. <https://doi.org/10.1007/s00374-020-01475-8>

GeoSphere Austria. (2024). Messstationen Tagesdaten [dataset]. <https://doi.org/10.60669/GS6W-JD70>

Heuermann, D., Gentsch, N., Boy, J., Schweneker, D., Feuerstein, U., Groß, J., Bauer, B., Guggenberger, G., & von Wirén, N. (2019). Interspecific competition among catch crops modifies vertical root biomass distribution and nitrate scavenging in soils. *Scientific Reports*, 9(1), 11531. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48060-0> 74

Heuermann, D., Gentsch, N., Guggenberger, G., Reinhold-Hurek, B., Schweneker, D., Feuerstein, U., Heuermann, M. C., Groß, J., Kümmerer, R., Bauer, B., & Von Wirén, N. (2022). Catch crop mixtures have higher potential for nutrient carry-over than pure stands under changing environments. *European Journal of Agronomy*, 136, 126504. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126504>

Kemper, R., Döring, T. F., 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*. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06240-y>

Lavergne, S., Vanasse, A., Thivierge, M., & Halde, C. (2021). Using fall-seeded cover crop mixtures to enhance agroecosystem services: A review. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 4(2), e20161. <https://doi.org/10.1002/agg2.20161>

Liu, J., Bergkvist, G., & Ulén, B. (2015). Biomass production and phosphorus retention by catch crops on clayey soils in southern and central Sweden. *Field Crops Research*, 171, 130–137. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.11.013>

Wendling, M., Büchi, L., Amossé, C., Sinaj, S., Walter, A., & Charles, R. (2016). Influence of root and leaf traits on the uptake of nutrients in cover crops. *Plant and Soil*, 409(1–2), 419–434. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-2974-2>

Das EIP-AGRI Projekt Phosver „Verbesserte Beurteilung der Nährstoffversorgung für biologisch wirtschaftende Betriebe am Beispiel Phosphor“ wurde durch EU, Bund und Länder im Rahmen des Österreichischen Programms für Ländliche Entwicklung „Europäischer Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums: Hier investiert Europa in die ländlichen Gebiete“ 2014-2020 gefördert.

### ***Adressen der Autoren***

Institut für Ökologischen Landbau, Gregor-Mendel-Haus, Gregor-Mendel-Straße 33, 1180 Wien

\*Ansprechpartner: MSc. Lili Bauer ([lili.bauer@boku.ac.at](mailto:lili.bauer@boku.ac.at))

Ansprechpartner Projekt PhosVer: Dr. Gabriele Gollner ([gabriele.gollner@boku.ac.at](mailto:gabriele.gollner@boku.ac.at))