

Die agronomische Wirksamkeit von P-Düngemitteln aus rezyklierten Nährstoffströmen

Sylvia Kratz & Paul Keßeler

JKI Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde

Tagung des Verbandes der Landwirtschaftskammern e.V. (VLK) und des Bundesarbeitskreises Düngung (BAD)
am 25./26.04.2023 in Würzburg

Gliederung

Einflussfaktoren auf die agronomische Wirksamkeit von Düngemitteln

Methoden zur Abschätzung der Wirksamkeit von P-Düngemitteln

- Standardisierte chemische Extraktionsmethoden
- Mögliche Alternativen
- Vegetationsversuche

Neuere Forschungsarbeiten des JKI zur agronomischen Bewertung von Düngemitteln aus rezyklierten Nährstoffströmen – Schwerpunkt Struvitdünger

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Zitierte Referenzen



Foto: E. Bloem

Einflussfaktoren auf die agronomische Wirksamkeit von Düngemitteln

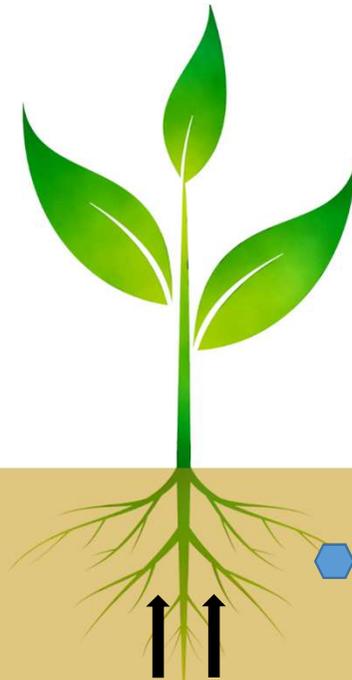


Pflanze:

- Art / Varietät
- P-Bedarf und P-Aneignungsvermögen
- Wurzeigenschaften
- Ausscheidung von Protonen, org. Säuren und Phosphatasen
- Mykorrhizierung

Düngemittel:

- P-Bindungsformen und deren chemische Löslichkeit
- Physikalische Form/Konfektionierung



Gelöstes
Orthophosphat



Labiles
Phosphat



Stabiles
Phosphat

Boden: pH-Wert / Kalkgehalt, Textur / Tongehalt, organische Substanz, Fe/Al-(Hydr)oxide, Bodenfeuchte, **Bodenmikrobiom/mikrobielle Aktivität** etc.

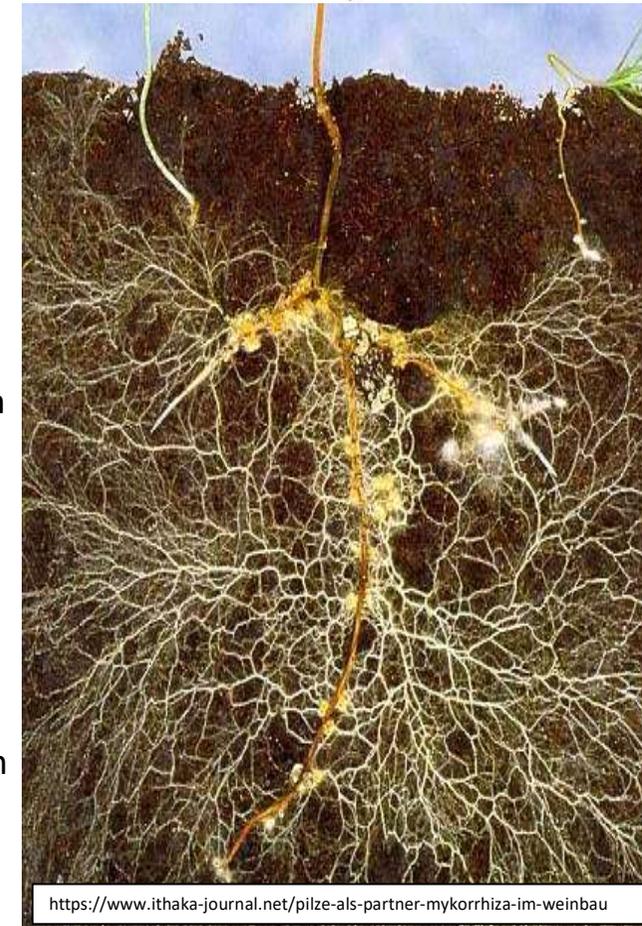
Einflussfaktoren auf die agronomische Wirksamkeit von P-Düngemitteln: P-Bindungsformen (Kratz et al., 2019)



P-Bindungsformen	Vorhanden in ... (Beispiele)	Pflanzenverfügbarkeit
Mono-Calcium-Phosphat (MCP)	(Triple)superphosphat	+
Di-Calcium-Phosphat (DCP)	Wirtschaftsdünger (WD), Klärschlamm (KS)	+
Tri-Calcium-Phosphat (TCP) / Whitlockit	Klärschlammmasche (KSA), Biomasseaschen, Carbonisate	+/- (abhängig von chemischer Zusammensetzung, Kristallisationsgrad, Boden-pH)
Octo-Calcium-Phosphat (OCP)/ Apatite	Rohphosphat, WD, KS, Fleischknochenmehl, KSA	+/- (abhängig von Kristallisationsgrad, Korngröße, Boden-pH)
Ammonium-Phosphat	MAP, DAP	+
Magnesium-Ammonium-Phosphat	Struvit	+
Ca Na (Silico) Phosphate	Rhenania-Phosphat, thermochemisch behandelte KSA („Rhenania AshDec“)	+
Al/Fe-Phosphate sowie an Al/Fe-(Hydr)oxide sorbiertes P	KS / KSA, WD	+/- (abhängig von chemischer Zusammensetzung, Kristallisationsgrad, Boden-pH)
Anorganische Polyphosphate	Einzelne (flüssige) mineralische Mehrnährstoffdünger	+ (nach Hydrolyse, innerhalb weniger Tage)
Organische Bindungsformen (z.B. Phytinsäure/ Phytate, Phospholipide, organische Polyphosphate)	WD, EBPR*-KS *enhanced biological P removal	+/- (nach Hydrolyse/Mineralisierung, innerhalb weniger Tage bis Wochen)

Exkurs: Einfluss des Bodenmikrobioms auf die agronomische Wirksamkeit von P-Düngemitteln

- Bodenmikrobiom beeinflusst P-Verfügbarkeit im Boden/Rhizosphäre
- Bodenmikroorganismen (PSM) der Gattungen *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Aspergillus*, *Bacillus*, *Penicillium*, *Pseudomonas*, *Rhizobium* u.a. lösen P im Boden (Etesami et al., 2021)
- Arbuskuläre Mykorrhizapilze (AMF) erweitern das Wurzelsystem und erlauben der Pflanze die Erschließung und Ausnutzung eines größeren Wurzelraumes
- PSM bewegen sich entlang von Pilzhyphen zu P-Quellen im Boden und mineralisieren diese (Jiang et al., 2021)
- Nachweise einer verbesserten P-Verfügbarkeit / P-Aufnahme durch Einsatz von PSM **in vitro** in Vegetationsversuchen **mit Boden** oft nicht reproduzierbar, z.B.
 - Lekfeldt et al. (2016) *Bacillus amyloliquefaciens ssp. plantarum*, *Bacillus sp.*, *Penicillium sp.*, *Pseudomonas sp.*, *Trichoderma harzianum* / verschiedene P-Rezyklate / Winterweizen
 - Meyer et al. (2017) *Pseudomonas protegens* / Klärschlammasche / Weidelgras
 - Raymond et al. (2019a, 2019b) *Penicillium bilaiae* / Klärschlammasche / Weizen, Wintergerste
- Möglicherweise spielen PSM wichtigere Rolle bei der P-Mobilisierung für das Bodenmikrobiom und damit der Bereitstellung von labilem mikrobiell gebundenem P in längeren Zeiträumen (Raymond et al., 2021)
- **Weiterer Forschungsbedarf!**



<https://www.ithaka-journal.net/pilze-als-partner-mykorrhiza-im-weinbau>

www.julius-kuehn.de

Methoden zur Abschätzung der agronomischen Wirksamkeit von Düngemitteln (1): Standardisierte chemische Extraktionsmethoden



Chemische Extraktionsmethoden gemäß DüMV bzw. EU-VO 2019/1009:

- In Mineralsäure (MinA) lösliches P ($\text{H}_2\text{SO}_4+\text{HNO}_3$) (EN 15956)
- In 2% Ameisensäure (FA) lösliches P (nur Rohphosphate) (EN 15919)
- In 2% Zitronensäure (CA) lösliches P (EN 15920)
- In neutralem Ammoniumcitrat (NAC) lösliches P (EN 15957)
- In alkalischem Ammoniumcitrat (AAC) lösliches P (Petermann / Joulie) (EN 15921-15923)
- In Wasser + NAC (W+NAC) lösliches P (Fresenius-Neubauer)
- In Wasser (W) lösliches P (EN 15958)

Statische Laborprozeduren

Bestimmen momentane Löslichkeit zu einem definierten Zeitpunkt

Kein reales chemisches Gleichgewicht erreicht

Erfassen teilweise auch nicht pflanzenverfügbare P-Bindungsformen

P-Dynamik im System Boden/Pflanze nicht abgebildet



Methoden zur Abschätzung der agronomischen Wirksamkeit von Düngemitteln (1): Standardisierte chemische Extraktionsmethoden



Korrelation zwischen P-Aufnahme im Vegetationsversuch und chemischer P-Löslichkeit von Recyclingdüngern in Standardextraktionsmitteln

Reference	W	AAC	W+NAC	NAC	CA	FA
Schick (2009)	n.s.	n.s.	x	x	n.s.	n.s.
Kratz et al. (2010)	x	x	x	x	x	x
Wang et al. (2012)				n.s.	n.s.	x
Brod et al. (2015), Substrat 1	x				x	x
Brod et al. (2015), Substrat 2	n.s.				n.s.	n.s.
Zeggel et al. (2015)	n.s.	n.s.		x	n.s.	n.s.
Øgaard & Brod (2016)				n.s.	x	
Delin (2016)	x				n.s.	
Steckenmesser et al. (2017)	x			n.s.	n.s.	x
Duboc et al. (2017)	x			x	x	x
Meyer et al. (2017)	n.s.				x	

W = Wasser
 AAC = Alkal. Ammoniumcitrat
 NAC = Neutral Ammoniumcitrat
 CA = 2% Zitronensäure
 FA = 2% Ameisensäure

x = signifikante Korrelation
 n.s. = nicht signifikant

Oft keine signifikanten Korrelationen!

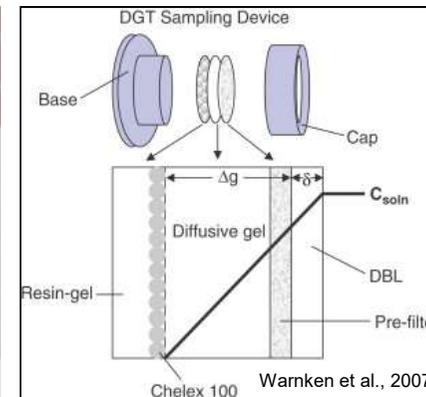
Kratz et al., 2019

www.julius-kuehn.de

Methoden zur Abschätzung der agronomischen Wirksamkeit von Düngemitteln (2): Mögliche Alternativen

Zielsetzung: Berücksichtigung der Dynamik von P-Retention, -Freisetzung und -Transport in gedüngten Böden unter dem Einfluss der P-Aufnahme durch Pflanzenwurzeln

- Grundprinzip: Verwendung von **Boden/Dünger-Gemischen**
- **Inkubation unter Standardbedingungen** (konstante Bodenfeuchte und Umgebungstemperatur, definierte Zeitspanne, z.B. 70% WHC, 20°C, 14-tägige Inkubationsperiode)
- P-Extraktion mit **Standard-Bodenextraktionsmitteln** (z.B. Wasser, CAL, Na-Bicarbonat) **oder** mit sog. **P-Senkenmethoden**, die die P-Aufnahme durch Wurzeln simulieren (z.B. DGT = diffusive gradients in thin films; Fe-Beutel-Methode)



Methoden zur Abschätzung der agronomischen Wirksamkeit von Düngemitteln (3): Vegetationsversuche

Experimentelle Designs für Gefäßversuchen zur Düngemittelprüfung unterscheiden sich stark:

- Testsubstrat (e.g. natürlicher Ober-/Unterboden, Quarzsand, künstliche Mischung)
- Substrateigenschaften (z.B. P-Versorgung, pH, organische Substanz, Textur)
- Substratmenge / Gefäßgröße
- Versuchspflanze
- Versuchsdauer/ Entwicklungsstadium bei Ernte
- Düngestrategie (Dosierung des Zielnährstoffs, Grunddüngung)



Foto: E. Bloem



Foto: J. Schick

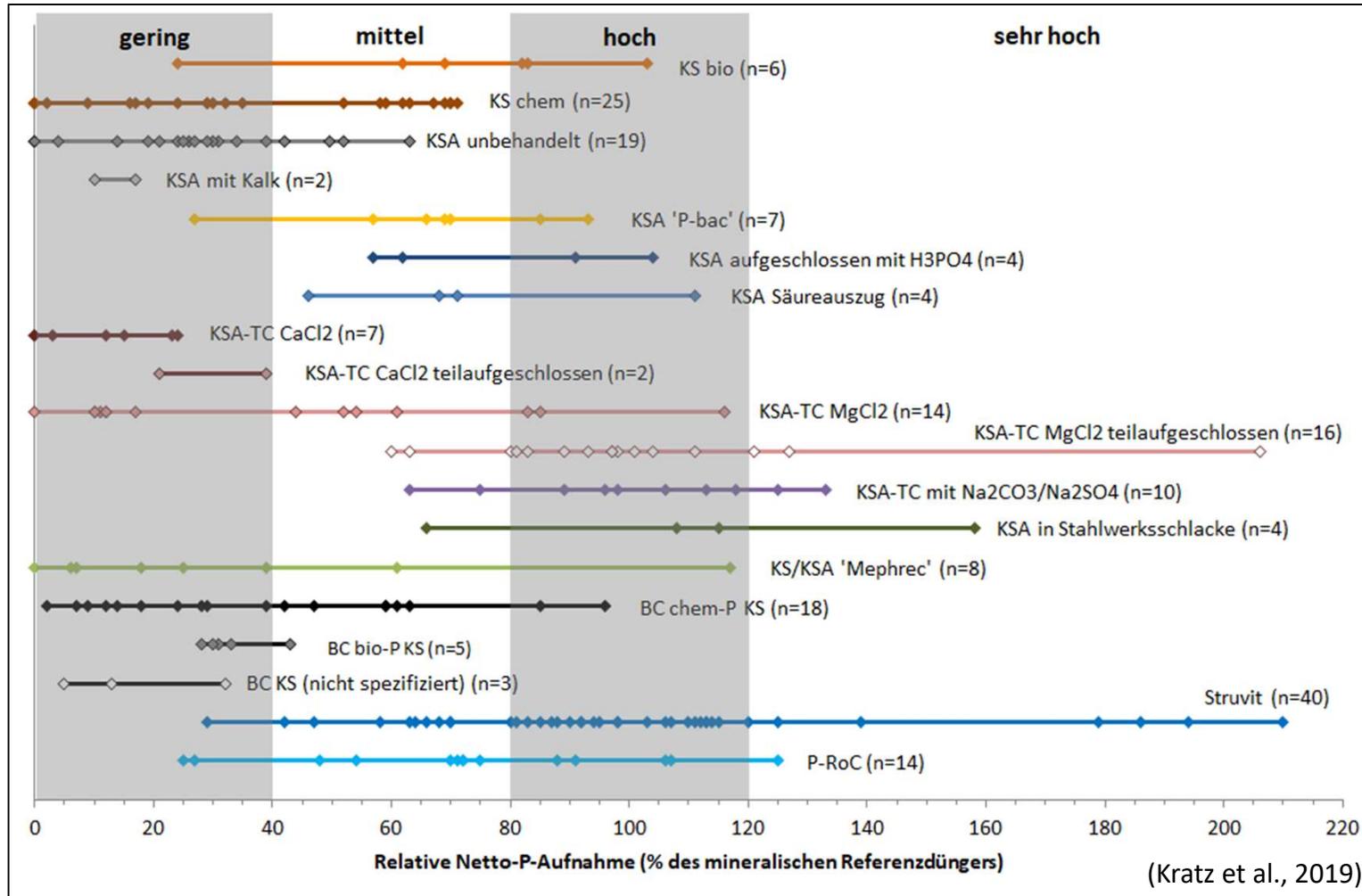


Foto: T. Pothoff



Foto: K. Panten

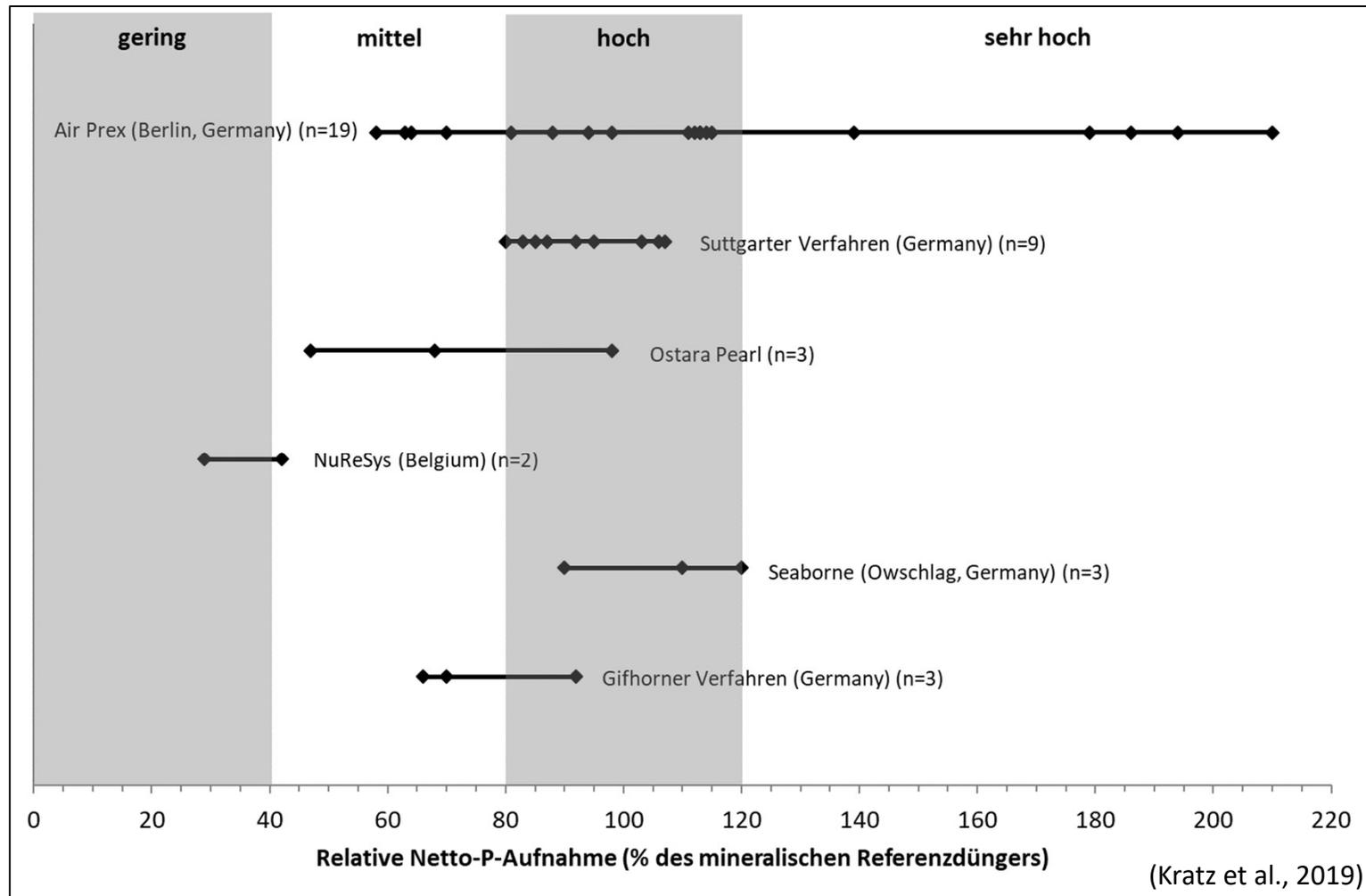
Relative Netto-P-Aufnahmen verschiedener P-Rezyklate in Gefäßversuchen nach Literaturangaben



KS = Klärschlamm
 KSA = Klärschlammasche
 BC = „Biochar“

Hohe Variabilität der Versuchsergebnisse in Abhängigkeit vom Versuchsdesign

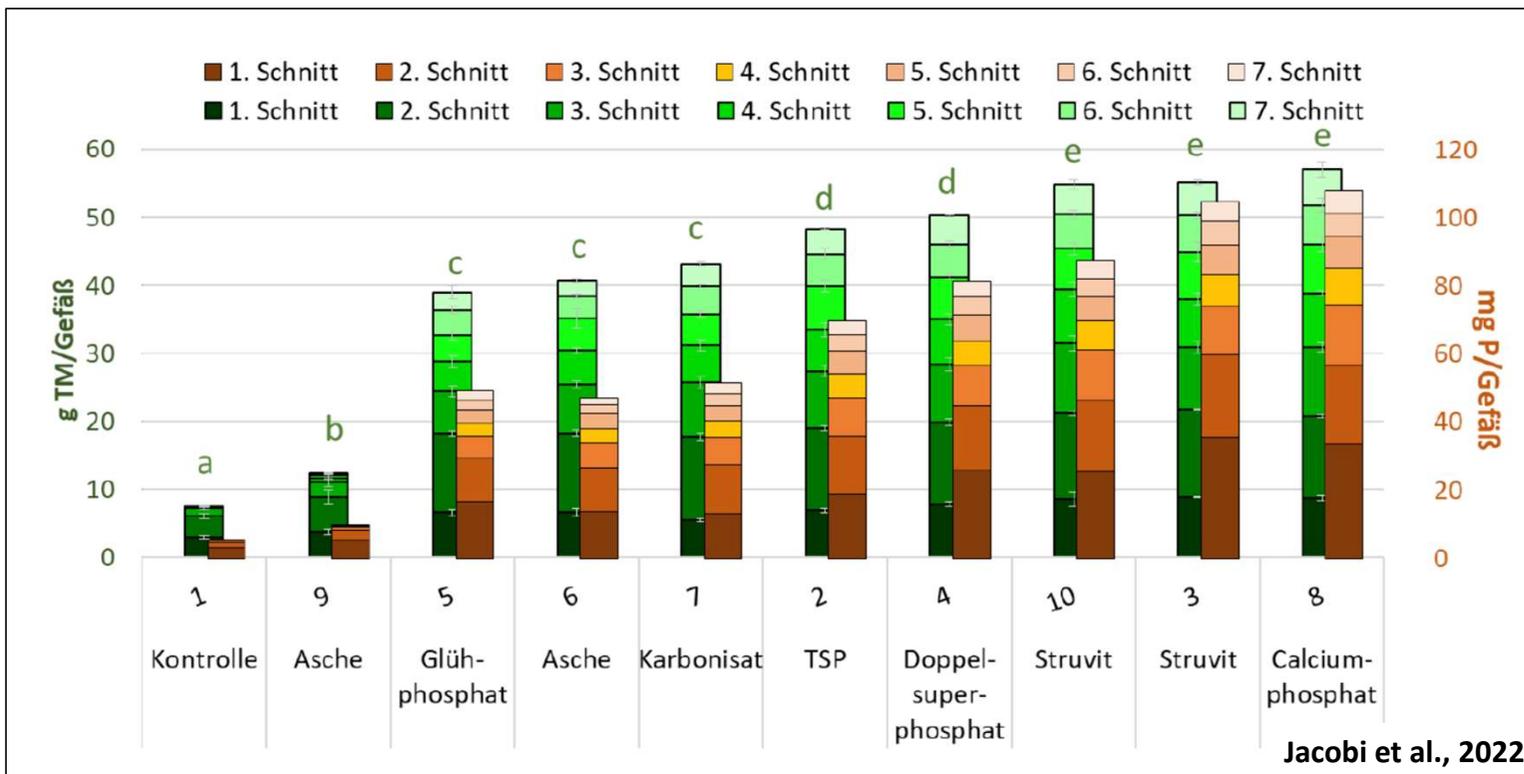
Relative Netto-P-Aufnahmen für verschiedene in Gefäßversuchen getestete Struvite



Hohe Variabilität der Versuchsergebnisse auch innerhalb eines Düngemitteltyps

→ Standardisiertes Versuchsdesign dringend erforderlich

Standardisierung von Gefäßversuchen für die Prüfung von P-Rezyklaten – das Bonner HGoTec Substrat im GV 2021 des Hessischen Landeslabors



Kumulierte TM-Erträge (grün) und P-Aufnahmen (braun) bei Düngung mit verschiedenen Klärschlamm-Rezyklaten (verschiedene Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen den TM-Erträgen)

HGoTec P0 Substrat:

- Mineralisch, „bodengleich“
- Mit chemischen Eigenschaften eines guten Ackerstandortes
- Nährstoffversorgung kann gezielt eingestellt werden
- Geringer verfügbarer P-Gehalt (1,75 mg P/100 g, Stufe B)
- Verfügbares K und Mg sehr hoch (Stufe E/F)
- pH leicht alkalisch (8,1)

Versuchsdesign:

- Mitscherlich Gefäße, 5 kg feuchtes Substrat
- Welsches Weidelgras
- Basisdüngung mit N und K

Standardisierung von Gefäßversuchen für die Prüfung von P-Rezyklaten – Ansatz des JKI (Kratz et al., 2021)



Zielsetzung:

1) Ein **standardisiertes Substrat**, das

- Einen möglichst **geringen Gehalt des Testnährstoffs** hat, um den Düngeeffekt zuverlässig isolieren zu können
- Jederzeit und überall (innerhalb Mitteleuropas) **gut reproduzierbar** ist, d.h. Komponenten in gleichbleibender Qualität langfristig verfügbar
- Die Möglichkeit bietet, **bodenbedingte Einflussfaktoren** auf die Pflanzenverfügbarkeit des Testnährstoffs **anzupassen** (pH-Wert, Textur/Tongehalt, organische Substanz)

2) Eine klar definiertes **experimentelles Design** mit

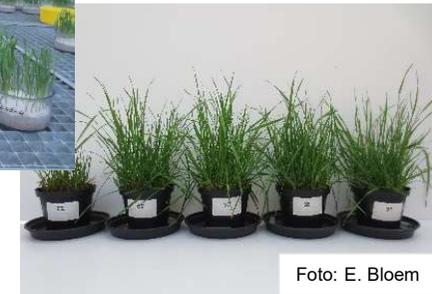
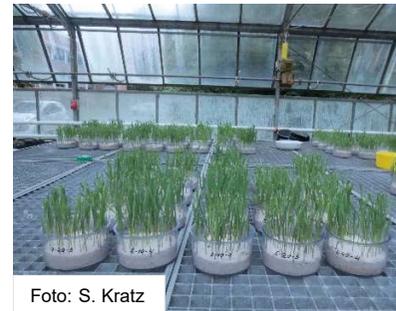
- **Optimalen Wachstumsbedingungen** für die in Mitteleuropa angebauten Hauptkulturarten
- Einer **Grunddüngestrategie**, die es ermöglicht, beobachtete Effekte zuverlässig dem Testnährstoff zuzuordnen
- Option zur Unterscheidung zwischen **kurz- und langfristigen Effekten**
- Einfacher **Handhabbarkeit** und geringstmöglichem **Betreuungsaufwand**

Standardisierung von Gefäßversuchen für die Prüfung von P-Rezyklaten – Laufende Forschungsarbeiten im JKI



Entwicklung eines künstlichen Substratgemisches mit standardisiertem Protokoll zur Wirkungsprüfung

- Seit 2016 mehrere kleinere Versuchsreihen zur Auswahl geeigneter Substratkomponenten und Optimierung des Versuchsdesign
- Substratkomponenten im GV 2021: Quarzsand (88 Gew.-%), Bentonit (10 Gew.-%), Schwarztorf/Rindenumus (2 Gew.-%)
- Einstellung des Ziel-pH (z.B. 5,5 / 6,5 / 7,0) mit CaCO_3 p.a.
- Testpflanze: bisher *Lolium multiflorum*, Versuche mit weiteren (dikotylen) Kulturarten geplant
- Definierte Gefäßgröße/Füllmenge: 1200 cm³ / 2 kg Substrat
- Referenzdünger: weicherdiges Rohphosphat und TSP
- P-Düngung: 85% der erwarteten P-Aufnahme
- Basis/Ausgleichsdüngung mit allen Nährstoffen außer P im Überschuss

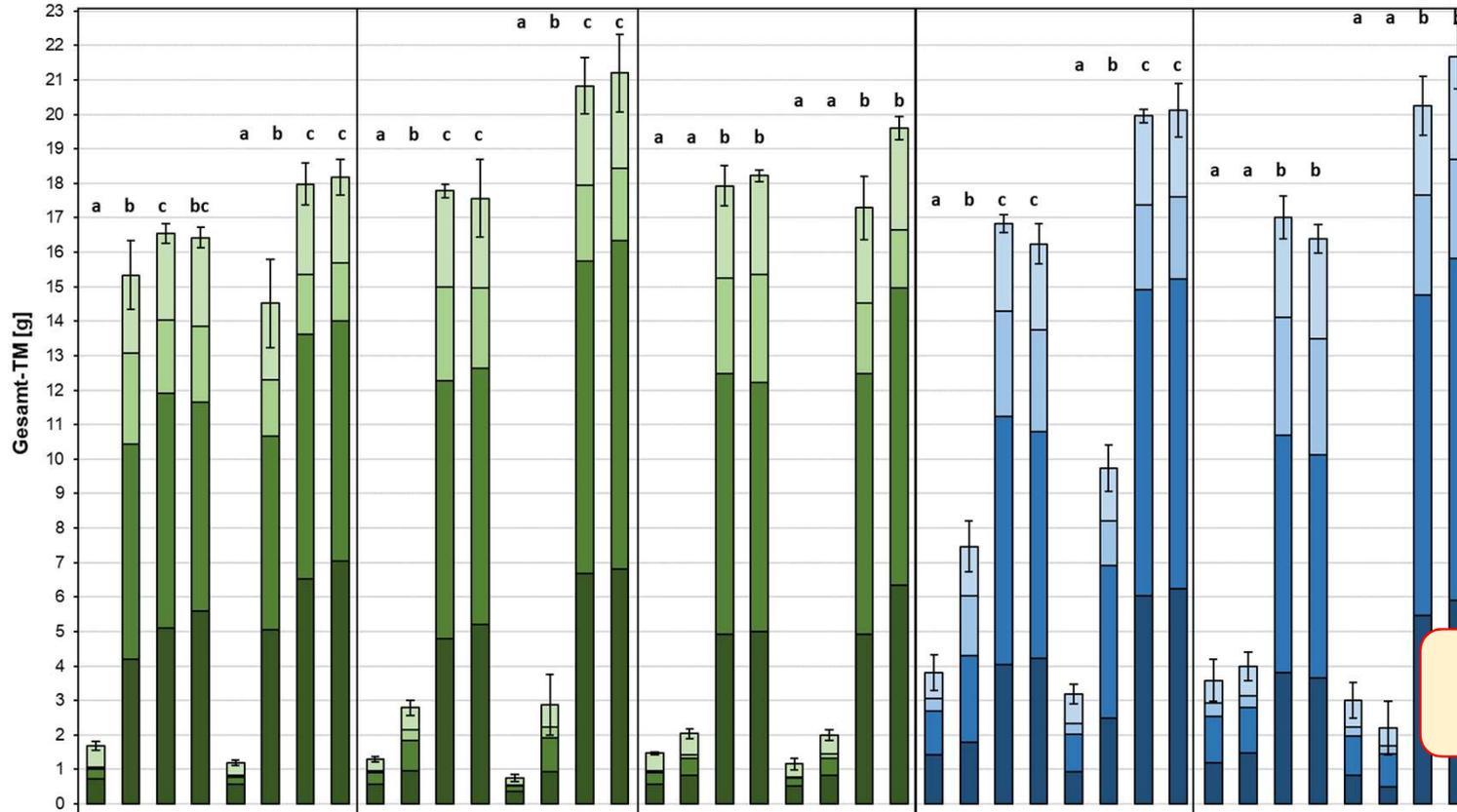


BMBF Forschungsprojekt „RePhoR – P-Net“



- **Verbundprojekt „RePhoR - P-Net: Aufbau eines Netzwerks zum ressourceneffizienten Phosphor-Recycling und -Management in der Region Harz und Heide“**
- **Laufzeit:** 01.07.2020 - 30.06.2025
- **Koordination:** Technische Universität Carolo-Wilhelmina, Braunschweig (Prof. Dr. Thomas Dockhorn)
- **Ziele:**
 - Aufbau eines regionalen Netzwerks zum P-Recycling (Schwerpunkt: Struvit)
 - Verfahrenstechnische Optimierung der P-Rückgewinnung in Form von Struvit, um die geforderte Recyclingquote der Klärschlammverordnung 2017 zu erfüllen
- **Aufgaben des JKI in AP 2** (Produkte und Märkte, Leitung: Firma SF-SoepenberGmbH, Dr. Joachim Clemens):
 - **Agromische Bewertung struvitbasierter Düngeprodukte in Gefäß- und Feldversuchen**
 - **Optimierung einer Standardmethode für die agronomische Bewertung (recyclingbasierter) P-Dünger im Gefäßversuch**

Standardisierung von Gefäßversuchen für die Prüfung von P-Rezyklaten – Prüfung von Struvit im GV 2021



- 3. Schnitt (<3,5 cm)
- 3. Schnitt
- 2. Schnitt
- 1. Schnitt

TM-Ertrag STR = TM-Ertrag TSP

Dünger	KO	RP	TSP	STR	KO	RP	TSP	STR	KO	RP	TSP	STR	KO	RP	TSP	STR	KO	RP	TSP	STR	KO	RP	TSP	STR	KO	RP	TSP	STR												
Basisdüngung	A				B				A				B				A				B				A				B											
pH-Wert	5,5								6,5								7								6,5								7							
Substratmischung	S1 (ST)																S2 (RH)																							

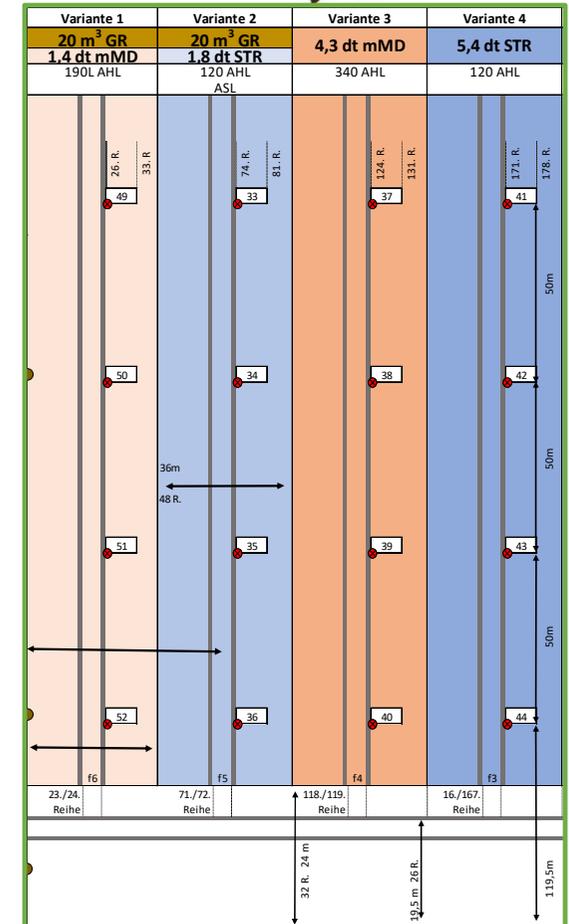
- KO = ohne P
- RP = Rohphosphat
- TSP = Triplesuperphosphat
- STR = Struvit

Gesamtertrag (3 Ernten) der oberirdischen Biomasse von Weidelgrass mit verschiedenen P-Düngern bei unterschiedlichen Versuchsdesigns im Gefäßversuch 2021 (Mittelwert und Standardabweichung, n=4). Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten bei $p < 0,05$ nach einfaktorieller ANOVA mit Tukey post hoc Test (separater Test für jedes Versuchsdesign).

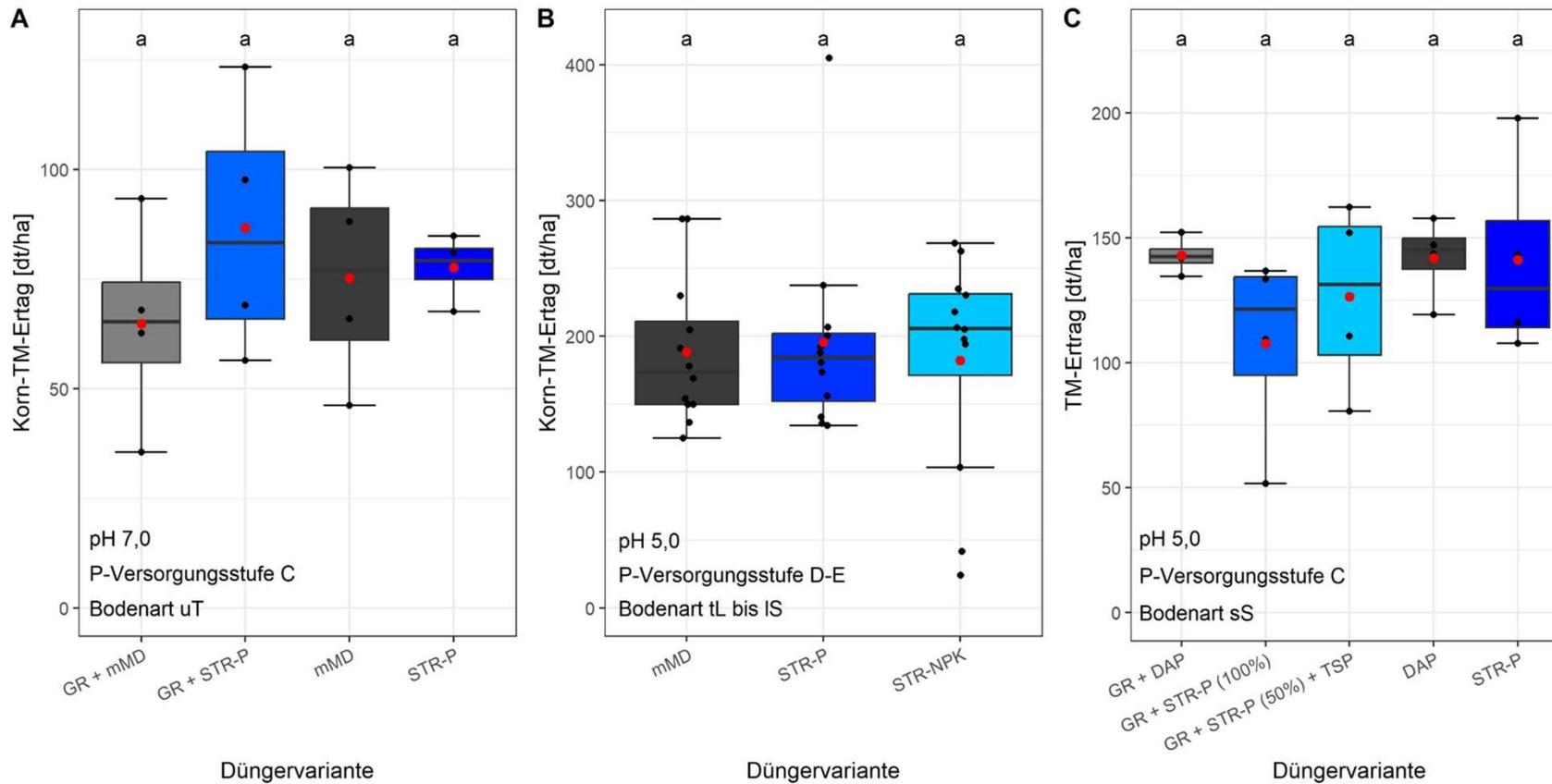
Prüfung der agronomischen Wirksamkeit von Struvit in On-farm Versuchen – Zielsetzung und Versuchsdesign 2022



- Verschiedene struvitbasierte Düngemittel (Struvit-Pellet, Struvit-NPK-Pellet, Struvit-Granulat)
- Verschiedene P-bedürftige Kulturarten (4x Körnermais, 4x Silomais, 1x Stärkekartoffel)
- Betriebsüblich bewirtschaftete Versuchsflächen
- Ausbringung mit der betriebseigenen Technik der Landwirte, wenn möglich unterfuß
- Vergleich mit betriebsüblicher Düngevariante
 - Ausgangsidee: mineralischer, gut wasserlöslicher P-Mischdünger
 - Anpassung an Realität: aufgrund massiv angestiegener Mineraldüngerpreise zusätzliche organische (Gärrest) bzw. organisch-mineralische Misch-Düngung
- Streifenanlage mit jeweils 4 Beprobungspartellen je Variante



Prüfung der agronomischen Wirksamkeit von Struvit in On-farm Versuchen – erste Ergebnisse aus 2022



GR = Gärrest
 mMD = mineral. Mischdünger
 STR-P = Struvit-Pellet
 STR-NPK = Struvit-NPK-Pellet
 DAP = Diammonphosphat
 TSP = Triplesuperphosphat

A: Korntrockenmasseertrag [dt/ha] zur Ernte auf VF 3 (Körnermais); **B:** Korntrockenmasseertrag [dt/ha] zur Ernte auf VF 5 (Körnermais); **C:** Trockenmasseerträge [dt/ha] der Gesamtpflanze zur Ernte auf VF 4 (Silomais); Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten bei $p < 0,05$ nach einfaktorieller ANOVA mit Tukey post hoc Test; **Hinweis: Die dargestellten Erträge sind hochgerechnete Parzellenerträge und damit Optimalerträge.**

Prüfung der agronomischen Wirksamkeit von Struvit in On-farm Versuchen – erste Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus 2022



- Keine signifikanten Unterschiede zwischen den Struvit-Varianten (STR-Pellet, STR-NPK, STR-Granulat) und den **mineralischen Referenzdüngern** (min. Mischdünger (mMD), DAP, TSP) bei Mais:
 - Struvitdüngung erzielte auf 4 Standorten mit unterschiedlicher Bodenart (davon 3 mit saurem Boden-pH) vergleichbare (oder sogar tendenziell höhere) Trockenmasseerträge wie die Düngung mit einem mineralischen Referenzdünger
 - Tendenziell geringere Erträge (nicht signifikant) auf 2 Standorten mit neutralem pH-Wert
- Keine signifikanten Unterschiede beim Vergleich der **kombinierten organisch-mineralischen Düngung** von Gärrest (GR) + Struvit mit Gärrest + mineralischem Referenzdünger (Anteil Gärrest-P ca. 60%) bei Mais:
 - Struvit+Gärrest erzielte auf 4 tonig/lehmigen Standorten (davon 3 mit neutralem Boden-pH-Wert, 1 sauer) einen vergleichbaren (bis tendenziell höheren) Trockenmasseertrag wie die Düngung mit einem mineralischen Referenzdünger + Gärrest
 - Tendenziell geringere Erträge auf sandigen Standorten (davon 2 mit saurem, 1 mit neutralem Boden-pH-Wert)



Foto: P. Keßeler



Foto: P. Keßeler

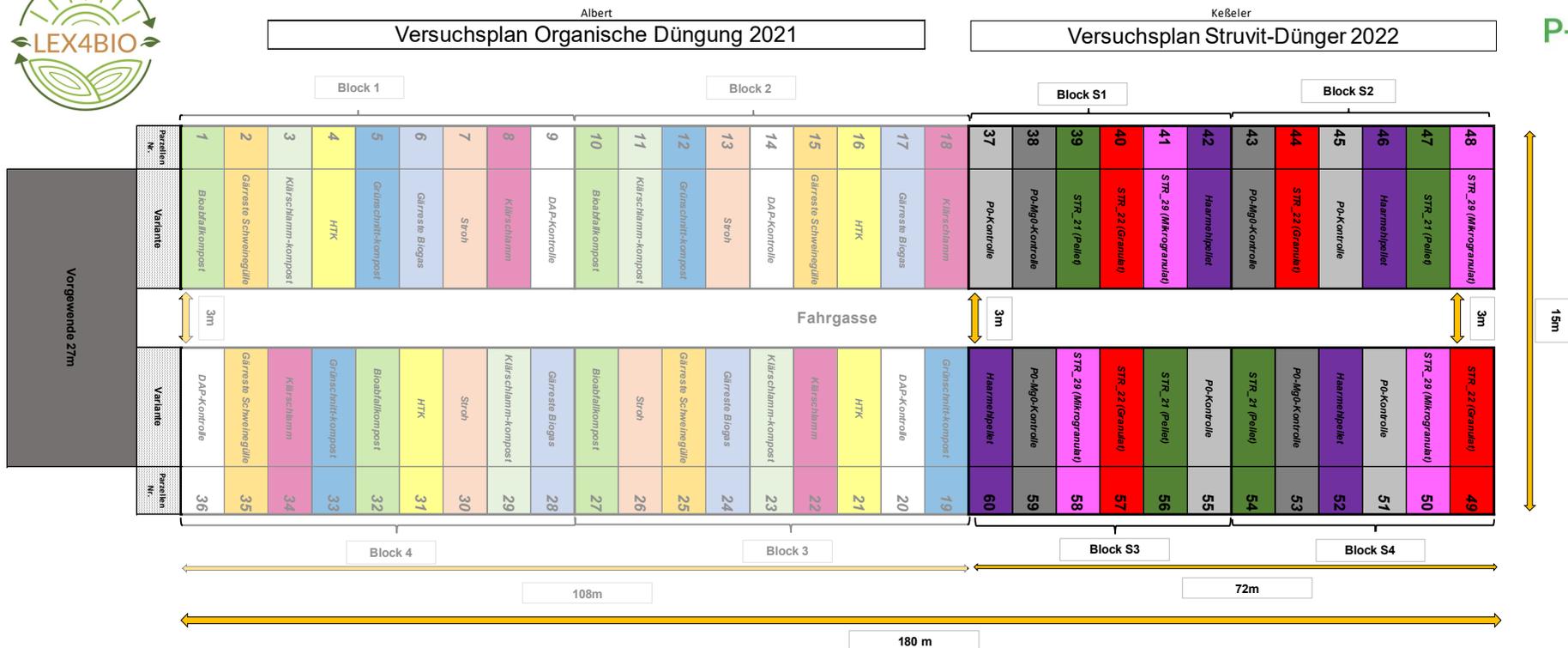
Agronomische Bewertung von biobasierten Düngeprodukten einschließlich Struvit im Rahmen eines Langzeit-Exakt-Feldversuchs



- Exakt-Feldversuch mit verschiedenen **organischen Düngern**, u.a. Klärschlamm und Klärschlammkompost, sowie **Struvit-basierten Düngeprodukten**
- Initiiert im Rahmen des **H2020-EU-Projektes „LEX4BIO“** (biobasierte Düngemittel)
- Geplante Laufzeit: 2021-2031
- Zielsetzung: Untersuchung der **Düngewirkung** sowie der Wirkungen auf Biodiversität/biologische Bodenaktivität, Humusaufbau, Nähr- und Schadstoffgehalte im Boden



Agronomische Bewertung von biobasierten Düngeprodukten einschließlich Struvit im Rahmen eines Langzeitfeldversuchs



Ergebnisse werden in den kommenden Jahren vorgestellt

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

- Agronomische Wirksamkeit von Düngern abhängig von dünger-, boden- und pflanzenbedingten Faktoren
- P-Bindungsformen im Dünger spielen zentrale Rolle
- Einfluss des Bodenmikrobioms weist noch großen Forschungsbedarf auf
- Standardisierte chemische Extraktionsmethoden erlauben nur erste Abschätzung der Pflanzenverfügbarkeit von Düngeprodukten
- Nur Vegetationsversuche ermöglichen Darstellung der Dynamik von P-Retention, -Lösung und -Transport in gedüngten Böden unter dem Einfluss der P-Aufnahme durch Pflanzenwurzeln
- Unterschiedliche Versuchsdesigns führen zu verschiedenen Aussagen, Standardisierung daher dringend erforderlich zur Erzeugung vergleichbarer Ergebnisse
- Ziel eines standardisierten Gefäßversuchs sollte die Bereitstellung eines reproduzierbaren, „bodengleichen“ Substrats mit zugehörigem Versuchsdesign sein, welches eine zuverlässige Isolierung düngebedingter Wirkungen für die wichtigsten mitteleuropäischen Fruchtarten erlaubt
- Durchführung von On-Farm- und Exakt-Feldversuchen mit zahlreichen Schwierigkeiten behaftet, insbesondere Auffinden geeigneter P-Mangelstandorte in erreichbarer Nähe
- Struvit eignet sich trotz fehlender Wasserlöslichkeit zur Unterfußdüngung P-bedürftiger Kulturen



Vielen Dank an unsere an den Forschungsarbeiten beteiligten Kolleg*innen:

Sophia Albert¹, János Papendorf², Peter Harborth², Kira Jabs³, Rüdiger Anlauf³, Helge Schultz⁴, Elke Wilharm⁴, Thade Potthoff⁵, Bernd Steingrobe⁵ und Elke Bloem¹

¹JKI Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde Braunschweig

²Technische Universität Carolo-Wilhelmina, Braunschweig

³Universität für Angewandte Wissenschaften Osnabrück

⁴Universität für Angewandte Wissenschaften Wolfenbüttel

⁵Georg August Universität Göttingen

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Zitierte Referenzen



Etesami H, Jeong BR, Glick BR (2021) Contribution of arbuscular mycorrhizal fungi, phosphate-solubilizing bacteria, and silicon to P uptake by plant. *Frontiers in Plant Science* 12: 699618. DOI: 10.3389/fpls.2021.699618

Jacobi F, Koch D, Löber J, Schumann C (2022) P-Düngewirksamkeit von Klärschlamm-Rezyklaten. Abschlussbericht vom 06.10.2022. https://umwelt.hessen.de/sites/umwelt.hessen.de/files/2022-10/abschlussbericht_p-duengewirksamkeit_von_klaerschlamm-rezyklaten_0.pdf

Jiang F, Zhang L, Zhou J, George TS, Feng G (2021) Arbuscular mycorrhizal fungi enhance mineralisation of organic phosphorus by carrying bacteria along their extraradical hyphae. *New Phytologist* 230 (1), S. 304–315. DOI: 10.1111/nph.17081.

Kratz S, Vogel C, Adam C (2019) Agronomic performance of P recycling fertilizers and methods to predict it: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 115(1): 1-39 <https://doi.org/10.1007/s10705-019-10010-7>

Kratz S, Keßeler P, Jabs K, Anlauf R, Schultz H, Wilharm E, Potthoff T, Steingrobe B, Bloem E (2021) Estimating agronomic performance of recycled phosphorus fertilisers - Challenges and possible solutions; Paper presented to the International Fertiliser Society at a Conference in Cambridge, UK, on 10th December 2021. (Proceedings 863 / The International Fertiliser Society). 36 Seiten

Lekfeldt J, Duus S, Rex M, Mercl F, Kulhánek M, Tlustoš P, Magid J, de Neergaard A (2016) Effect of bioeffectors and recycled P-fertiliser products on the growth of spring wheat. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture* 3:22

Meyer G, Bünemann EK, Frossard E, Maurhofer M, Mäder P, Oberson A (2017) Gross phosphorus fluxes in a calcareous soil inoculated with *Pseudomonas protegens* CHA0 revealed by 33P isotopic dilution. *Soil biology & biochemistry* 104: 81–94

Raymond NS, Jensen LS, van der Boom F, Nicolaisen MH, Müller-Stöver D (2019a) Fertilising effect of sewage sludge ash inoculated with the phosphate-solubilising fungus *Penicillium bilaiae* under semi-field conditions. *Biology and Fertility of Soils* 55: 43-51. <https://doi.org/10.1007/s00374-018-1326-1>

Raymond NS, Müller-Stöver D, Richardson AE, Nielsen HH, Jensen LS (2019b) Biotic strategies to increase plant availability of sewage sludge ash phosphorus. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 182: 175-186. DOI: 10.1002/jpln.201800154

Raymond NS, Gómez-Muñoz B, van der Bom FJT, Nybroe O, Jensen LS, Müller-Stöver DS, Oberson A, Richardson AE (2021) Phosphate-solubilising microorganisms for improved crop productivity: a critical assessment. *New Phytologist* 229: 1268-1277. DOI: 10.1111/nph.16924