

# 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.

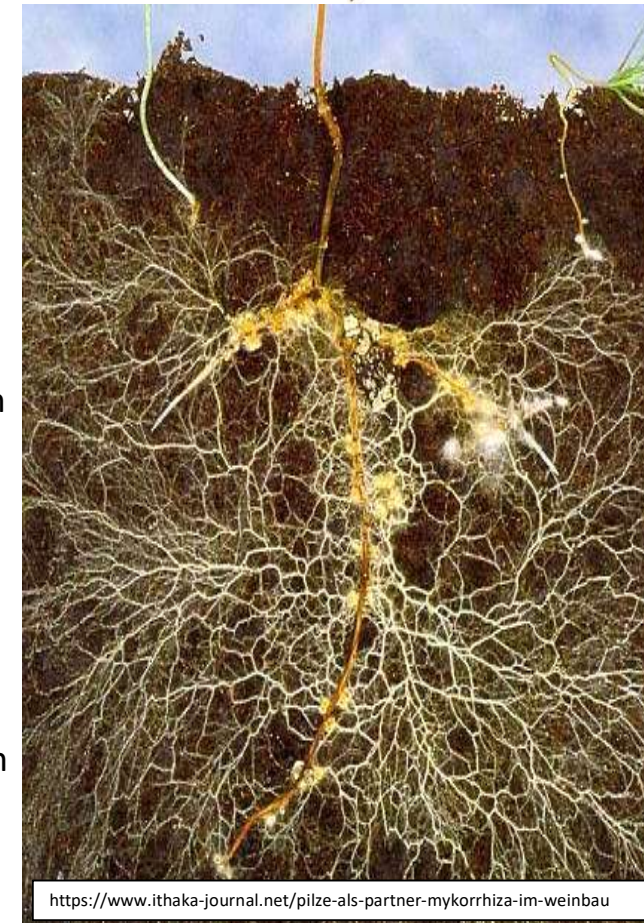
# Einflussfaktoren auf die agronomische Wirksamkeit von P-Düngemitteln: P-Bindungsformen (Kratz et al., 2019)



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](http://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



Foto: P. Keßeler



Foto: P. Keßeler

# 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!

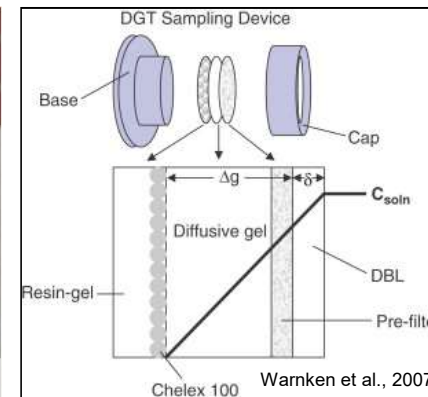
Kratz et al., 2019

[www.julius-kuehn.de](http://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

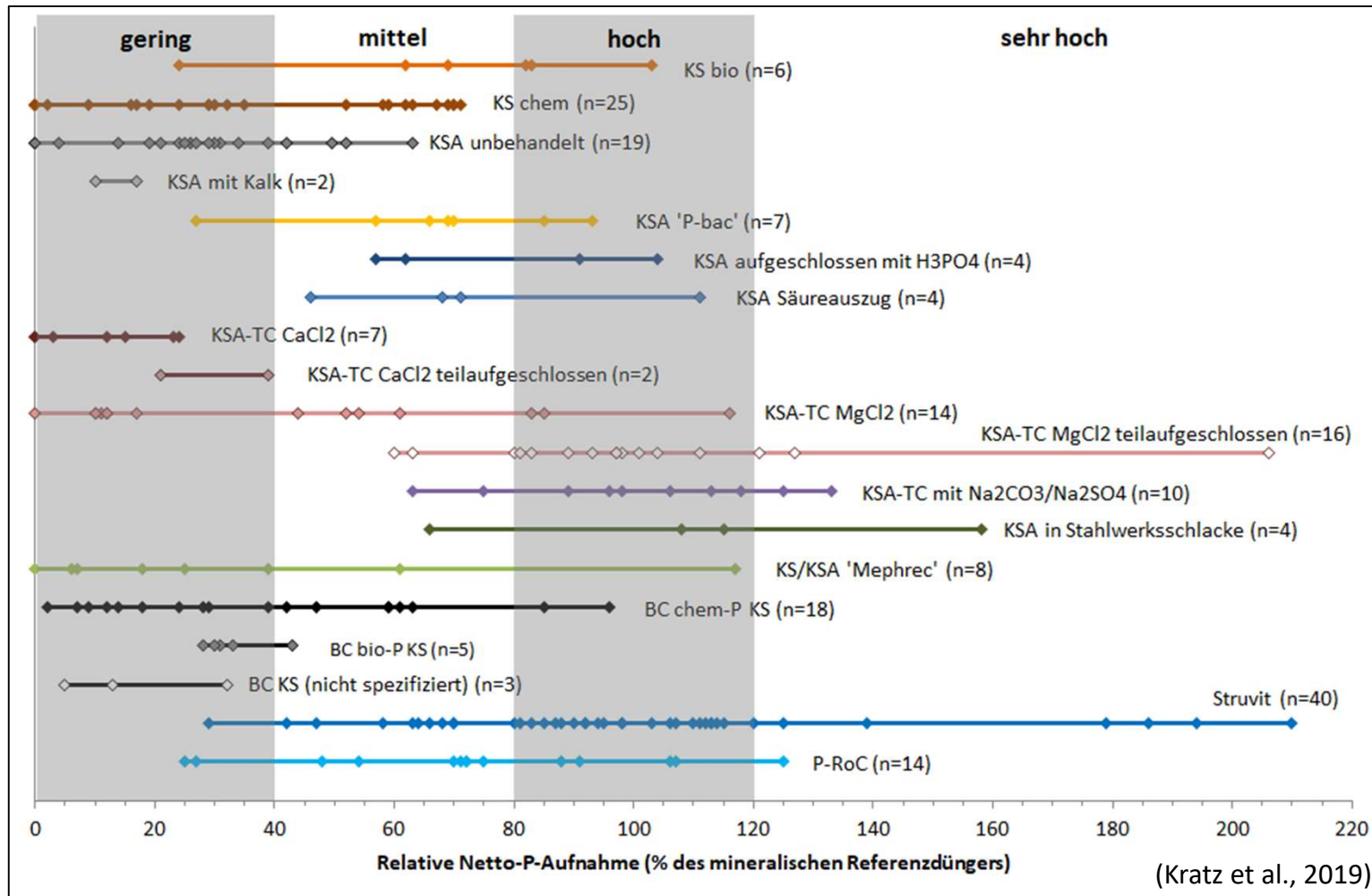


Foto: T. Pothoff



Foto: K. Panten

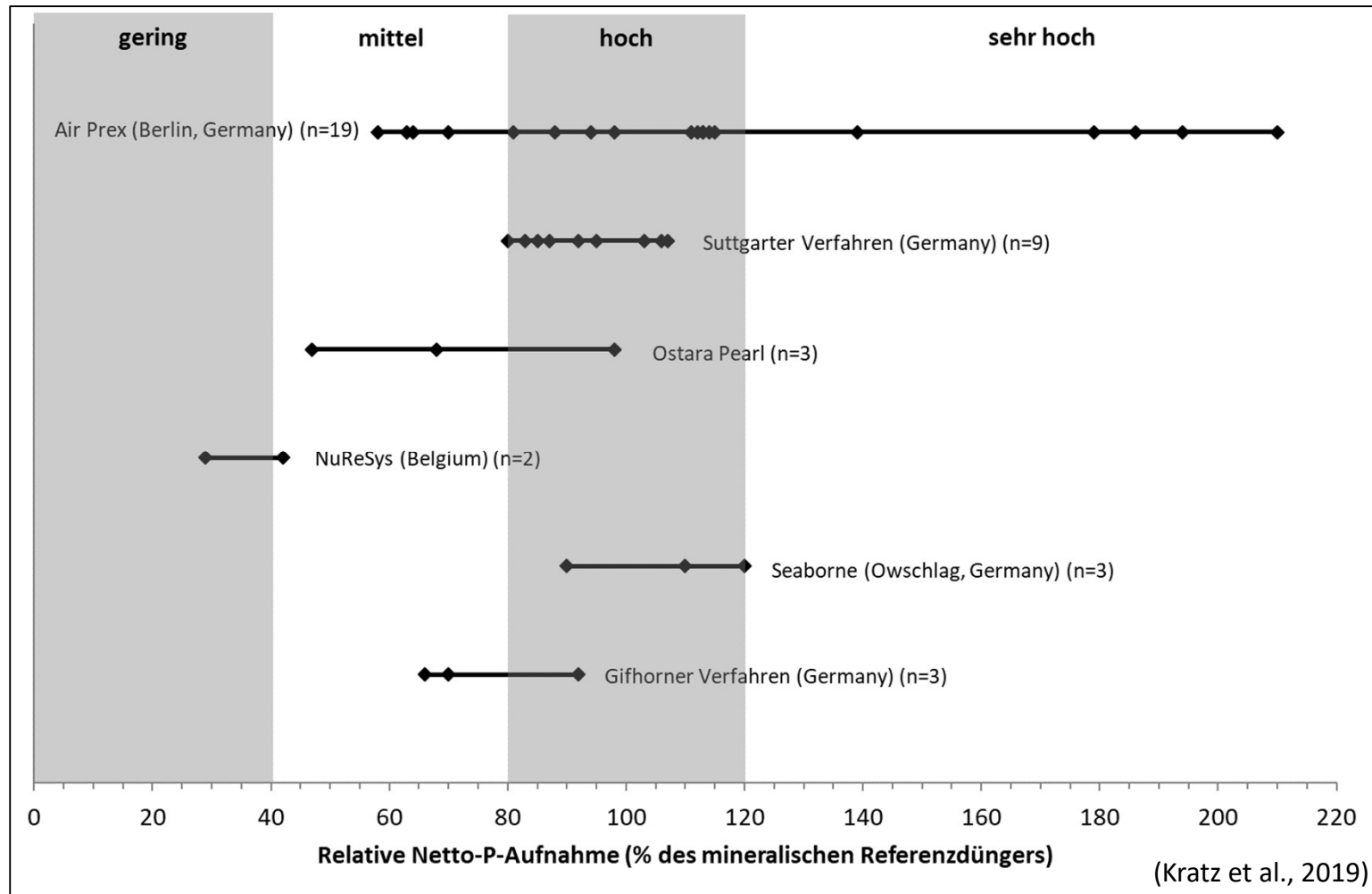
# Relative Netto-P-Aufnahmen verschiedener P-Rezyklate in Gefäßversuchen nach Literaturangaben



KS = Klärschlamm  
 KSA = Klärschlammasche  
 BC = „Biochar“

Hohe Variabilität der Versuchsergebnisse in Abhängigkeit vom Versuchsdesign

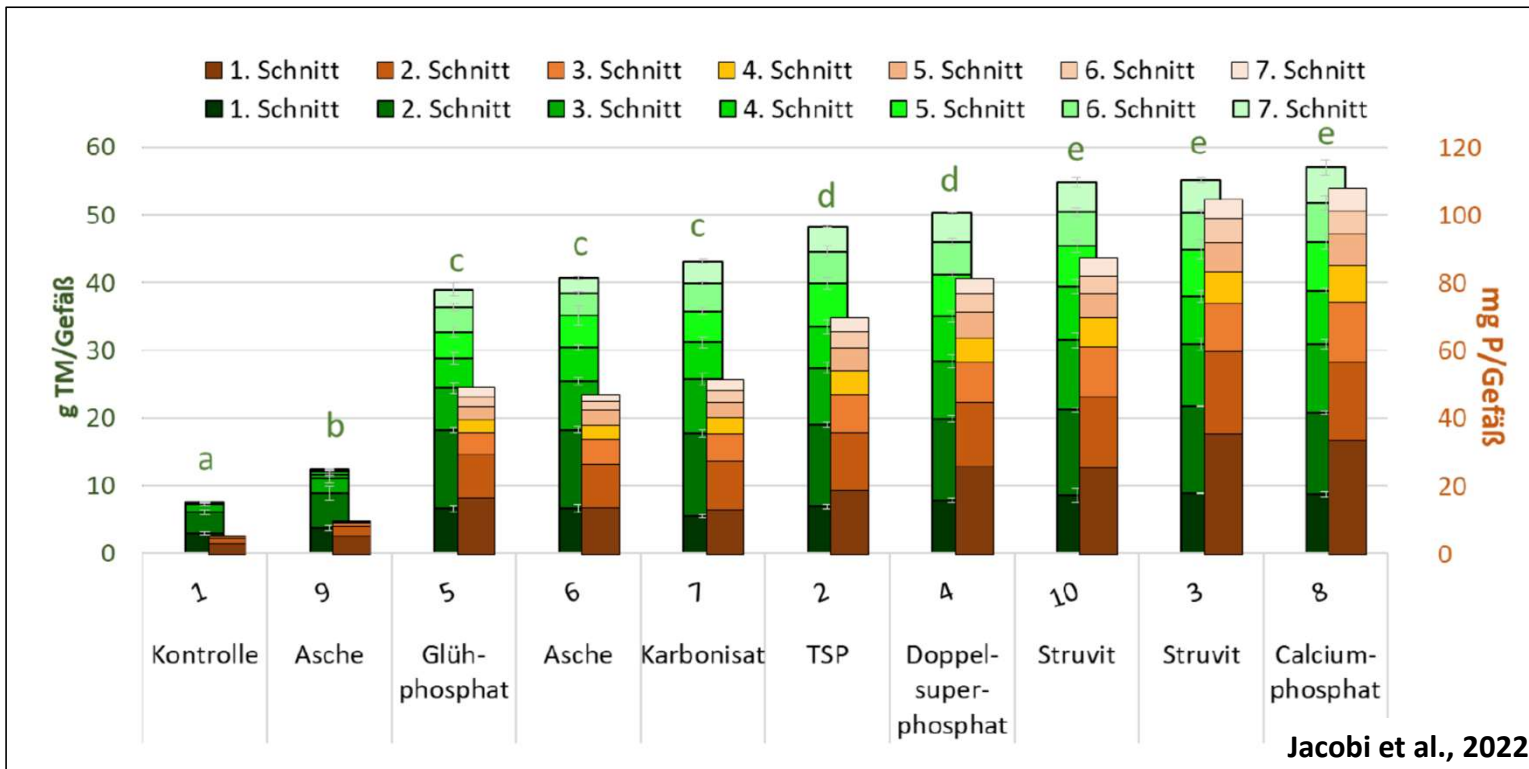
## Relative Netto-P-Aufnahmen für verschiedene in Gefäßversuchen getestete Struvite



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

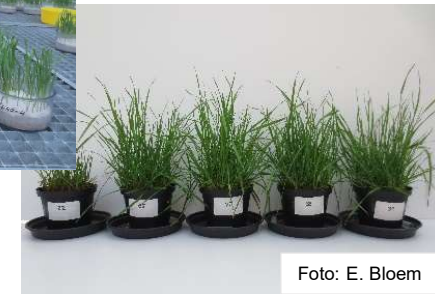
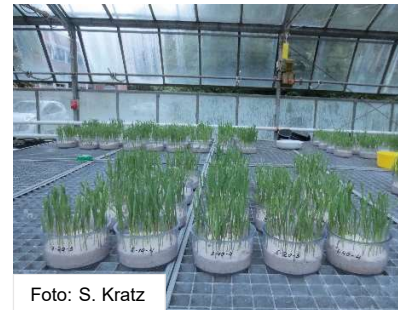
- **Optimalen Wachstumsbedingungen** für die in Mitteleuropa angebauten Hauptkulturarten
- Einer **Grunddüngestrategie**, die es ermöglicht, beobachtete Effekte zuverlässig dem Testnährstoff zuzuordnen
- Option zur Unterscheidung zwischen **kurz- und langfristigen Effekten**
- Einfacher **Handhabbarkeit** 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  $\text{CaCO}_3$  p.a.
- Testpflanze: bisher *Lolium multiflorum*, Versuche mit weiteren (dikotylen) Kulturarten geplant
- Definierte Gefäßgröße/Füllmenge: 1200 cm<sup>3</sup> / 2 kg Substrat
- Referenzdünger: weicherdiges Rohphosphat und TSP
- P-Düngung: 85% der erwarteten P-Aufnahme
- Basis/Ausgleichsdüngung mit allen Nährstoffen außer P im Überschuss

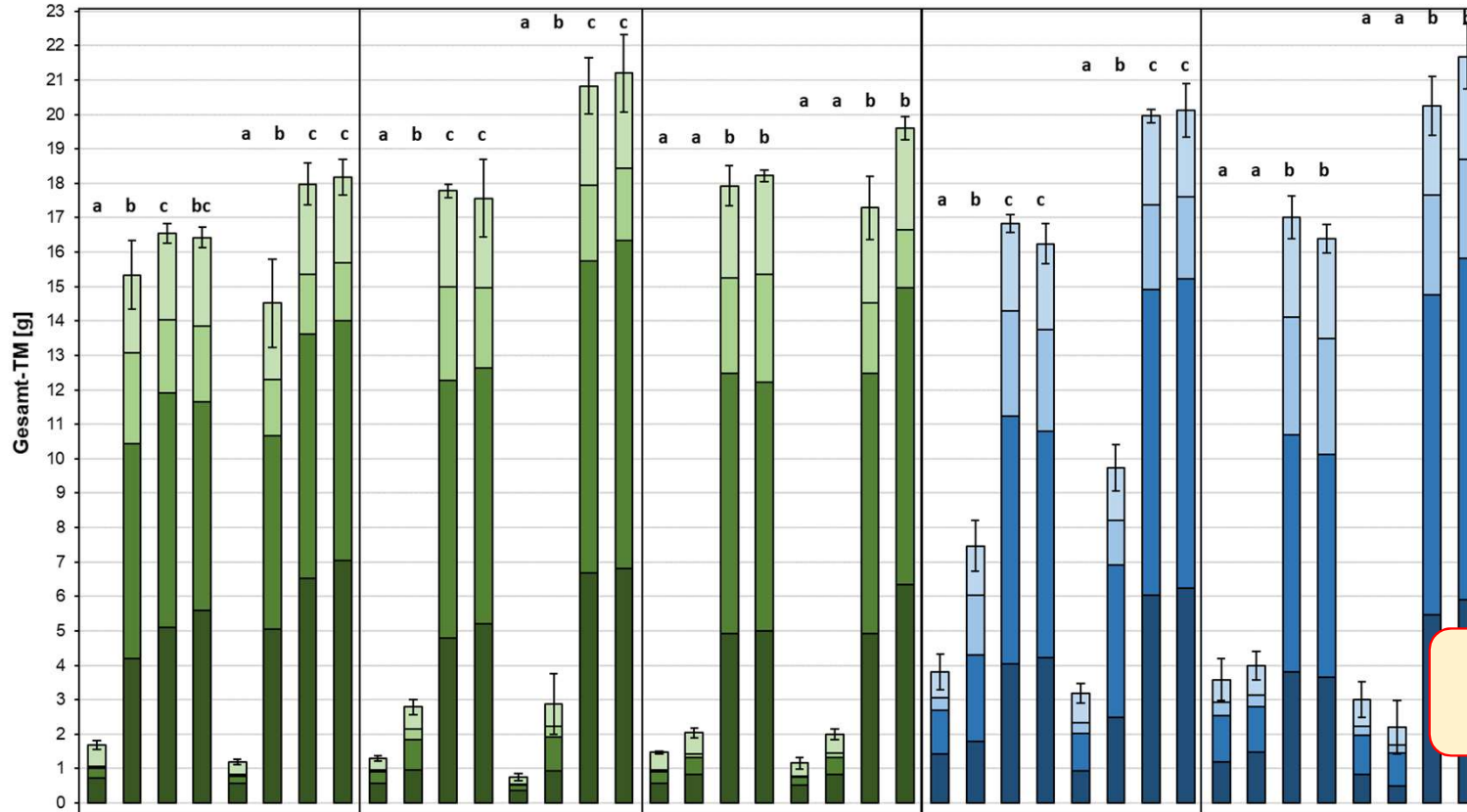


## BMBF Forschungsprojekt „RePhoR – P-Net“



- **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																
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

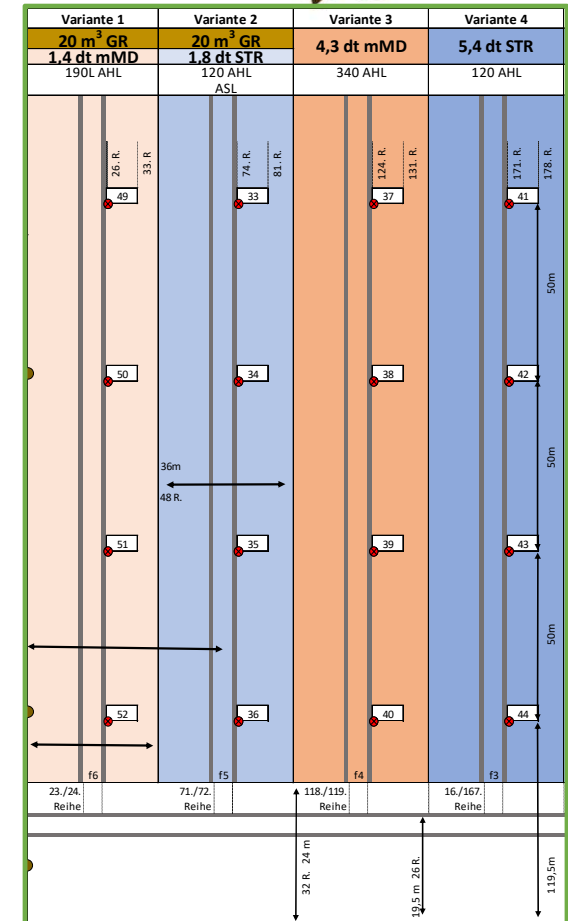
Gesamtertrag (3 Ernten) der oberirdischen Biomasse von Weidelgrass mit verschiedenen P-Düngern bei unterschiedlichen Versuchsdesigns im Gefäßversuch 2021 (Mittelwert und Standardabweichung, n=4). Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten bei  $p < 0,05$  nach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



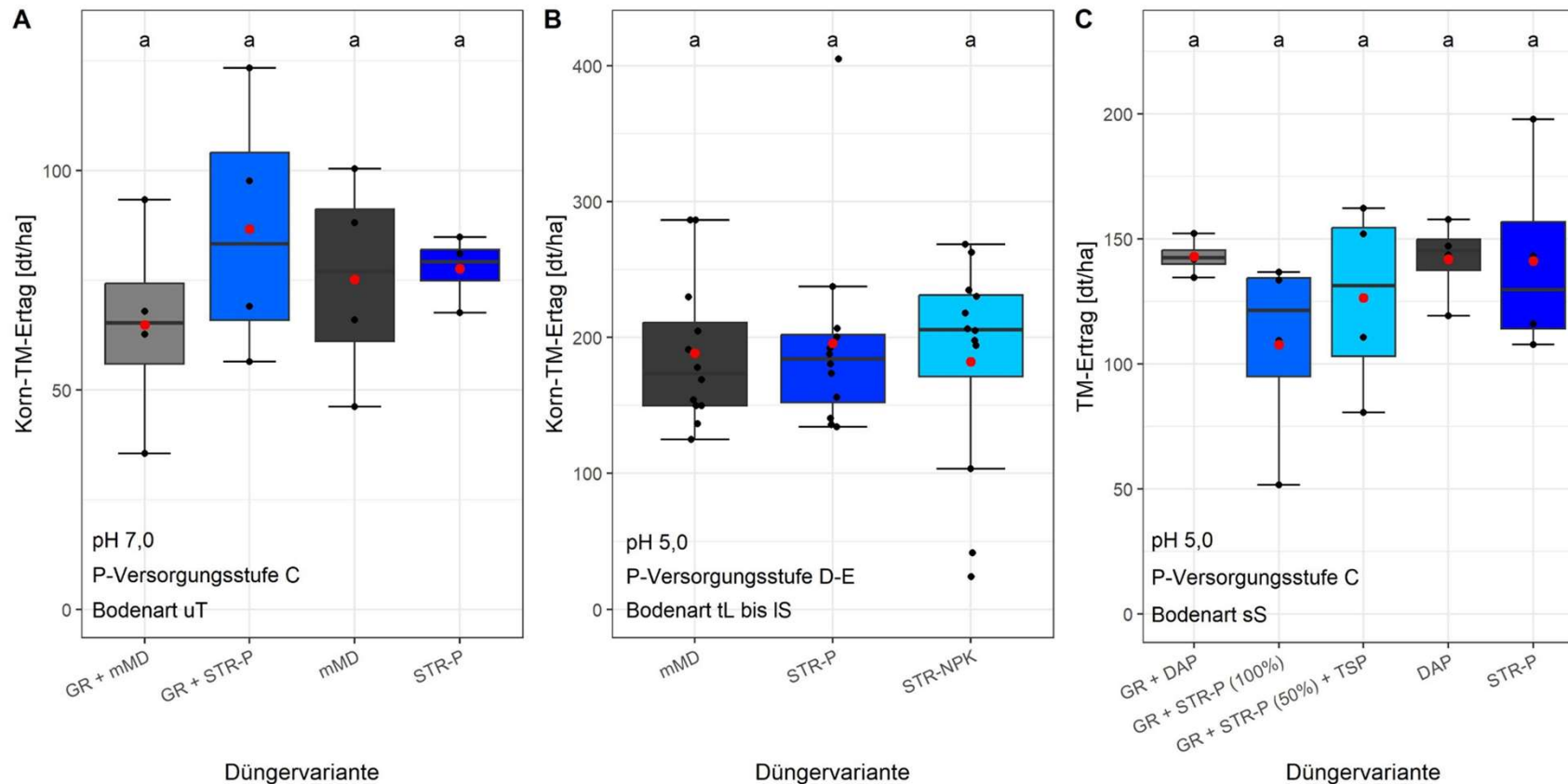
# Prüfung der agronomischen Wirksamkeit von Struvit in On-farm Versuchen – Zielsetzung und Versuchsdesign 2022



- 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

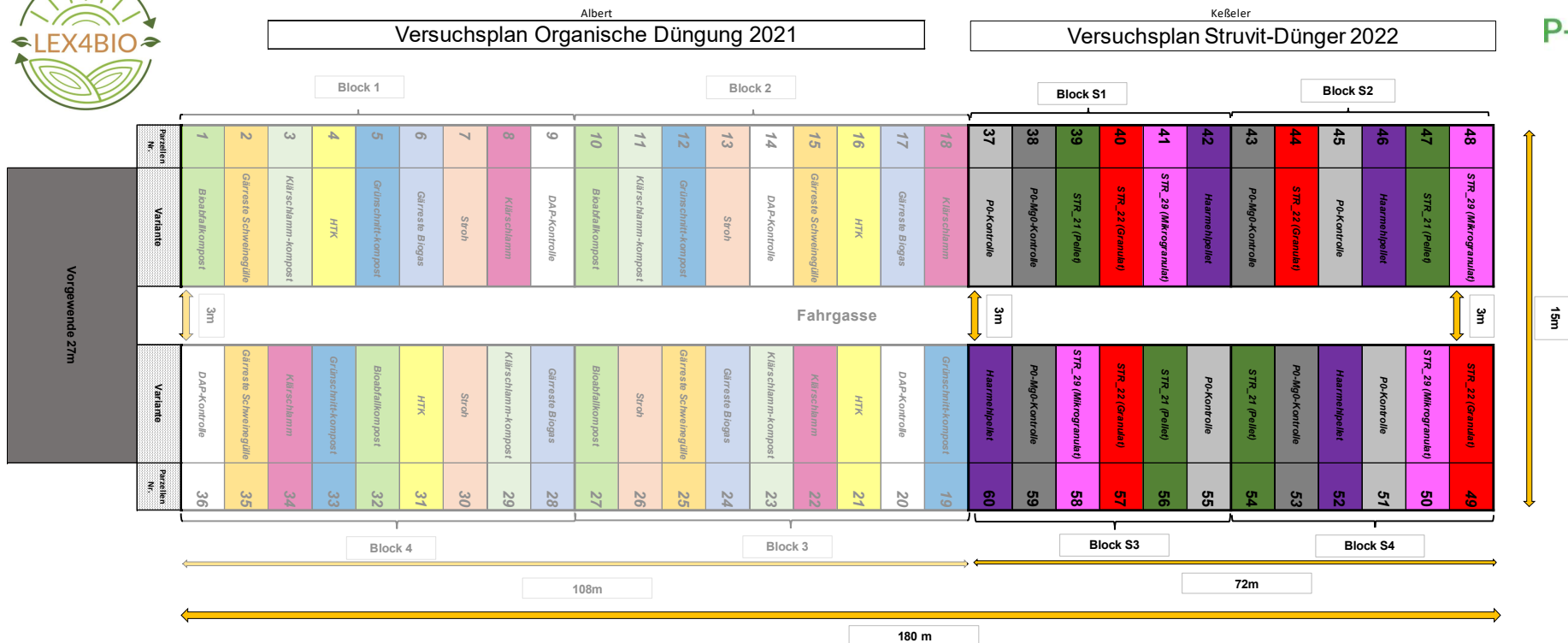
# Agronomische Bewertung von biobasierten Düngeprodukten einschließlich Struvit im Rahmen eines Langzeit-Exakt-Feldversuchs



- 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 Albert<sup>1</sup>, János Papendorf<sup>2</sup>, Peter Harborth<sup>2</sup>, Kira Jabs<sup>3</sup>, Rüdiger Anlauf<sup>3</sup>, Helge Schultz<sup>4</sup>, Elke Wilharm<sup>4</sup>, Thade Potthoff<sup>5</sup>, Bernd Steingrobe<sup>5</sup> und Elke Bloem<sup>1</sup>

<sup>1</sup>JKI Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde Braunschweig

<sup>2</sup>Technische Universität Carolo-Wilhelmina, Braunschweig

<sup>3</sup>Universität für Angewandte Wissenschaften Osnabrück

<sup>4</sup>Universität für Angewandte Wissenschaften Wolfenbüttel

<sup>5</sup>Georg 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](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