

# Abschlussbericht

EIP Agrar NRW Projekt

Operationelle Gruppe:

## **Phosphor-Rezyklierung im Ökologischen Landbau**

Innovationsprojekt:

## **Alternative Phosphordünger (P-Rezyklate) zur Ertragssteigerung von Leguminosen und Getreide im Ökologischen Landbau (Öko-P)**

Europäischer Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums:  
Hier investiert Europa in die ländlichen Gebiete unter Beteiligung des Landes Nordrhein-Westfalen



Ministerium für Landwirtschaft  
und Verbraucherschutz  
des Landes Nordrhein-Westfalen



## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	2
Tabellenverzeichnis .....	3
Abkürzungsverzeichnis .....	4
A. Kurzdarstellung .....	6
I. Ausgangssituation und Bedarf .....	6
II. Projektziel und konkrete Aufgabenstellung .....	6
III. Mitglieder der OG .....	7
IV. Projektgebiet .....	9
V. Projektlaufzeit und -dauer .....	10
VI. Budget .....	10
VII. Ablauf des Vorhabens .....	10
VIII. Zusammenfassung der Ergebnisse .....	13
B. Eingehende Darstellung .....	14
I. Verwendung der Zuwendung .....	14
II. Detaillierte Erläuterung der Situation zu Projektbeginn .....	15
III. Ergebnisse der OG in Bezug auf .....	19
IV. Ergebnisse des Innovationsprojektes .....	21
V. Nutzen der Ergebnisse für die Praxis .....	50
VI. (Geplante) Verwertung und Nutzung der Ergebnisse .....	51
VII. Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit .....	51
VIII. Nutzung Innovationsdienstleister (IDL) .....	52
IX. Kommunikations- und Disseminationskonzept .....	52
X. Danksagung .....	55
C. Anhänge .....	56



# Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1:</b> Lage Versuchsstandorte Öko-P in NRW .....	9
<b>Abbildung 2:</b> Versuchsdesign Öko-P: randomisiertes Blockdesign mit vier Blöcken und acht Varianten .....	24
<b>Abbildung 3:</b> Maisversuche 2021 in Warstein: Stängeldurchmesser [mm] (links) und Pflanzenlänge [cm] (rechts) an sechs Messterminen in Abhängigkeit von der Düngevariante .....	28
<b>Abbildung 4:</b> Maisversuch 2022 in Warstein: Stängeldurchmesser [mm] (links) und Pflanzenlänge [cm] (rechts) an vier Messterminen in Abhängigkeit von der Düngevariante .....	29
<b>Abbildung 5:</b> Maisversuche 2021 (links) und 2022 (rechts) in Warstein: Gesamterträge [dt TM ha <sup>-1</sup> ] in Abhängigkeit von der Düngevariante: die Balken setzen sich zusammen aus dem Sprossmasseertrag (dunkel, unten) und dem Kolbenertrag (hell, oben) .....	29
<b>Abbildung 6:</b> Maisversuche 2021 (links) und 2022 (rechts) in Warstein: Gesamt-P-Aufnahme [kg P ha <sup>-1</sup> ] in Abhängigkeit der Düngevariante: die Balken setzen sich zusammen aus der Aufnahme der Sprossmasse (dunkel, unten) und der Kolben (hell, oben).....	30
<b>Abbildung 7:</b> Längenunterschiede im Maisversuch am Standort Halle (Westfalen), im Feld Juni 2021 (links), zur Zwischenernte Juli 2021 (rechts) .....	31
<b>Abbildung 8:</b> Pflanzenlänge [cm] im Maisversuch am Standort Halle (Westfalen) in Abhängigkeit von der Düngevariante.....	31
<b>Abbildung 9:</b> Maiserträge [dt TM ha <sup>-1</sup> ] 2021 am Standort Halle (Westfalen) in Abhängigkeit von der Düngevariante.....	32
<b>Abbildung 10:</b> Klee grasversuche 2021 (links) und 2022 (rechts): kumulierter Gesamtertrag [dt TM ha <sup>-1</sup> ] in Abhängigkeit von der Düngevariante .....	33
<b>Abbildung 11:</b> Klee grasversuch 2021: kumulierte Gesamt-P-Aufnahme [kg P ha <sup>-1</sup> ] in Abhängigkeit von der Düngevariante.....	34
<b>Abbildung 12:</b> Versuchsdesign: randomisierte Blockanlage mit vier Wiederholungen und acht Varianten in Theorie (links) und Praxis (rechts) .....	40
<b>Abbildung 13:</b> Homogenisierung der Knochenkohle+ durch Sieben (links), Proben der fünf ausgewählten Rezyklate (rechts) .....	42
<b>Abbildung 14:</b> händische parzellengenaue Ausbringung der Rezyklate im Feld ....	42

<b>Abbildung 15:</b> Maschinenarbeiten am Standort Warstein-Suttrop: Aussaat Maisversuch (links) und Striegeln zur Reduzierung des Unkrautdrucks (rechts).....	42
<b>Abbildung 16:</b> Maisversuch am Standort Halle (Westfalen): Fraß- und Wildschäden (links), Unterschiede in der Pflanzenentwicklung (rechts) .....	43
<b>Abbildung 17:</b> Datenerhebung Maisversuche: für jede Variante wurden dauerhafte Repräsentanten markiert (a), deren Pflanzenlänge [cm] (b) und Stängeldurchmesser [mm] (c) in regelmäßigen Abständen überprüft wurden. Für die Ernte wurden Pflanzen aus den Kernparzellen entnommen (d) und Spross- und Kolbengewicht getrennt erfasst (e). Ein Teil der Pflanzen wurde für weitere Analysen an die Universität Bonn geliefert (f) .....	44
<b>Abbildung 18:</b> Datenerhebung Klee grasversuche: Quadratmeterschnitt im Feld (links) und Probenverarbeitung (rechts) zur Trockenmassebestimmung.....	45
<b>Abbildung 19:</b> Trockenmassebestimmung: Trockenschrank (links) und Rückwaage der Trockenmasse (rechts).....	45
<b>Abbildung 20:</b> Feldbegehung Öko-P, Juni 2021 .....	46
<b>Abbildung 21:</b> Drohnensfoto vom Standort Halle (Westfalen), deutliche Ausfälle im Klee grasbestand (untere Fläche) .....	47
<b>Abbildung 22:</b> schlechte Entwicklung und starke Verunkrautung im Klee gasversuch (rechte Seite) am Standort Warstein-Belecke.....	48

## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1:</b> Standortbedingungen der Feldversuche von Öko-P .....	22
<b>Tabelle 2:</b> Eigenschaften der fünf ausgewählten P-Rezyklate .....	23
<b>Tabelle 3:</b> Aufteilung Gesamt-P auf die sechs P-Fractionen nach Tiessen & Moir (1993) sechs Monate nach einer Düngung durch die P-Rezyklate.....	27
<b>Tabelle 4:</b> Übersicht Maisversuche 2021 und 2022 in Warstein: Mittelwerte und Signifikanzen der erhobenen Parameter in Abhängigkeit von der Düngevariante....	30
<b>Tabelle 5:</b> Übersicht Maisversuche 2021 und 2022 in Halle (Westfalen): Mittelwerte und Signifikanzen der erhobenen Parameter in Abhängigkeit von der Düngevariante .....	32
<b>Tabelle 6:</b> Übersicht Klee grasversuche 2021 und 2022: Mittelwerte und Signifikanzen der erhobenen Parameter in Abhängigkeit von der Düngevariante....	34

## Abkürzungsverzeichnis

AbfKlärV	Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärgemisch und Klärschlammkompost (Abfall- und Klärschlammverordnung)
AD	AshDec (Outotec GmbH & Co. KG, Rezyklat aus Klärschlammasche)
AOL	Fachgruppe Agrarökologie und Organischer Landbau der Uni Bonn
BLE	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BP	Berliner Pflanze (Berliner Wasserbetriebe, Struvit)
CG	Crystal Green® (Ostara Nutrient Recovery Technologies Inc., Struvit)
FM	Frischmasse
HCl	Chlorwasserstoff
HNO <sub>3</sub>	Salpetersäure
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Wasserstoffperoxid
IDL	Innovationsdienstleister*in
INRES	Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz der Uni Bonn
IP	Innovationsprojekt
K0	Nullkontrolle, ohne P-Düngung
KK+	Knochenkohle+ (Universität Rostock, Rezyklat aus mit Schwefel angereicherten Knochenchips)
LANUV	Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
LWK NRW	Landwirtschaftskammer NRW
MLV	Ministerium für Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
N	Stickstoff

NaHCO <sub>3</sub>	Natriumhydrogencarbonat
NaOH	Natriumhydroxid, Natronlauge
OG	Operationelle Gruppe
P	Phosphor
PY	Pyreg
RP	Rohphosphat
TM	Trockenmasse
TSP	Triplesuperphosphat (wasserlöslicher P-Mineraldünger)
ZeLE	Zentrum für ländliche Entwicklung

## **A. Kurzdarstellung**

### **I. Ausgangssituation und Bedarf**

Auf vielen landwirtschaftlichen Betrieben wird Phosphor zunehmend zu einem limitierenden Faktor der Ertragsbildung von Kulturpflanzen. Gerade im Ökolandbau ist der Kerngedanke zwar, durch eine nachhaltige Wirtschaftsweise Ressourcen zu schonen und betriebsinterne Nährstoffkreisläufe zu stärken, doch insbesondere bei stark spezialisierten Betrieben verlassen mit dem Verkauf der erzeugten Produkte mehr Nährstoffe den Betrieb als rückgeführt werden und es entstehen Phosphordefizite.

Die Möglichkeiten, diese Defizite auszugleichen, sind im Ökolandbau im Wesentlichen auf organische Wirtschaftsdünger und weicherdige Rohphosphate begrenzt. Die Anwendung Letzterer ist umstritten, da die Rohphosphate aus dem EU-Ausland importiert werden und je nach Herkunft beachtliche Mengen an Blei, Cadmium und Uran enthalten können, die mit der Düngung in die Böden eingetragen und von Pflanzen aufgenommen werden. Zudem sind die Rohphosphat-Lagerstätten endlich und auch produktionstechnisch sind weicherdige Rohphosphate aufgrund ihrer geringen Pflanzenverfügbarkeit problematisch.

Seit einigen Jahren wird intensiv an der Rückgewinnung von Phosphor in der Abwasseraufbereitung geforscht. Die hieraus entstehenden phosphorhaltigen Recycling-Dünger (Rezyklat-P-Dünger) könnten die umstrittenen Rohphosphate im Ökologischen Landbau ersetzen. Einige dieser Produkte wurden bereits in Gefäßversuchen auf ihre Wirksamkeit getestet, allerdings sind praxisnahe Feldversuche unter den Bedingungen des Ökolandbaus hierzu bislang rar.

### **II. Projektziel und konkrete Aufgabenstellung**

Im Öko-P Projekt wurden fünf verschiedene P-Rezyklate aus verschiedenen Herstellungspfaden in Zusammenarbeit mit ökologischen Praxisbetrieben erprobt. Ziel war es, die innovativen Rezyklat-P-Dünger in einem für eine ökologische Fruchtfolge sinnvollen Gesamtkonzept zu etablieren. Dabei sollte dieses Konzept auf seine Wirksamkeit, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit überprüft werden.

Die Erkenntnisse sollten Ansätze für eine ganzheitliche und nachhaltige Landwirtschaft sowie Lösungen für Herausforderungen im ökologischen Landbau anbieten. Die Projektergebnisse sollten zusammengefasst und ansprechend aufgearbeitet werden

und sowohl der interessierten Öffentlichkeit als auch Praktikerinnen und Praktikern in Form von Informationsmaterial und bei Online-Veranstaltungen sowie Feldtagen vermittelt werden.

### **III. Mitglieder der OG**

Die Operationelle Gruppe (OG) des Öko-P Projektes setzte sich zusammen aus der Landwirtschaftskammer NRW als Leadpartner, der Universität Bonn als wissenschaftlichen Partner, drei ökologisch wirtschaftenden Urproduzenten als Vertreter der Praxis und einigen assoziierten Partnern, die das Projekt mit ihrer Fachexpertise beratend unterstützten.

#### **Landwirtschaftskammer NRW:**

Als Leadpartner war die Projektleitung des Öko-P Projektes bei der LWK NRW angesiedelt. Zu den Aufgabenschwerpunkten gehörten hier die Koordination und Leitung der Operationellen Gruppe sowie die finanzielle Abwicklung und die ordnungsgemäße Umsetzung des Projektes. Im Bereich der Projektarbeit war die Projektleitung außerdem für die Planung, Durchführung und Dokumentation der Praxisversuche zuständig. Die Auswertung der Versuche und den Wissenstransfer übernahm die Projektleitung in enger Zusammenarbeit mit dem wissenschaftlichen Partner. Im Zeitraum vom 01.02.2020 bis zum 07.10.2020 wurde die Projektleitung durch Dr. Stephan Jung besetzt. Ab dem 08.10.2020 wurden die Aufgaben und Verantwortungen von Hannah Fischer als neue Projektleitung übernommen. Zusätzlich wurde die Literaturrecherche und insbesondere die Versuchsanlegung, -durchführung sowie die Datenerfassung und –auswertung durch studentische Hilfskräfte unterstützt (Laura Noh 27.08.2020 – 15.11.2020, Charlotte Klimpel 01.03.2021 – 31.12.2021, Tim Wantulla 01.04.2021 – 31.12.2021 und 16.05.2022 – 06.10.2022, Felix Pordzik 07.06.2022 – 31.07.2022, Leonie Palm 18.07.2022 – 31.10.2022). Ab dem 07.10.2022 übernahm Tim Wantulla mit einer 0,5 AK-Stelle die wissenschaftliche Projektleitung von Öko-P. Die Leitung der OG verblieb mit 0,5 AK bei Hannah Fischer.

#### **Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn:**

Als wissenschaftlicher Partner war die Universität Bonn für die Analyse der Pflanzen- und Bodenproben verantwortlich und übernahm in enger Zusammenarbeit mit der LWK NRW die statistische Auswertung sowie die Erarbeitung von wissenschaftlichen

Publikationen für den Wissenstransfer. Ansprechpartner für das Öko-P Projekt war Dr. Daniel Neuhoff aus dem Fachgebiet Agrarökologie und Organischer Landbau (AOL) des Instituts für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz (INRES). Die Laboranalysen wurden im Zeitraum vom 01.06.2021 bis zum 31.10.2022 von Katharina Frizen vorgenommen. Des Weiteren wurde das Projekt maßgeblich von studentischen Hilfskräften der Uni Bonn im Rahmen der Verarbeitung der Proben und der Laborarbeiten unterstützt (Hanna Lücke 15.06.2021 – 31.05.2022, Frieda König 15.06.2021 – 31.10.2022, Cheryl Frenz 15.06.2021 – 31.10.2022, Anna Theiss 15.07.2021 – 31.10.2022).

### **Landwirtschaftliche Urproduzenten:**

Die Versuche des Projektes wurden auf den Praxisflächen von drei landwirtschaftlichen Betrieben unter den Bedingungen des Ökolandbaus durchgeführt. Die Versuchsplanung und –anlage sowie die Durchführung wurden dabei durch die Betriebsleiter unterstützt. Außerdem nahmen die Urproduzenten aktiv an OG-Treffen, und Veranstaltungen des Projektes teil und haben durch ihre Praxiserfahrungen und Expertise zur Erarbeitung von praxisnahen Lösungsansätzen für den Ökolandbau beigetragen. Zu den OG-Mitgliedern zählen folgende Urproduzenten: Hermann Künsemöller (Mühlenhof, Halle (Westfalen)), Christian Kroll-Fiedler (Biolandhof Kroll-Fiedler, Warstein-Belecke) und Carsten Weber (Weber-Berres GbR, Warstein-Suttrop).

### **Assoziierte Partner:**

Der fachliche Austausch im Projekt wurde zusätzlich durch assoziierte Partner unterstützt, die sich für die thematischen Fragestellungen von Öko-P interessieren und wertvolles Fachwissen für die fachliche Einordnung und Auswertung der Versuchsergebnisse mit sich bringen.

TH Bingen: Prof. Appel von der TH Bingen ist ein führender Experte zur Phosphordynamik in Böden. Sein Labor hat Verfahren entwickelt, welche die Quantifizierung von Phosphor im Boden stark verbessern. Daher besitzt seine Arbeitsgruppe großes fachliches und labortechnisches Fachwissen in diesem Bereich und kann die Arbeit des Projektes somit gewinnbringend unterstützen.

Darüber hinaus wurde das Projekt durch drei weitere landwirtschaftliche Betriebe bzw. deren Betriebsleiter unterstützt: Stefan von Bonin (Gut Körtlinghausen, Rüthen),

Wilfried Tölkes (Höfferhof Tölkes, Much) und Dirk Liedmann (Kornkammer Haus Holte, Witten).

#### IV. Projektgebiet

Zur Klärung der Versuchsfragen wurden Flächen an geeigneten Standorten in Nordrhein-Westfalen ausgewählt. Diese wurden unter den Anforderungen und Richtlinien des Ökolandbaus bewirtschaftet und zeigten deutlichen P-Mangel ( $< 2,18$  mg P /100 g Boden). Zwei der Standorte liegen zwischen Soester Börde und Sauerland (Warstein-Belecke und Warstein-Suttrop). Ein weiterer Standort in Halle (Westfalen).



**Abbildung 1:** Lage Versuchsstandorte Öko-P in NRW

Während die zwei Betriebe in Warstein neben dem ökologischen Ackerbau zusätzlich jeweils 80 – 90 Milchkühe halten, betreibt der Betrieb in Halle ausschließlich ökologischen Gemüse- und Ackerbau und ist viehlos. Demnach wird in Warstein ein Großteil der Nährstoffzufuhr über Gründüngungspflanzen und organische Wirtschaftsdünger aus dem eigenen Betrieb gedeckt, während der Betrieb in Halle (Westfalen) ebenfalls über Gründüngungspflanzen in der Fruchtfolge und teilweise



über organische Düngemittel einer Futter-Mist-Kooperation Nährstoffe den Flächen zuführt.

## V. Projektlaufzeit und -dauer

Durchführungszeitraum: 01.02.2020 – 31.12.2022 (35 Monate)

Bewilligungszeitraum: 05.05.2020 – 30.06.2023

Enddatum: ursprünglich 31.10.2022, kostenneutrale Verlängerung um zwei Monate bis zum 31.12.2022.

## VI. Budget

Zuwendungsfähige Gesamtausgaben: 483.963,84 €

## VII. Ablauf des Vorhabens

Das Projekt gliedert sich in fünf Arbeitspakete. Eine detailliertere chronologische Beschreibung des Projektverlaufs folgt außerdem in IV. c). Das genaue Versuchsdesign sowie die Methoden zur Datenerhebung und der Laboranalysen sind den Abschlussarbeiten (Wantulla 2022, Klimpel 2022 und tho Seeth 2022) zu entnehmen.

### AP 1 Versuchsplanung und -anlage mit Betrieben (ca. Februar 2020 – Mai 2021):

Für die Auswahl relevanter P-Rezyklate unter den Bedingungen des Ökolandbaus und der Erarbeitung eines wissenschaftlichen und zeitgleich praxisnahen Versuchsdesigns war die Anfangsphase des Öko-P Projektes geprägt von einer umfassenden Recherche zu verschiedenen Themen der Abwasseraufbereitung, Verfahrenstechnik, rechtlichen Anforderungen und Zulassungsprozessen für neue Düngemittel sowie naturwissenschaftlichen Prozessen der komplexen P-Dynamik im Boden. Hierzu pflegte die Projektleitung intensive Netzwerkarbeiten und einen guten fachlichen Austausch mit Expert\*innen aus der landwirtschaftlichen Beratung, Verbänden, Wissenschaft, Zulassungsbehörden, Politik und Praktiker\*innen.

Die ausgewählten P-Rezyklate wurden auf ihre Schadstoff- und Schwermetallgehalte gemäß der Düngemittel- und der Klärschlammverordnung überprüft, um die Unbedenklichkeit des Einsatzes dieser neuen Produkte sicherzustellen.

Zusammen mit den landwirtschaftlichen Betrieben wurden geeignete Teilflächen auf den zuvor identifizierten P-Mangel Standorten ausgewählt. An jedem Standort wurden jeweils zwei Versuche (Mais und Klee gras) in Form einer vollrandomisierten

Blockanlage mit jeweils vier Wiederholungen angelegt. Die beiden Feldversuche im Frühjahr 2021 wurden mit fünf unterschiedlichen P-Recyclingdüngern gedüngt. Zum Vergleich wurden außerdem noch eine mit P ungedüngte Kontrolle, eine Variante mit dem im Ökolandbau gebräuchlichen Rohphosphat und eine Variante mit voll wasserlöslichem Tripelsuperphosphat (TSP) angelegt, sodass sich insgesamt acht Varianten bzw. Parzellen je Wiederholung ergaben. Die Ausbringung der Düngemittel erfolgte händisch und parzellengenau durch die Mitarbeitenden der LWK NRW. Die Einarbeitung der Düngemittel in den Oberboden sowie die Aussaat wurde durch die Praxisbetriebe übernommen.

#### AP 2 Versuchsdurchführung mit Betrieben:

Durch regelmäßige Bonituren sowie Analysen von Pflanzen- und Bodenproben und die Auswertung der entsprechenden Daten wurden nicht nur die Effekte der Recyclingdünger auf die gedüngte Kultur, sondern die Auswirkung auf die komplette Fruchtfolge untersucht.

Das Klee gras wurde je nach Entwicklung und Standort drei bis vier Mal im Jahresverlauf geschnitten. Zu diesen Zeitpunkten wurden Quadratmeterschnittproben aus jeder einzelnen Parzelle entnommen, um den Bestand auf Gesamtmasse und TM-Gehalt zu untersuchen und so den Ertrag zu ermitteln. Es wurden Teilproben an die Uni Bonn versendet, um die P- und N-Gehalte bestimmen zu lassen.

Um Aussagen über den Einfluss der Düngung auf den Maisbestand treffen zu können, wurden während der Vegetationsperiode (Mai – September) in regelmäßigen Abständen Bonituren zur Bestandsdichte, Pflanzenlänge, Pflanzendurchmesser, Blattanzahl und Entwicklungsstadium vorgenommen. Zum Zeitpunkt der Zwischen- und Endernte wurde der Biomasseertrag erfasst und Teilproben zur Nährstoffanalyse an die Uni Bonn versendet.

#### AP 3 Laboranalysen der Boden- und Pflanzenproben durch wissenschaftliche Partner

Neben den Standardbodenuntersuchungen wurden im Projekt alternative Untersuchungsmethoden angewandt, die zusätzliche Informationen über die komplexen P-Dynamiken im Boden und den Einfluss der P-Reyklate auf diese liefern. In enger Zusammenarbeit und fachlichem Austausch mit der Uni Bonn wurde hierfür als geeignete Methode die sequentielle P-Fraktionierung ausgewählt und im Labor der Uni Bonn durchgeführt.

Durch die Bestimmung der N- und P-Gehalte der Pflanzen (s. AP 2), wurde außerdem die Nährstoffaufnahme (Nährstoffgehalt x Ertrag, kg P ha<sup>-1</sup>) aus den Rezyklaten durch die Kulturen quantifiziert. Mithilfe dieser wurden weitere Parameter, wie bspw. Düngeräquivalente und P-Aufnahmeeffizienzen, berechnet werden, welche eine Einordnung der Wirksamkeit dieser Düngemittel ermöglichen.

Im Rahmen des Projektes wurden mehrere Abschlussarbeiten verfasst, die sich intensiv mit der Auswertung und Interpretation von Teilversuchen des Projekts beschäftigten (s. Anhang).

#### AP 4: Gesamtdatenauswertung

Wie oben beschrieben (AP 2), erfolgte die Datenerfassung und Probenaufbereitung in den Versuchsanlagen durch Mitarbeitende der LWK NRW. Die Datenerfassung der Laborergebnisse erfolgte zunächst in Bonn (AP 3). Durch die sehr engmaschige Datenerhebung, sowohl im Feld als auch im Labor, ergab sich ein sehr umfangreicher Datensatz. Diese Daten wurden durch die studentischen Hilfskräfte und die Projektleitung elektronisch erfasst und validiert. Nach einer statistischen Auswertung, wurden die Daten mit entsprechender wissenschaftlicher Literatur und aktuellen Studienergebnissen verglichen und eingeordnet.

#### AP 5: Öffentlichkeitsarbeit und Wissenstransfer

Die ausgewerteten Daten wurden grafisch aufbereitet und für Veranstaltungen und Publikationen den Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Auf Grundlage der Ergebnisse wurde eine Informationsbroschüre erarbeitet, die über verschiedene Verteiler der LWK NRW und auf öffentlichen Veranstaltungen präsentiert und verbreitet wurde.

Darüber hinaus erarbeitet die Uni Bonn derzeit eine wissenschaftliche Publikation, die im Journal für Kulturpflanzen des Julius-Kühn-Instituts veröffentlicht werden soll.

Während der Projektlaufzeit wurde außerdem ein regelmäßiger Austausch mit Vertreter\*innen des Landwirtschaftsministeriums, des LANUVs und verschiedener weiterer Organisationen geführt, um den Zulassungsprozess der neuen Recyclingprodukte für den Ökolandbau zu unterstützen. Argumente und Formulierungen zur Anpassung der EU-Öko-VO wurden dafür gesammelt und regelmäßig diskutiert. Mit der neuen EU-Düngemittelverordnung sind einige der P-Recyclingprodukte nun für die konventionelle Landwirtschaft zugelassen, wodurch

eine der Grundvoraussetzungen für eine Zulassung im Ökolandbau gegeben ist. Des Weiteren sieht ein neuer Entwurf der EU-Öko-Verordnung die Zulassung von Struvit (eine Produktgruppe der Recyclingdünger) für den Ökolandbau vor.

## VIII. Zusammenfassung der Ergebnisse

Durch die Schadstoffanalysen der Rezyklate konnte gezeigt werden, dass die im Projekt untersuchten Produkte nach dem jetzigen Wissensstand unbedenklich in ihrer Anwendung sind, da alle Grenzwerte der Düngemittel- und Klärschlammverordnung eingehalten wurden.

Die Wirksamkeit der Rezyklate konnte nur bedingt nachgewiesen werden. Zwar konnte bei beiden Kulturen eine signifikant erhöhte P-Aufnahme durch mindestens eines der Struvite (Produktgruppe der P-Rezyklate) festgestellt werden, allerdings hatte dies wenig Auswirkung auf die Ertragsbildung. Bei den anderen drei Rezyklaten konnten weder signifikante Effekte auf die P-Aufnahme noch auf die Ertragsbildung festgestellt werden.

Es weisen die Ergebnisse darauf hin, dass eine Düngung durch die Rezyklate teilweise zu einer verbesserten Pflanzenentwicklung im Jungpflanzenstadium von Mais führt. Somit könnte durch die Rezyklate zwar keine Ertragssteigerung, aber durchaus eine Ertragssicherung unter erschwerten Anbaubedingungen (z.B. starken Mangelbedingungen oder extreme Wetterereignisse, wie Trockenheit oder starke Niederschläge) erreicht werden. Laut Aussage der im Projekt beteiligten Landwirte wäre dies ein ausreichendes Argument, um die Produkte in ihren Betrieben zu bedürftigen Kulturen gezielt einzusetzen.

Die umfassende Analyse der Bodenproben mittels sequentieller P-Fraktionierung im Rahmen des Projektes lieferte zudem Aufschlüsse zur P-Dynamik im Boden nach einer Düngung und zeigte, dass die Gehalte der leicht verfügbaren P-Fractionen im Boden durch Struvit deutlich erhöht wurden. Dies bietet Grund zur Annahme, dass der Phosphor aus diesem Rezyklat für die Pflanzen direkt zur Verfügung stehen und somit einen deutlichen Beitrag zur Pflanzenernährung unter P-Mangelbedingungen leisten könnte.

Bei der Interpretation der Feldversuche im Öko-P Projekt sollte berücksichtigt werden, dass die Ergebnisse sich nur auf einen Zeitraum von zwei Jahren beziehen, die zusätzlich geprägt waren durch außergewöhnliche klimatische Bedingungen (feuchte

Witterung im Frühjahr im Jahre 2021 und Trockensommer in 2022). Das hohe Ertragsniveau der ungedüngten Pflanzen deutet außerdem darauf hin, dass P kein ertragslimitierender Faktor für die Pflanzenentwicklung darstellte und P-Reserven im Boden zur Pflanzenernährung beitragen konnten, die durch die Bodenanalyse nicht abgebildet wurden. Die Ergebnisse der Feldversuche sollten deshalb durch weitere Forschungsergebnisse überprüft und validiert werden. Die Versuchsflächen sollen deshalb weiterhin durch die Landesinitiative *Leitbetriebe Ökologischer Landbau in NRW* begleitet und untersucht werden, um den tatsächlichen Langzeitdüngeneffekt der Rezyklate auf Boden und Pflanze weiter zu untersuchen.

Nichtsdestotrotz ermöglichen diese Ergebnisse Rückschlüsse auf die Pflanzenverfügbarkeit der Produkte. Denn sie zeigen, dass der Phosphor aus den Struviten für die Pflanzen verfügbar ist und aufgenommen werden kann (erhöhte P-Aufnahmen und Bodengehalte an leicht verfügbaren P). Demnach ist davon auszugehen, dass die Rezyklate unter deutlichen Mangelzuständen Phosphor für die Pflanzenernährung bereitstellen und dem Abbau der P-Bodenreserven entgegengewirkt.

Zudem hat das Projekt einen deutlichen Beitrag zur Aufmerksamkeit und Akzeptanz des Einsatzes von P-Rezyklaten in der Landwirtschaft geleistet. Durch die direkte Einbindung der Praxis in dem Projekt konnte eine gewisse Transparenz geschaffen werden, die die Bedenken und Hemmnisse der Betriebe abbauen konnte. Durch aktive Öffentlichkeitsarbeit in Form von Feldtagen, Präsentationen, Presseartikeln, dem aktiven Austausch mit verschiedenen Akteuren aus Wissenschaft, Politik und Praxis sowie der Teilnahme an Veranstaltungen konnte mehr Aufmerksamkeit für dieses Thema generiert und mehr Akzeptanz geschaffen werden. Im Laufe der Projektlaufzeit wurden verschiedene P-Rezyklate durch die neue Düngemittelverordnung zugelassen und auch die EU-Öko-Verordnung ist momentan in Abstimmung und sieht vor, Struvite für den Ökolandbau zu akzeptieren.

## **B. Eingehende Darstellung**

### **I. Verwendung der Zuwendung**

Siehe Zwischenverwendungsnachweis und Schlussnachweis.

## II. Detaillierte Erläuterung der Situation zu Projektbeginn

### a) Ausgangssituation

Auf vielen landwirtschaftlichen Betrieben wird Phosphor zunehmend zu einem limitierenden Faktor der Ertragsbildung von Kulturpflanzen. Insbesondere bei stark spezialisierten Betrieben verlassen mit dem Verkauf der erzeugten Produkte mehr Nährstoffe den Betrieb als rückgeführt werden und es entstehen Phosphordefizite.

Dies betrifft konventionelle wie ökologische Betriebe gleichermaßen, doch insbesondere im Ökolandbau zeigen Datenerhebungen zu den P-Bilanzen im Acker- und Grünland in Deutschland, dass bereits heute ein bedeutender Anteil der ökologischen Flächen an P unterversorgt ist. Hinzu kommt, dass im Durchschnitt negative P-Bilanzen von ca. 5 kg P/ha pro Jahr zu bilanzieren sind. Es ist also davon auszugehen, dass sich der P-Versorgungszustand der landwirtschaftlichen Böden in Deutschland weiter verschlechtern und in Zukunft deutlich mehr Betriebe unter den Auswirkungen von P-Mangelzuständen auf ihren Flächen leiden werden.

Die Möglichkeiten diese Defizite im Ökolandbau auszugleichen sind begrenzt. Entsprechend des Kerngedankens des Ökolandbaus sollen durch eine nachhaltige Wirtschaftsweise Ressourcen geschont und betriebsinterne Nährstoffkreisläufe gestärkt werden. Doch in der Realität ist der P-Kreislauf bei den meisten Betrieben nicht geschlossen und ein Großteil dieses wertvollen Rohstoffs geht über den Abwasserweg verloren. Für eine externe P-Zufuhr seiner Böden ist der Ökolandbau im Wesentlichen auf Wirtschaftsdünger und weicherdige Rohphosphate begrenzt. Letztere stehen aus verschiedenen Gründen zunehmend in der Kritik. Produktionstechnisch ist die Anwendung der Rohphosphate umstritten, da diese eine geringen Pflanzenverfügbarkeit aufweisen und je nach Herkunft beachtliche Mengen an Blei, Cadmium und Uran enthalten können, die mit der Düngung in die Böden eingetragen und von Pflanzen aufgenommen werden.

Außerdem sind alle Rohphosphat-Importe nach Deutschland mit weiten Transportwegen verbunden. Europa ist fast vollständig auf Lieferungen aus dem EU-Ausland, insbesondere aus Marokko, Russland und Algerien, angewiesen. Mit Blick auf die aktuellen geopolitischen Entwicklungen ist diese Importabhängigkeit problematisch und eine konstante Verfügbarkeit dieses fossilen und somit endlichen Rohstoffs schon in naher Zukunft ungewiss.

Angesichts der zur Neige gehenden globalen P-Reserven und des steigenden P-Bedarfs in der Landwirtschaft, hat die Europäische Kommission bereits 2014 Phosphor als einen von 20 Stoffen in die Liste der kritischen Rohstoffe aufgenommen. Dies soll einen Anreiz für den bewussten und nachhaltigen Umgang mit diesem kritischen Rohstoff in Europa schaffen.

Das verdeutlicht die Dringlichkeit alternative P-Quellen und Düngemittelprodukte zu erschließen, die eine deutliche Verbesserung hinsichtlich ihrer Wirksamkeit, Umweltverträglichkeit und Ressourcenverbrauch gegenüber herkömmlichen P-Düngern darstellen können.

Dementsprechend wird seit einigen Jahren unter anderem intensiv an der Rückgewinnung von Phosphor in der Abwasseraufbereitung geforscht. Mit diesem Lösungsansatz könnten laut Berechnungen des Bundesministeriums für Landwirtschaft und Ernährung (BMEL) bis zu 40% der P-Mineraldünger ersetzt werden. Denn Nährstoffkreisläufe könnten somit auf regionaler Ebene über die kommunale Abwasserreinigung geschlossen und Ressourcen geschont werden.

Zusätzlich wird dieser Ansatz durch die Politik in Form der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) von 2017 unterstützt, die Kläranlagen dazu verpflichtet Phosphor rückzugewinnen. Dementsprechend drängen momentan eine Vielzahl verschiedener Verfahrenstechniken und daraus entstehender phosphorhaltiger Recyclingdünger (P-Rezyklate) auf den Markt. Einige dieser Produkte wurden bereits in Gefäßversuchen auf ihre Wirksamkeit getestet, doch praxisnahe Feldversuche unter den Bedingungen des Ökolandbaus sind hierzu bislang rar.

## **b) Projektaufgabenstellung**

Im Rahmen des Öko-P Projektes sollten fünf P-Rezyklate aus verschiedenen Herstellungspfaden in Zusammenarbeit mit ökologischen Praxisbetrieben unter den Bedingungen des Ökolandbaus untersucht werden. Ziel war es, die innovativen P-Rezyklatedünger herstellerunabhängig auf ihre Wirksamkeit und Nachhaltigkeit zu untersuchen und diese in einem für eine ökologische Fruchtfolge sinnvollen Gesamtkonzept zu etablieren.

Für die Erreichung dieses Gesamtziels wurden die Projektaufgaben in fünf Arbeitspakete gegliedert. Die Aufgaben und Ziele der einzelnen Pakete sollen im Folgenden beschrieben werden:

## AP 1 Versuchsplanung und -anlage mit Betrieben

Ziel des ersten Arbeitspaketes war die Erarbeitung eines geeigneten Versuchsdesigns, das zum einen den Ansprüchen der Wissenschaft entspricht und evidenzbasierte Schlussfolgerungen ermöglicht und das zeitgleich möglichst praxisnah die Realität der ökologischen Betriebe in NRW abbildet.

Demnach sollten Kulturen als Versuchspflanzen ausgewählt werden, die für den Ökolandbau von Relevanz und Teil üblicher ökologischer Fruchtfolgen sind und zudem deutlich auf P-Mangel reagieren. Durch die Düngung zu verschiedenen Kulturen sollte der Düngeeffekt auf verschiedene Pflanzen verglichen und deren Fruchtfolgeeffekt auf die nachfolgenden Kulturen untersucht werden. Hierzu sollten übliche ökologische Fruchtfolgen nachgebildet werden.

Um ein P-Düngeeffekt auf die Kulturen zu erzielen, sollte zusammen mit den Praxisbetrieben geeignete Teilflächen identifiziert werden, die eine deutliche P-Unterversorgung ( $< 2,18 \text{ mg P / 100 g Boden}$ ) aufweisen.

Die Auswahl der zu untersuchenden Produkte des Öko-P Projektes sollte dementsprechend eine Vielzahl an verschiedenen Herstellungspfaden und Produktgruppen abdecken, um Aussagen darüber treffen zu können, welche Verfahren zur Gewinnung von sicheren und wirksamen Düngemitteln geeignet sind. Basierend auf aktueller Literatur und wissenschaftlicher Studien sollten Produkte ausgewählt werden, die nachweislich eine Verbesserung hinsichtlich ihrer Schadstoffgehalte und Ökobilanz gegenüber dem Einsatz von Rohphosphat darstellen.

## AP 2 Versuchsdurchführung mit Betrieben

Ziel der Versuchsdurchführung war es, die Flächen möglichst praxisnah zu bewirtschaften und zeitgleich die Entwicklung der Pflanzen zu untersuchen und dabei möglichst engmaschig belastbare Daten zu generieren. Die Versuchsdurchführung sollte in enger Zusammenarbeit und regelmäßiger Abstimmung mit den Praxisbetrieben stattfinden. Während die Maschinenarbeiten (Bodenbearbeitung, Aussaat und Ernte etc.) durch die Praxisbetriebe selbst durchgeführt werden sollten, sollten die händische Versuchspflege und die Datenerfassung durch Bonituren und Beprobungen von Boden und Pflanzen durch die Mitarbeitenden der Landwirtschaftskammer NRW vorgenommen werden.



Für die Dokumentation der Entwicklung der Pflanzen sollten im Laufe der Vegetationsperiode engmaschige Termine für die Datenerfassung gesetzt werden. Im Mais sollte im Abstand von 10-14 Tagen Pflanzenlänge und Stängeldurchmesser erfasst werden. Repräsentative Mischproben der Kulturen sollten zu verschiedenen Zeitpunkten (Zwischen- und Endernte im Mais, vor jedem Schnitt bei Klee gras) entnommen und für weitere Laboranalysen an die Universität Bonn weitergeleitet werden.

Die Versuche sollten außerdem durch eine Dokumentation mithilfe von Bildern und Drohnenfotos begleitet werden.

### AP 3 Laboranalysen der Boden- und Pflanzenproben durch wissenschaftliche Partner

Neben den Standardbodenuntersuchungen sollten im Projekt außerdem alternative Untersuchungsmethoden angewandt werden, die zusätzliche Informationen über die komplexen P-Dynamiken im Boden und den Einfluss der P-Rezyklate auf diese liefern. In enger Zusammenarbeit und fachlichem Austausch mit der Uni Bonn sollte hierfür eine geeignete Methode ausgewählt werden.

Durch die Bestimmung der N- und P-Gehalte der Pflanzen, sollten außerdem die Nährstoffaufnahme (Nährstoffgehalt x Ertrag, kg ha<sup>-1</sup>) aus den Rezyklaten durch die Kulturen quantifiziert werden. Mithilfe dieser sollten weitere Parameter, wie bspw. Düngeräquivalente und P-Aufnahmeeffizienzen, berechnet werden, die eine Einordnung der Wirksamkeit dieser Düngemittel ermöglichen.

### AP 4: Gesamtdatenauswertung

Ziel des AP 4 war die Zusammenfassung und Auswertung der erhobenen Daten aus Feld (AP 2) und Labor (AP 3). Diese sollte die Pflanzenverfügbarkeit und Wirksamkeit der neuen P-Rezyklate unter Praxisbedingungen des Ökolandbaus überprüfen.

Hierzu sollten die Daten durch alle beteiligten Partner digitalisiert und an die Projektleitung übertragen werden. Mit der Unterstützung der wissenschaftlichen Partner und mithilfe einer geeigneten Statistik-Software sollten die Daten statistisch ausgewertet und mit vorhandener Literatur verglichen und validiert werden.

Ende 2022 sollte eine Datenzusammenführung und Plausibilitätsprüfung für die Gesamtdatenauswertung der Datenerfassung aus Feld und Labor von allen Versuchsjahren und Standorten stattfinden.

## AP 5: Öffentlichkeitsarbeit und Wissenstransfer

Ziel des AP 5 war die Kommunikation und Verbreitung der Ergebnisse und Erkenntnisse des Projektes.

Zum Zwecke der Öffentlichkeitsarbeit sollten die Daten deshalb grafisch aufgearbeitet und allen Projektpartner\*innen für Veranstaltungen und Veröffentlichungen zur Verfügung gestellt werden.

Zusätzlich sollten Infomaterialien erarbeitet werden, wie bspw. Broschüren, Poster, Handouts für Feldtage oder Workshops der LWK NRW. Diese Materialien sollten sich an die interessierte Öffentlichkeit wenden und über den Hintergrund der P-Rückgewinnung in Kläranlagen, die zunehmende P-Problematik in der Landwirtschaft und den Einsatz neuer Recyclingprodukte als Düngemittel aufklären.

Die Ergebnisse der Feldversuche sollten außerdem durch die Beratung der Landwirtschaftskammer NRW direkt in die Praxis übertragen und Rückmeldungen an die Projektleitung weitergeleitet werden.

Bei positiver Ergebnissen hinsichtlich der Wirksamkeit und Sicherheit der P-Rezyklate sollten die Ergebnisse des Projektes die Zulassung dieser neuen Düngemittel für den Ökolandbau unterstützen. Um die Forschung und das Versuchswesen im Ökolandbau zu unterstützen sollen die bürokratischen Hürden für die Durchführung kleinräumiger Feldversuche abgebaut werden. Hierzu sollten Gespräche mit den entsprechenden Zulassungsbehörden geführt werden, um hier eine allgemeine Ausnahmeregelung für Düngungsversuche – ähnlich zu dem Passus in der EU-Öko-Verordnung zu Sortenversuchen – zu erwirken.

### **III. Ergebnisse der OG in Bezug auf**

#### **a) Gestaltung der Zusammenarbeit in der OG**

Die Zusammenarbeit zwischen den einzelnen Mitgliedern der Operationellen Gruppe gestaltete sich als sehr kooperativ und zielorientiert.

Entsprechend der Grundidee des EIP Forschungsprogramms kam die Initiative zu diesem Projekt aus der Praxis und wurde über die Beratung an die Landwirtschaftskammer herangetragen und führte somit letztendlich zu einer Erarbeitung eines Projektantrages zu diesem Thema. Demensprechend zeigten die beteiligten Praxisbetriebe ein hohes Maß an Eigeninteresse, um mögliche Lösungsansätze für den bestehende P-Mangel auf den eigenen Flächen zu finden und

nachhaltigere Alternativen zu den herkömmlichen P-Düngemitteln im Ökolandbau unter Praxisbedingungen zu untersuchen.

Aufgrund der Coronapandemie und der Distanz zwischen den Standorten der Projektpartner konnten in den ersten Jahren nur wenige Treffen mit allen Beteiligten in Präsenz stattfinden. Stattdessen wurden halbjährliche digitale OG-Treffen abgehalten und ein regelmäßiger Informationsaustausch zwischen den Projektpartnern gepflegt. Das letzte OG-Treffen im Dezember 2022 fand in Präsenz statt. Alle OG-Treffen waren stets sehr produktiv und hilfreich. Sowohl von den wissenschaftlichen Partnern, als auch von der Projektleitung und den Praxisbetrieben wurden für die OG-Treffen Beiträge und Präsentationen vorbereitet, die als Einstieg in den fachlichen Austausch und guten Diskussionsrunden dienten.

Die Versuchsflächen wurden außerdem im Rahmen eines Feldtages im Juni 2021 besucht, um die Ergebnisse gemeinsam zu diskutieren.

Durch die Zusammenarbeit mit der Uni Bonn wurden im Öko-P Projekt zudem zwei Masterarbeiten zu den Themen „Einfluss von P-Recycling-Düngern auf Ertrag und P-Effizienz von Öko-Mais“ (Tim Wantulla) und „Einfluss von P-Recycling-Düngern auf Ertrag und P-Aufnahme von Klee gras im Ökologischen Landbau“ (Charlotte Klimpel) anhand der Versuchsdaten von 2021 verfasst. Darüber hinaus wurden die Ergebnisse der Bodenprobenanalysen mittels sequentieller P-Fraktionierung im Rahmen einer Bachelorarbeit untersucht und ausgewertet (Frederike tho Seeth). Eine weitere Abschlussarbeit befasst sich mit den Ergebnissen der Maisversuche aus 2022 (Leonie Palm). Die Abschlussarbeiten wurden durch Dr. Daniel Neuhoff aus dem Fachgebiet Agrarökologie und Organischer Landbau (AOL) des Instituts für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz (INRES) der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn betreut.

## **b) Mehrwert des Formates einer OG für die Durchführung des Projekts**

Der Mehrwert der OG ist insbesondere auf die transdisziplinäre Zusammensetzung der Gruppe zurückzuführen. Durch die gemeinsamen Fragestellungen und Ziele wurden in dem Projekt Vertreter\*innen aus Praxis, Forschung und der Beratung zusammengebracht und Ansätze untersucht, die maßgeblich durch die Praxis beeinflusst und konstruktiv umgesetzt werden konnten.

Das Projekt bildete somit eine wichtige Schnittstelle zwischen der wissenschaftlichen Forschung und Entwicklung an der Universität und der Umsetzung und Anwendung in der landwirtschaftlichen Praxis.

Die Planung, Durchführung und Auswertung des Projektes profitierte demnach von dem regelmäßigen Austausch und der kontinuierlichen Einbindung verschiedener Perspektiven durch die verschiedenen Projektpartner\*innen. Insbesondere die Einbindung der Landwirte selbst hatte hier einen merklichen Einfluss auf die Öffentlichkeitsarbeit, die Reichweite der Projektergebnisse und letztendlich der Akzeptanz bei weiteren landwirtschaftlichen Betrieben.

### **c) weitere Zusammenarbeit der Mitglieder der OG nach Abschluss des geförderten Projekts**

Durch das Projekt wurden wichtige Fragestellungen beantwortet, allerdings wurden durch die Ergebnisse und Erkenntnisse auch weitere Fragen aufgeworfen, die weiter untersucht werden müssen.

Nach Absprache mit den Praxisbetrieben und Kolleg\*innen der Landwirtschaftskammer NRW sollen die Versuchsflächen über die nächsten fünf Jahre weiter beprobt und untersucht werden, um den Langzeitdüngeneffekt der Rezyklate weiter zu beobachten.

Außerdem soll das Thema „Alternative P-Düngemittel“ nach Abschluss des Öko-P Projektes weitergeführt werden. Hierfür plant die Landwirtschaftskammer NRW ein neues Projekt, das neue P-Recyclingdünger aus Gülle und Gärresten untersucht und weitere Erkenntnisse zu den offenen Fragestellungen liefern soll. Sowohl die beteiligten Praxisbetriebe, als auch die Universität Bonn sind hier an einer weiteren Kooperation zu diesem Thema interessiert.

## **IV. Ergebnisse des Innovationsprojektes**

### **a) Zielerreichung**

#### AP 1 Versuchsplanung und -anlage mit Betrieben

In engem Austausch mit den wissenschaftlichen Partnern (TH Bingen und Uni Bonn) wurde ein wissenschaftliches und zeitgleich praxisorientiertes Versuchsdesign entworfen und an drei Standorten etabliert.

Zunächst wurden gemeinsam mit den Landwirten geeignete Teilflächen für die Versuchsanlage ausgewählt. Grundvoraussetzung, um einen Düngereffekt durch P zu erzielen, war hier eine P-Unterversorgung mit Gehalten  $< 2,18$  mg P /100 g Boden. An allen drei Standorten konnten geeignete Flächen gefunden werden, die zudem ein breites Spektrum an Standortbedingungen hinsichtlich pH-Wert, Bodenart oder auch mikrobieller Aktivität (P-Nachlieferungspotenzial) abbilden (s. Tabelle 1).

**Tabelle 1:** Standortbedingungen der Feldversuche von Öko-P

Standort	Halle (Westfalen)	Warstein-Belecke	Warstein-Suttrop
Bodenart	Sandiger Boden (Su2)	Schwerer Boden (Lu)	Schwerer Boden (Lu)
pH	5	6,4	5,3
P-Gehaltsklasse mg P / 100 g	A 1,14	B 2,18	A 0,87
P-Nachlieferungspotenzial	niedrig	niedrig bis mittel	mittel bis hoch

Anhand von intensiver Literaturrecherche und fachlichem Austausch mit Expert\*innen aus der Abwasseraufbereitung und der Düngemittelproduktion wurden fünf Rezyklate ausgewählt, die in den Feldversuchen untersucht wurden.

Bei der Auswahl der Produkte wurde darauf geachtet, möglichst verschiedene Herstellungspfade der P-Rezyklate abzudecken, um verschiedene Produktgruppen vergleichen und Anhaltspunkte für zukünftige Entscheidungen der Kläranlagen und der Politik liefern zu können, die die zukünftige Entwicklung der P-Rückgewinnung in Kläranlagen beeinflussen. Ausschlaggebend für eine Aufnahme in den Feldversuchen war hier zum einen eine vorhandene Datengrundlage zu den Produkten, die darauf hindeutet, dass diese neuen Produkte eine Verbesserung hinsichtlich Ressourcenverbrauch, Wirksamkeit und Schadstofffreiheit gegenüber den bislang gebräuchlichen Rohphosphaten darstellen. Hierzu wurden außerdem Schadstoffanalysen durchgeführt, durch die gezeigt werden konnte, dass die ausgewählten Produkte unbedenklich in ihrer Anwendung sind, da alle Grenzwerte der Düngemittel- und Klärschlammverordnung eingehalten wurden (s. Anhang). Zum anderen war auch die Verfügbarkeit von ausreichenden Produktmengen für die Düngung der Flächen ein wichtiger Punkt, der bei der Vorauswahl zum Ausschluss

einiger Produkte aus dem Projekt führte. Die Produkteigenschaften der ausgewählten P-Rezyklate sind im Folgenden aufgeführt:

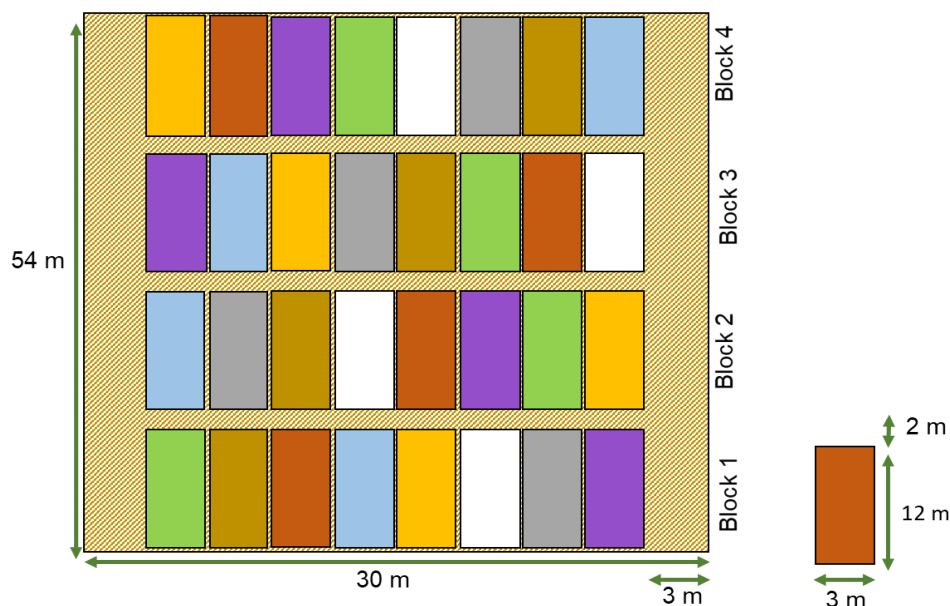
**Tabelle 2:** Eigenschaften der fünf ausgewählten P-Rezyklate

Produkttyp	Struvit		Karbonisat	Asche	Kohle
Name	Crystal Green	Berliner Pflanze	Pyreg	AshDec	Knochenkohle <sup>+</sup>
Ausgangsstoff	Klärschlamm-wasser	Klärschlamm	Getrockneter Klärschlamm	Klärschlamm-asche	Knochenchips
Verfahren	Kristallisationsverfahren		Karbonisierung	Thermische Behandlung	Pyrolyse
P-Gehalt	11%	11%	6%	7%	11%
					

Als repräsentative Kultur wurden Klee gras und Mais als Versuchspflanzen gewählt und in zwei Fruchtfolgeversuchen integriert (FF1: Klee gras – Mais – Grünroggen; FF2: Mais – Klee gras – Grünroggen). Beide Kulturen sind wichtige und gängige Bestandteile von üblichen ökologischen Fruchtfolgen. Mais ist eine wichtiger Cash Crop für viele Betriebe und reagiert vor allem im Jungpflanzenstadium empfindlich auf P-Mangel. Klee gras ist essentiell für das Nährstoffmanagement der Betriebe, da durch die Stickstofffixierung (N<sub>2</sub>-Fixierung) atmosphärischer N gebunden und in die Fruchtfolge eingebracht wird.

Da hier nur eine einmalige Düngung im Jahr 2021 stattfand, kann durch dieses Versuchsdesign nicht nur der Düngungseffekt zwischen einer Leguminose (Klee gras) zu einem Getreide (Mais) untersucht werden, sondern auch der Langzeitdüngeneffekt der Rezyklate im zweiten Jahr (2022) und der Fruchtfolgeeffekt auf die nachfolgende Kultur.

An jedem Standort wurden jeweils zwei Fruchtfolgeversuche über zwei Jahre im randomisierten Blockdesign mit acht Varianten in vier räumlichen Wiederholungen angelegt (s. Abbildung 2). Die Versuchsfelder wurden in jeweils 32 Parzellen pro Versuch mit einer Größe von 36 m<sup>2</sup> (3 m x 12 m) eingeteilt. Zum Vergleich wurden neben einer Nullkontrolle auch Rohphosphat und Tripelsuperphosphat untersucht, sodass sich insgesamt folgende acht Faktorstufen ergaben: AshDec = AD, Berliner Pflanze = BP, Crystal Green® = CG, Knochenkohle+ = KK+, Pyreg = PY, Rohphosphat = RP, Tripelsuperphosphat = TSP und Kontrolle ohne P-Düngung = K0.



**Abbildung 2:** Versuchsdesign Öko-P: randomisiertes Blockdesign mit vier Blöcken und acht Varianten

Die Düngung erfolgte im Frühjahr 2021 händisch und parzellengenau auf Grundlage einer Düngebedarfsermittlung einer 3-jährigen Fruchtfolge (Klee gras – Mais – Grünroggen) angepasst an die Bedingungen und Bedarfe der jeweiligen Standorte. Nach der Aufbringung der Produkte auf den Boden wurden diese durch die Landwirte betriebsüblich in den Oberboden eingearbeitet.

#### AP 2 Versuchsdurchführung mit Betrieben

Während die Maschinenarbeiten (Bodenbearbeitung, Aussaat und Ernte etc.) durch die Praxisbetriebe selbst durchgeführt wurden, wurde die händische Versuchspflege und die Datenerfassung durch Bonituren und Beprobungen von Boden und Pflanzen durch die Mitarbeitenden der Landwirtschaftskammer NRW vorgenommen werden.

Hierzu wurden im Mais in Abständen von 10-14 Tagen während der Wachstumsperiode Messungen der Pflanzenlänge und –durchmesser vorgenommen.

Zur Ertragsbestimmung wurden nach Abschluss des Längenwachstums (Zwischenernte) und zum Zeitpunkte der Ernte (Endernte) Pflanzen der Kernparzelle entnommen, im Feld gewogen und zur Probenverarbeitung und -analyse an die Uni Bonn geliefert. Hier wurde die Frisch- und Trockenmasse sowie die P- und N-Gehalte der Pflanzen bestimmt (s. AP 3).

Bei Klee gras wurden bei ausreichender Biomasseentwicklung vor jedem Schnitt repräsentative Proben aus den Parzellen entnommen. Hierzu wurde mit einem Schätzrahmen jeweils vier 0,25 m<sup>2</sup>-Schnitte entnommen, um in Summe 1 m<sup>2</sup> pro Parzelle zu beernten. Repräsentative Mischproben der Schnitte wurden an die Uni Bonn geliefert und auf die gleichen Parameter wie die Maispflanzen untersucht. Darauf basierend wurde dann der Trockenmasseertrag in dt/ha berechnet.

Um die Veränderung der P-Gehalte im Boden durch eine Düngung mit den verschiedenen Produkten zu erfassen, wurden an jedem Standort pro Parzelle jeweils eine repräsentative Bodenprobe vor der Düngung und eine Probe nach der ersten Vegetationsperiode (sechs Monate nach der Düngung) vorgenommen. Das Bodenmaterial wurde zur Analyse an das Labor der Uni Bonn versendet (AP 3).

#### AP 3 Laboranalysen der Boden- und Pflanzenproben durch wissenschaftliche Partner

Um die Aufteilung der Gesamt-P-Bodengehalte auf die unterschiedlichen P-Fractionen im Boden zu quantifizieren wurde in enger Zusammenarbeit mit der Bodenkunde der Uni Bonn und Prof. Appel der TH Bingen die sequentiellen P-Extraktion nach TIESSEN & MOIR (1993) ausgewählt.

Hierzu werden die Bodenproben mit steigender Stärke des Extraktionsmittels behandelt, woraus sich sechs P-Fractionen ergeben. Hierbei unterscheidet man in eine direkt pflanzenverfügbare Fraktion (I., Extraktion durch Wasser und Anionenaustauscher), eine leicht pflanzenverfügbare Fraktion (II., Extraktion durch NaHCO<sub>3</sub>), eine mittelmäßig pflanzenverfügbare Fraktion (III., gebunden an Fe und Al, Extraktion durch NaOH) und drei weitere Fraktionen, die nicht oder nur über einen längeren Zeitraum für die Pflanzenernährung verfügbar sind (IV.- VI., Extraktion durch HCl, HNO<sub>3</sub> und Wärme). Das Phosphat in den jeweiligen Fraktionen wurde gemäß dem Extraktionsschema von MURPHY & RILEYS (1962), extrahiert und die P-Konzentrationen mittels Phosphor-Molybdänblau Methode ermittelt.

Die Pflanzenproben wurden im Labor der Uni Bonn getrocknet und vermahlen und jeweils 200 mg Mahlgut mit je 3 ml konzentriertem H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> und 6 ml konzentrierter HNO<sub>3</sub>



in einem Mikrowellen-Aufschlussgerät (MARXpress der Firma CEM) aufgeschlossen. Zur Bestimmung der C- und N-Gehalte wurde ein Elementaranalyser (EA 3000 der Firma Eurovector) genutzt. Die P-Gehalte wurden mit Hilfe eines Continuous Flow Analysers (QuAAtro 39 der Firma Seal Analytical) mit der Molybdän-Blau-Methode ermittelt.

Eine detaillierte Beschreibung der Methoden sowie dem Vorgehen bei der Datenerhebung können den Abschlussarbeiten (Wantulla 2022, Klimpel 2022, tho Seeth 2022) im Anhang entnommen werden.

#### AP 4: Gesamtdatenauswertung

Die Teilversuche im Jahr 2021 sowie die Ergebnisse der sequentiellen P-Fraktionierung wurden im Rahmen von drei Abschlussarbeiten der Uni Bonn ausgewertet. Der Maisversuch wurde durch Tim Wantulla im Rahmen seiner Masterarbeit „Einfluss von P-Recycling-Düngern auf Ertrag und P-Effizienz von Öko-Mais“ statistisch ausgewertet. Der Klee grasversuch von Charlotte Klimpel zum Thema „Einfluss von P-Recycling-Düngern auf Ertrag und P-Aufnahme von Klee gras im Ökologischen Landbau“. Die Bachelorarbeit von Friederike tho Seeth beschäftigte sich mit dem Thema „Einfluss verschiedener P-Düngerarten auf die Zusammensetzung der P-Fractionen im Oberboden unter Mais“. Alle Abschlussarbeiten finden sich im Anhang.

Im zweiten Jahr (2022) wurde die Auswertung der Feldversuche durch die wissenschaftliche Projektleitung vorgenommen. Die Daten wurden mit den Ergebnissen aus dem Vorjahr (2021) verglichen und eine Datenauswertung und Interpretation über den kompletten Versuchszeitraum und alle Standorte vorgenommen.

Für die statistische Auswertung wurde hier das Programm R-Studio 4.1.2 verwendet. Es wurden zweifaktorielle Varianzanalysen (ANOVA; Faktoren Düngung und Standort) mit einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$  durchgeführt. Zur Überprüfung der Voraussetzungen für die Varianzanalysen wurde stets auf Normalverteilung (Shapiro-Test) und Varianzhomogenität (Levene-Test) geprüft.

Die Ergebnisse der statistischen Analyse wurden mit aktueller Literatur und Forschungsergebnissen aus anderen wissenschaftlichen Studien verglichen und validiert.

Für die Auswertung wurden die Klee gras- und die Maisdaten von den zwei Standorten in Warstein jeweils für die Jahre 2021 und 2022 zusammengefasst und ausgewertet. Wie in b) dargestellt konnten beide Feldversuche aus dem Jahr 2021 vom Standort Halle (Westfalen) nicht in der statistischen Auswertung berücksichtigt werden. Auch im Jahr 2022 konnte der Klee grasversuch aufgrund von Bodeneffekten nicht ausgewertet werden. Der Maisbestand hatte an diesem Standort ein deutlich höheres Ertragsniveau als die Maisversuche in Warstein, sodass auch im zweiten Jahr die statistische Auswertung der Maisdaten getrennt von den Versuchen in Warstein vorgenommen wurde.

Demnach beziehen sich die folgenden Ergebnisse ausschließlich auf die Versuche am Standort Warstein. Die wichtigsten Ergebnisse und Erkenntnisse sind im Folgenden dargestellt:

*Ergebnisse Bodenprobenanalyse und -auswertung:*

Aufgrund der zeit- und kostenintensiven Methode der sequentielle P-Fraktionierung musste der Probenumfang der Bodenprobenanalyse deutlich reduziert werden. Dementsprechend wurde nur die Bodenproben der Maisversuche an zwei Standorten (Warstein-Belecke und Warstein-Suttrop) sowie vier Varianten ausgewählt: Nullkontrolle, Positivkontrolle (TSP) und zwei der Rezyklate Crystal Green® (CG, Struvit) und AshDec (AD, Ascheprodukt).

Die Ergebnisse zeigten, dass durch eine Düngung ein Effekt auf die Gesamt-P-Bodengehalte im Vergleich zur Nullkontrolle erzielt werden konnte. In der differenzierten Betrachtung der einzelnen Fraktionen zeigte sich ein signifikanter Düngeeffekt beider Rezyklate auf die leichtlöslichen P-Gehalte der Böden.

**Tabelle 3:** Aufteilung Gesamt-P auf die sechs P-Fraktionen nach Tiessen & Moir (1993) sechs Monate nach einer Düngung durch die P-Rezyklate

Ort	Dünger	1	2	3	4	5	6	Total
Warstein-Belecke	AD	206	81	99	141	45	24	595
	CG	170	74	83	186	43	24	580
	TSP	191	66	64	160	37	24	542
	CON	151	38	59	168	41	24	480
Warstein-Suttrop	AD	95	51	347	234	33	32	793
	CG	137	71	488	232	73	31	1031
	TSP	78	127	436	225	53	31	951
	CON	36	88	448	189	69	32	861

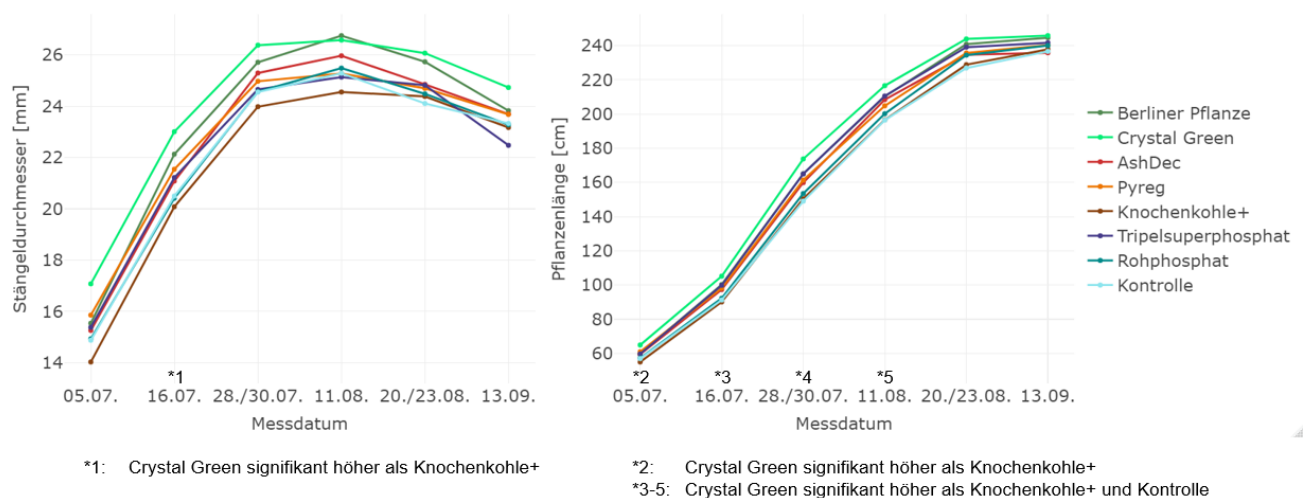
Diese umfassenden Analysen der Bodenproben lieferten somit wertvolle Informationen zur P-Dynamik im Boden nach einer Düngung durch die Rezyklate und

darüber, welche P-Pools im Boden durch die Düngung aufgefüllt wurden und in welche Fraktionen der Phosphor aus den Düngemitteln letztendlich gelangte. Dies lässt zusätzliche Annahmen zur Pflanzenverfügbarkeit der Rezyklate zu. Die Ergebnisse zeigten, dass die leicht verfügbaren P-Fractionen im Boden (Fraktion I.) durch die Rezyklate (CG (Struvit) und AD (Klärschlammmascheprodukt)) deutlich erhöht wurden (s. Tabelle 3). In den anderen Fraktionen konnte kein signifikanter Effekt nachgewiesen werden. Dies bietet Grund zur Annahme, dass der Phosphor aus den Rezyklate für die Pflanzen direkt zur Verfügung steht und somit einen deutlichen Beitrag zur Pflanzenernährung unter P-Mangelbedingungen leisten kann.

### Ergebnisse der Maisversuche

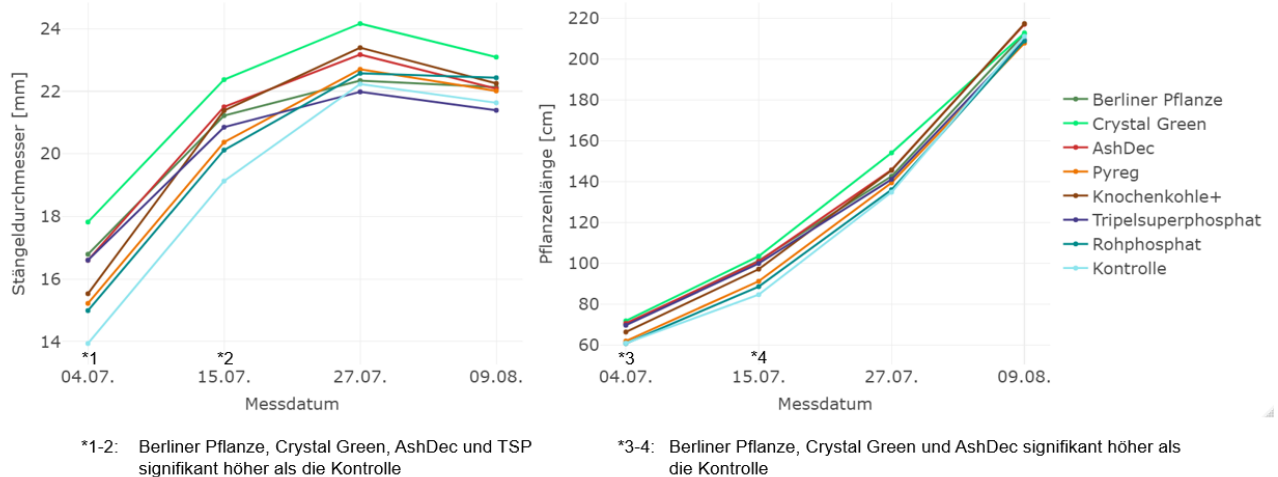
Im ersten Versuchsjahr (2021) wurden die Düngeprodukte kurz vor der Maisaussaat ausgebracht und in den Boden eingearbeitet, um den direkten Düngeeffekt dieser Produkte zu untersuchen. Im zweiten Versuchsjahr (2022) wurde Mais als Folgefrucht nach dem gedüngten Klee gras angebaut, um den Langzeitdüngeeffekt der Rezyklate zu beurteilen.

Durch die engmaschige Erfassung der Boniturdaten lässt sich erkennen, dass die Rezyklate in beiden Versuchsjahren einen signifikanten Einfluss auf die Jungpflanzenentwicklung hinsichtlich des Stängeldurchmessers [mm] und der Pflanzenlänge [cm] hatten. Im ersten Versuchsjahr zeigte CG (Struvit) zwischenzeitlich sowohl einen signifikant breiteren Stängeldurchmesser als auch eine größere Pflanzenlänge an vier Messterminen (s. Abbildung 3).



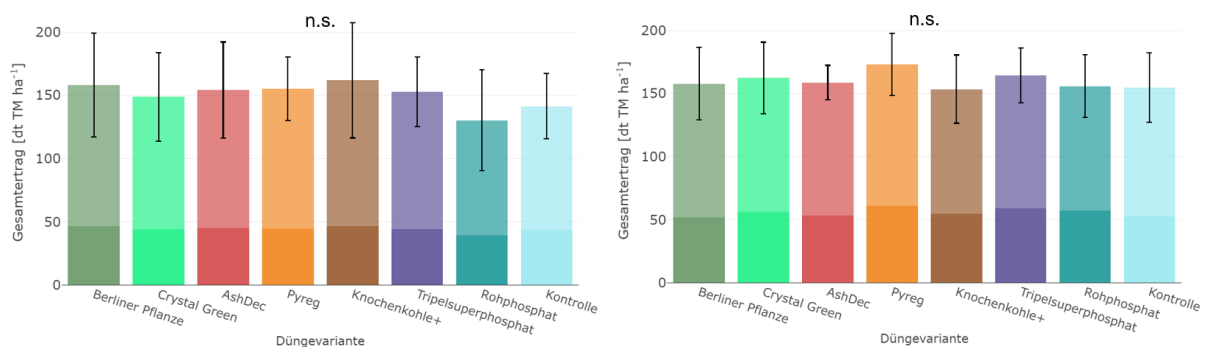
**Abbildung 3:** Maisversuche 2021 in Warstein: Stängeldurchmesser [mm] (links) und Pflanzenlänge [cm] (rechts) an sechs Messterminen in Abhängigkeit von der Düngervariante

Ein Jahr nach der Düngung zeigten auch die anderen Rezyklate einen signifikanten Düngeeffekt auf die Pflanzenentwicklung. Neben dem CG entwickelten sich hier auch die Pflanzen nachweislich größer, die mit BP (Struvit) und AD (Ascheprodukt) gedüngt wurden (s. Abbildung 4).



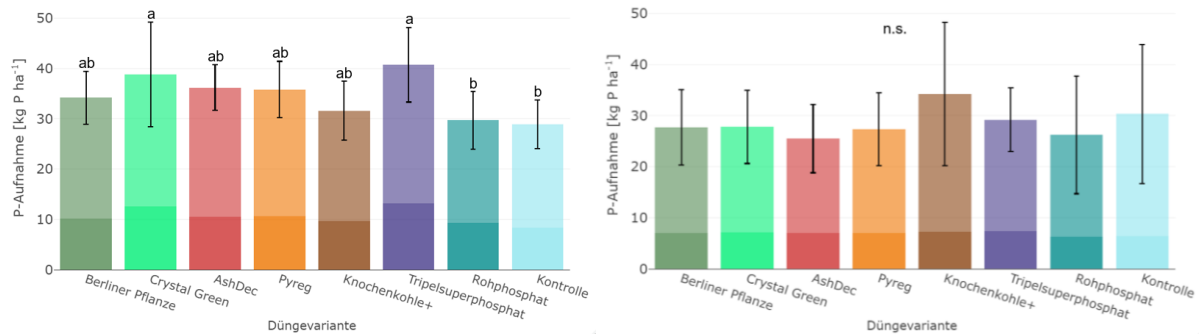
**Abbildung 4:** Maisversuch 2022 in Warstein: Stängeldurchmesser [mm] (links) und Pflanzenlänge [cm] (rechts) an vier Messterminen in Abhängigkeit von der Düngervariante

Wie sich bereits in den Abbildung 3 und Abbildung 4 abzeichnet, glichen sich die Varianten im Laufe der Entwicklung an und die unterschiedlichen Düngungen hatten schlussendlich keinen Einfluss auf die Ertragsentwicklung. Zum Zeitpunkt der Ernte waren weder in 2021 noch in 2022 signifikante Unterschiede im Ertrag [dt TM ha<sup>-1</sup>] erkennbar (s. Abbildung 5).



**Abbildung 5:** Maisversuche 2021 (links) und 2022 (rechts) in Warstein: Gesamterträge [dt TM ha<sup>-1</sup>] in Abhängigkeit von der Düngervariante: die Balken setzen sich zusammen aus dem Sprossmasseertrag (dunkel, unten) und dem Kolbenertrag (hell, oben)

Im ersten Versuchsjahr (2021) ließen sich allerdings signifikante Effekte auf die P-Aufnahme [kg P ha<sup>-1</sup>] nachweisen. Durch eine Düngung mit CG konnten deutlich höheren P-Gehalte in den Maispflanzen und eine höhere P-Aufnahme [kg P ha<sup>-1</sup>] von 38% erzielt werden als in der Kontrolle. Dieser Effekt konnte im zweiten Jahr nicht mehr nachgewiesen werden.



**Abbildung 6:** Maisversuche 2021 (links) und 2022 (rechts) in Warstein: Gesamt-P-Aufnahme [kg P ha<sup>-1</sup>] in Abhängigkeit der Düngervariante: die Balken setzen sich zusammen aus der Aufnahme der Sprossmasse (dunkel, unten) und der Kolben (hell, oben)

Die Ergebnisse der statistischen Auswertung der Maisdaten aus Warstein sind in folgender Tabelle 4 zusammengefasst, um die signifikanten Effekte übersichtlich darzustellen:

**Tabelle 4:** Übersicht Maisversuche 2021 und 2022 in Warstein: Mittelwerte und Signifikanzen der erhobenen Parameter in Abhängigkeit von der Düngervariante

		BP	CG	AD	PY	KK	TS	RP	OP	MW
2021	TM-Mais [dt/ha]	158 a	162 a	159 a	173 a	156 a	164 a	156 a	155 a	160
	Endernte, gesamt									
	P-Aufnahme Mais [kg/ha]	34 ab	40 a	36 ab	36 ab	32 ab	41 a	30 b	29 b	35
	Endernte, gesamt									
2022	P-Gehalt Mais [%]	0,23 abc	0,24 ab	0,25 a	0,22 abc	0,23 abc	0,25 a	0,21 c	0,21 bc	0,23
	Endernte, gesamt									
	TM-Mais [dt/ha]	158 a	149 a	154 a	155 a	162 a	153 a	130 a	141 a	150
	Endernte, gesamt									
2022	P-Aufnahme Mais [kg/ha]	28 a	28 a	26 a	27 a	34 a	29 a	26 a	31 a	29
	Endernte, gesamt									

#### Ergebnisse Maisversuch Standort Halle (Westfalen):

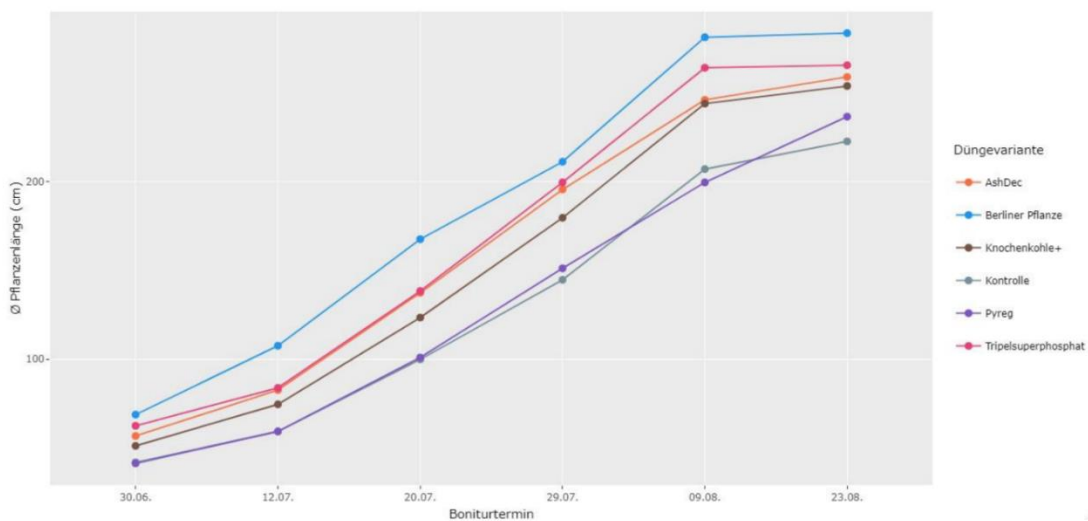
Wie bereits erwähnt wurde der Versuch am Standort Halle (Westfalen) stark beschädigt, sodass die geringe Bestandesdichte von durchschnittlich drei Pflanzen pro m<sup>2</sup> keine belastbare statistische Auswertung zuließ.

Allerdings diente der Versuch weiterhin als Demonstrationsversuch, da die Pflanzen in ihrer Entwicklung augenscheinlich starke Unterschiede in ihrem Längenwachstum in Abhängigkeit der Düngervariante zeigten (s. Abbildung 7).



**Abbildung 7:** Längenunterschiede im Maisversuch am Standort Halle (Westfalen), im Feld Juni 2021 (links), zur Zwischenernte Juli 2021 (rechts)

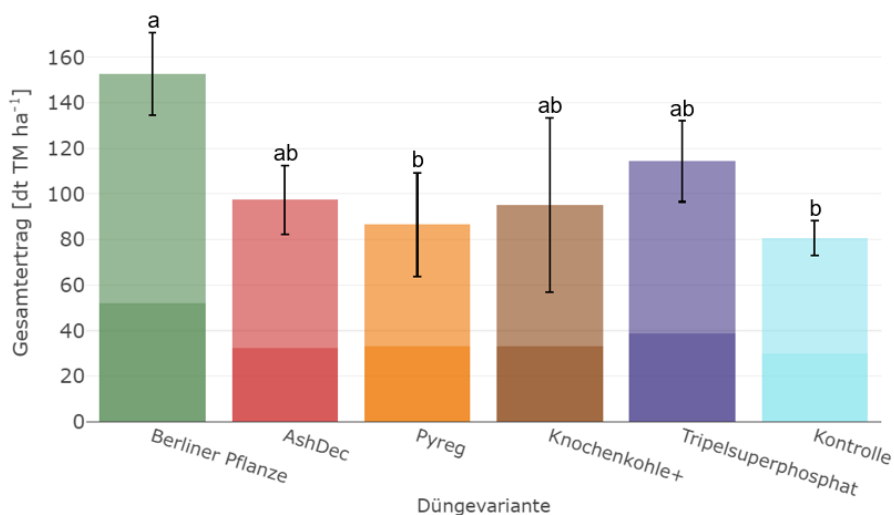
Um diesen Eindruck zu überprüfen, wurden die Boniturdaten der Düngevarianten graphisch aufbereitet und verglichen (s. Abbildung 8, Auswertung hier nur bedingt aussagekräftig, da Datensatz nicht statistisch belastbar).



**Abbildung 8:** Pflanzenlänge [cm] im Maisversuch am Standort Halle (Westfalen) in Abhängigkeit von der Düngevariante

In der graphischen Darstellung zeigt sich, dass die Rezyklate (Ausnahme: KK+) hier einen deutlichen Effekt auf die Pflanzenentwicklung haben und die Maispflanzen durch eine Düngung an allen Messterminen eine größere Pflanzenlänge verzeichnet als die Kontrolle (Ausnahme: PY).

Auch bei der Betrachtung der TM-Erträge [dt TM ha<sup>-1</sup>] zum Zeitpunkt der Ernte zeigt sich hier ein deutlicher Unterschied zwischen dem Struvit (BP) und der Kontrolle (s. Abbildung 9). Allerdings hatte die Düngevariante keinen Effekt auf die P-Gehalte der Maispflanzen (s. Tabelle 5)



**Abbildung 9:** Maiserträge [dt TM ha<sup>-1</sup>] 2021 am Standort Halle (Westfalen) in Abhängigkeit von der Düngevariante

Im Jahr 2022 zeigte der Maisversuch in Halle (Westfalen) einen deutlichen Standorteffekt auf die Ertragsbildung im Mais. Mit durchschnittlich 232 dt TM ha<sup>-1</sup> lag das Ertragsniveau hier deutlich höher als in den Maisversuchen in Warstein (durchschnittlich 150 dt TM ha<sup>-1</sup>). Dementsprechend wurden die Maisdaten der Versuche in Warstein zusammengefasst und statistisch ausgewertet (s. oben). Die Daten aus Halle (Westfalen) wurden getrennt betrachtet.

Im zweiten Jahr konnten hier zu keinem Zeitpunkt signifikante Unterschiede in der Pflanzenentwicklung (Pflanzenlänge und Stängeldurchmesser) oder zum Zeitpunkt der Ernte (TM-Ertrag) in Abhängigkeit von der Düngevariante festgestellt werden (s. Tabelle 5).

**Tabelle 5:** Übersicht Maisversuche 2021 und 2022 in Halle (Westfalen): Mittelwerte und Signifikanzen der erhobenen Parameter in Abhängigkeit von der Düngevariante

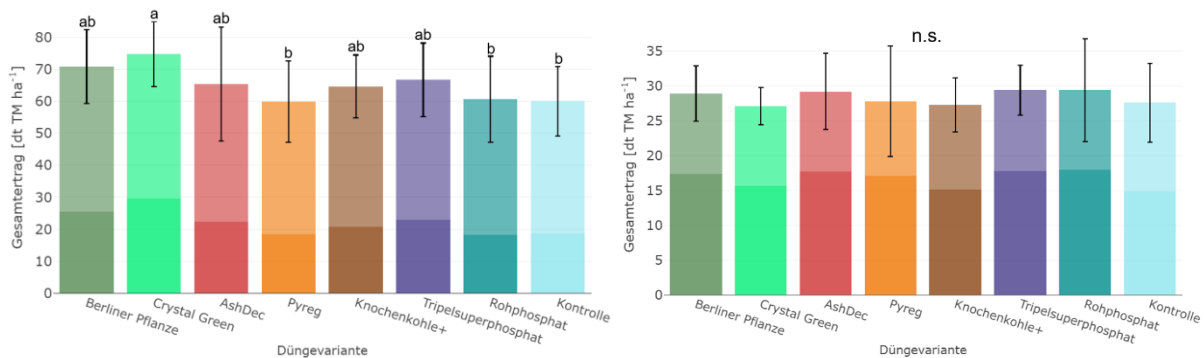
2021	TM-Mais [dt/ha] Endernte, gesamt	153 a		97 ab	87 b	95 ab	114 ab		81 b	95
	P-Aufnahme Mais [kg/ha] Endernte, gesamt	29 a		20 ab	16 b	18 b	23 ab		16 b	19
	P-Gehalt Mais [%] Endernte, gesamt	0,19 a		0,21 a	0,18 a	0,19 a	0,2 a		0,2 a	0,20
2022	TM-Mais [dt/ha] Endernte, gesamt	232 a		254 a	264 a	233 a	196 a		213 a	232
	P-Aufnahme Mais [kg/ha] Endernte, gesamt	57 a		51 a	64 a	46 a	42 a		52 a	51
	P-Gehalt Mais [%] Endernte, gesamt	0,24 a		0,2 a	0,24 a	0,2 a	0,22 a		0,25 a	0,22



## Ergebnisse der Kleeversuche

Im ersten Versuchsjahr (2021) wurden die Düngemittel kurz vor der Kleeaussaat ausgebracht und in den Boden eingearbeitet, um den direkten Düngereffekt dieser Produkte zu untersuchen. Im zweiten Versuchsjahr (2022) wurde Klee als Folgefrucht nach dem gedüngten Mais angebaut, um den Langzeiteffekt der Rezyklate zu beurteilen.

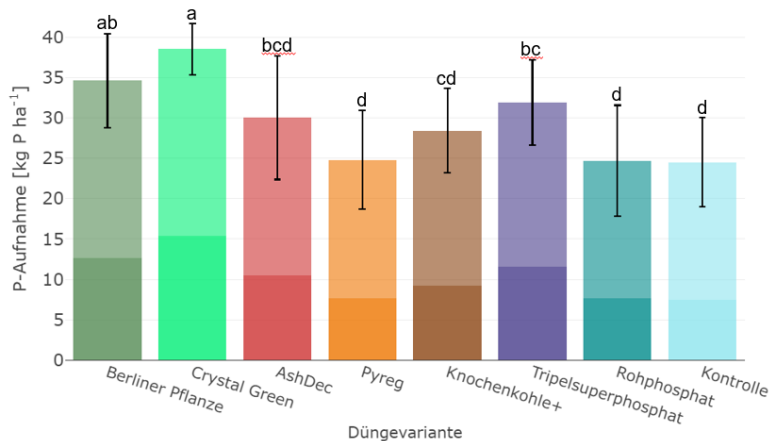
Im ersten Versuchsjahr (2021) konnte durch eine Düngung mit CG ein signifikanter Effekt auf den Ertrag erzielt werden (s. **Abbildung 10** (links) und 2022 (rechts): kumulierter Gesamtertrag [dt TM ha<sup>-1</sup>] in Abhängigkeit von der Düngemittelvariante (**Abbildung 10**). Der kumulierte TM-Ertrag [dt TM ha<sup>-1</sup>] lag hier deutlich höher als der der Kontrolle. Dieser Effekt konnte im zweiten Jahr nicht mehr nachgewiesen werden.



**Abbildung 10:** Kleeversuche 2021 (links) und 2022 (rechts): kumulierter Gesamtertrag [dt TM ha<sup>-1</sup>] in Abhängigkeit von der Düngemittelvariante

Ähnlich wie im Mais konnten auch im Kleeversuch im ersten Versuchsjahr (2021) signifikante Effekte auf die P-Aufnahme [kg P ha<sup>-1</sup>] nachgewiesen werden. Die unter CG, BP und TSP erzielten kumulierten Gesamt-P-Aufnahmen [kg P ha<sup>-1</sup>] waren jeweils 56%, 40% bzw. 28% höher als in der Kontrolle (s. **Abbildung 11**). Diese Unterschiede spiegeln sich in den P-Gehalten wieder, wobei hier auch AD signifikant die Kontrolle überstieg.





**Abbildung 11:** Klee grasversuch 2021: kumulierte Gesamt-P-Aufnahme [kg P ha<sup>-1</sup>] in Abhängigkeit von der Düngevariante

Die Ergebnisse der statistischen Auswertung der Klee grasdaten sind in folgender Tabelle 6 zusammengefasst, um die signifikanten Effekte übersichtlich darzustellen:

**Tabelle 6:** Übersicht Klee grasversuche 2021 und 2022: Mittelwerte und Signifikanzen der erhobenen Parameter in Abhängigkeit von der Düngevariante

		BP	CG	AD	PY	KK	TS	RP	OP	MW
2021	TM-Klee gras [dt/ha] Schnitt 1 und 2, gesamt	71 ab	75 a	65 ab	60 b	65 ab	67 ab	61 b	60 b	66
	P-Aufnahme Klee gras [kg/ha] Schnitt 1 und 2, gesamt	35 ab	39 a	30 bcd	25 d	28 cd	32 bc	25 d	25 d	30
	P-Gehalt Klee gras [%] Schnitt 1 und 2, gesamt	0,49 ab	0,51 a	0,46 bc	0,41 d	0,44 cd	0,48 abc	0,4 d	0,41 d	0,45
2022	TM-Klee gras [dt/ha] Schnitt 1 und 2, gesamt	29 a	27 a	29 a	28 a	27 a	30 a	29 a	28 a	28

*Zusammenfassung der Ergebnisse und Fazit:*

Die leichtlöslichen und pflanzenverfügbaren P-Fractionen im Boden konnten durch eine Düngung mit CG und AD signifikant erhöht werden.

Im ersten Versuchsjahr (2021) konnten signifikante Ertragseffekte von CG bei Klee gras sowie signifikante Effekte der Struvite auf die P-Aufnahmen und –Gehalte bei Mais und Klee gras festgestellt werden. Im zweiten Versuchsjahr (2022) konnten diese Effekte nicht beobachtet werden.

In beiden Versuchsjahren konnten anfängliche, signifikante Effekte von den Struviten auf Pflanzenlänge und –durchmesser bei Mais beobachtet werden, die zum Zeitpunkt der Ernte nicht mehr nachweisbar waren.

Die Versuchsdaten deuten demnach auf eine gute Pflanzenverfügbarkeit des P aus Struvit hin. Der Einfluss in der Jugendentwicklung von Mais führt zwar nicht zu einer Ertragssteigerung, dies könnte aber möglicherweise zu einer Ertragssicherung unter schwierigen Bedingungen (extremer Trockenheit oder Niederschlägen) beitragen.

Diese Effekte konnten bei den anderen Rezyklaten nicht nachgewiesen werden. Allerdings soll hier der Langzeiteffekt über mehrere Jahre weiter beobachtet werden.

Das hohe Ertragsniveau der Versuche auch ohne Düngung deutet darauf hin, dass P scheinbar nicht ertragslimitierend war, obwohl in einer umfangreichen Beprobung und Analyse der P-Bodengehalte nur sehr geringe Mengen an P im Boden nachgewiesen werden konnten, die Berechnungen zur Folge nicht für eine ausreichende Nährstoffversorgung der Pflanzen ausreichend ist. Dies zeigt, dass gängige Analysemethoden, wie die CAL-Extraktion sowie eine Einordnung durch die LUFA P-Gehaltsklassen, hinterfragt werden sollten, da hier insbesondere organisch gebundener P nicht abgebildet wird. Insbesondere auf ökologisch bewirtschafteten Flächen leistet gerade der organische P einen deutlichen Beitrag zur Ernährung der Pflanzenbestände.

Diese Annahme wird außerdem durch die Unterschieden der Ergebnisse zwischen den Standorten in Warstein und dem in Halle (Westfalen) unterstützt. Während es sich bei den zwei Standorten in Warstein um Milchviehbetriebe handelt, die die Nährstoffzufuhr zum Großteil aus betriebseigenen Wirtschaftsdüngern bewerkstelligen, werden in Halle (Westfalen) geringere Mengen an organischen Düngemitteln eingesetzt (Futter-Mist-Kooperation). Dies könnte eine mögliche Erklärung dafür sein, dass hier die Mangelwirkungen und somit auch die Unterschiede zwischen den Düngevarianten größer waren.

Nichtsdestotrotz ermöglichen diese Ergebnisse Rückschlüsse auf die Pflanzenverfügbarkeit der Produkte. Denn sie zeigen, dass der P aus den Struviten für die Pflanzen im Boden verfügbar ist und aufgenommen werden kann. Demnach ist davon auszugehen, dass die Rezyklate unter deutlichen Mangelzuständen P für die Pflanzenernährung bereitstellen und dem Abbau weiterer P-Bodenreserven entgegenwirken.

#### AP 5: Öffentlichkeitsarbeit und Wissenstransfer

Durch die Arbeit des Projektes konnte ein deutlicher Beitrag zur Aufmerksamkeit und Akzeptanz des Einsatzes von P-Rezyklaten in der Landwirtschaft geleistet werden. Durch aktive Öffentlichkeitsarbeit in Form von Feldtagen, Präsentationen, Presseartikeln, dem aktiven Austausch mit verschiedenen Akteuren aus Wissenschaft, Politik und Praxis sowie der Teilnahme an Veranstaltungen, konnte mehr Aufmerksamkeit für dieses Thema generiert und mehr Akzeptanz geschaffen werden.

Im Laufe der Projektlaufzeit wurden verschiedene P-Rezyklate durch die neue Düngemittelverordnung zugelassen und auch die EU-Öko-Verordnung ist momentan in Abstimmung und sieht vor, Struvite für den Ökolandbau zu akzeptieren. Dieser Prozess wurde durch die Netzwerkarbeit mit der deutschen und der europäischen Phosphor Plattform und dem Austausch mit dem Ministerium durch die Projektleitung unterstützt.

Im direkten Dialog mit den Landwirten signalisierten die beteiligten Praxisbetriebe ihre Offenheit gegenüber dem Einsatz der im Projekt untersuchten Produkte (insbesondere der Struvite) auf ihren Flächen, sobald diese eine Zulassung für den Ökolandbau erhalten. Dies zeigt, dass durch die Einbindung der Praxis in dem Projekt eine gewisse Transparenz geschaffen werden konnte, die dazu beigetragen hat die Bedenken und Hemmnisse der Betriebe abzubauen.

Um die Ergebnisse der Versuche weiter in die Breite zu tragen und den Dialog zu diesem Thema weiter zu unterstützen, wurde durch die Projektleitung eine Informationsbroschüre für die interessierte Öffentlichkeit erarbeitet. Im Weiteren wird eine digitale Veranstaltung am 03.03.2023 stattfinden, in der die Ergebnisse für ein breites Publikum präsentiert und weitere Forschungsergebnisse aus anderen Projekten vorgestellt werden sollen (Programm der Veranstaltung im Anhang). Die Einladung hierzu wird über verschiedene Kontakte und Verteiler der Landwirtschaftskammer und der Deutschen Phosphor Plattform gestreut.

Für die Verbreitung und Kommunikation der Ergebnisse in der Wissenschaft erarbeitet die Uni Bonn derzeit eine Veröffentlichung für das Journal für Kulturpflanzen des Julius-Kühn-Institut.

## **b) Abweichungen zwischen Projektplan und Ergebnissen**

### *Änderungen in der OG-Zusammensetzung*

Im Laufe der Projektlaufzeit gab es mehrfach Änderungen in der OG-Zusammensetzung. Durch detaillierte Bodenanalysen auf den Versuchsflächen des Betriebes Kornkammer Haus Holte konnte festgestellt werden, dass die Nährstoffversorgung im Boden deutlich höher war als erwartet. Für die Durchführung eines Düngeversuches werden Flächen benötigt, die einen deutlichen P-Mangel aufweisen, um eine Düngewirkung zu erzielen und die Wirksamkeit der zu untersuchenden Düngeprodukte nachzuweisen. Dementsprechend konnte die Kornkammer nicht als Versuchsbetrieb am Projekt teilnehmen. Als Ausgleich konnte

die Weber-Berres GbR als Praxisbetrieb gewonnen werden, welche über geeignete Versuchsflächen verfügte und als neues OG-Mitglied im April 2021 aufgenommen wurde. Die Aufgaben der Kornkammer Haus Holte GbR wurden entsprechend durch den Betrieb Weber-Berres GbR übernommen.

Außerdem kam es zu einem Wechsel der wissenschaftlichen Partner im Projekt. Der TH Bingen ist es trotz intensiver Bemühungen mit insgesamt vier Stellenausschreibungsverfahren nicht gelungen, eine\*n geeignete Kandidat\*in für die Besetzung einer Laborfachkraft-Stelle zu finden. Um den Erfolg des Projektes nicht zu gefährden, wurde deshalb die Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn als OG-Mitglied aufgenommen, um die Aufgaben der TH Bingen vollständig zu übernehmen. Prof. Appel der TH Bingen stand der Projektleitung weiterhin für fachliche Fragen und produktiven Austausch zur Verfügung und nahm weiterhin an den OG-Treffen teil. Seine Expertise und Erfahrung blieb dem Projekt somit über den gesamten Projektzeitraum erhalten.

#### *Änderungen im Versuchsplan (Zeitplan, Methoden, Analyseumfang etc.)*

Aufgrund der erschwerten Bedingungen und Lieferschwierigkeiten durch die Coronapandemie zu Beginn des Jahres 2020 sowie technischen Schwierigkeiten bei Düngemittelherstellern und personellen Änderungen in der Projektleitung kam es zu deutlichen Verzögerung der Versuchsdurchführung im Projekt. Anders als ursprünglich vorgesehen konnten die Feldversuche erst im Frühjahr 2021 angelegt werden, was den Versuchszeitraum auf zwei Jahre verkürzte.

Im Allgemeinen ist die Projektlaufzeit zu kurz um belastbare Aussagen über die Wirksamkeit und die Pflanzenverfügbarkeit der Rezyklate treffen zu können. Gerade bei Düngeversuchen müssen die Flächen und Pflanzenbestände über einen längeren Zeitraum beobachtet werden. Diese Bedingungen gilt es bei der Interpretation der Projektergebnisse zu berücksichtigen.

Ursprünglich sollten im Projekt nur drei Rezyklate untersucht werden. Nach intensiver Literaturrecherche und Gesprächen mit Experten aus der Düngemittelindustrie und Abwasseraufbereitung wurde deutlich, dass bei der Vielzahl an Technologien und Produkten weitere Rezyklate untersucht werden müssen, um die breite Palette an Herstellungspfaden abzudecken. Dementsprechend wurden fünf Rezyklate aus unterschiedlichen Herstellungsverfahren ausgewählt.

Um die Versuchsfaktoren zu reduzieren und die Versuchsfragen auf den tatsächlichen Düngereffekt der Produkte zu konzentrieren, wurden keine verschiedenen Ausbringungstechniken untersucht wie ursprünglich vorgesehen. Alle Produkte wurden händisch breitflächig ausgebracht und mit der Bodenbearbeitung durch die Landwirte in den Boden eingearbeitet. Somit wurde gewährleistet, dass die Produkte nach gleichen Bedingungen und parzellengenau in den Boden eingebracht wurden.

Im Projektplan war der Einsatz einer neuen Feldmethode zur Erfassung der P-Konzentration im pflanzlichen Gewebe vorgesehen. Aufgrund von fehlenden positiven Erfahrungsberichten und des intensiven Zeitaufwands dieser Methode wurde nach intensiver Internetrecherche und Erfahrungsaustausch mit Experten der Uni Bonn die Entscheidung getroffen, diese Methode nicht für die Feldversuche einzusetzen.

Die Kosten und der Zeitaufwand für die Analyse der Bodenproben mittels sequentieller P-Fraktionierung wurden in der Projektplanung deutlich unterschätzt. Sowohl das Budget als auch die vorgesehenen Arbeitsstunden im Projekt und die Kapazitäten der Analysetechnik bei der Uni Bonn waren nicht ausreichend, um eine Analyse aller Varianten im vollen Umfang zu bewerkstelligen. Dementsprechend wurde der Probenumfang für diese Analysen deutlich reduziert und nur vier Varianten der Versuche (Nullkontrolle und Positivkontrolle (TSP), sowie zwei Rezyklate (AshDec und Crystal Green®)) mit dieser Methode untersucht.

#### *Standort Halle (Westfalen)*

Die Versuchsanlage und -durchführung am Standort Halle (Westfalen) gestaltete sich sehr schwierig, sodass der Versuchsumfang zunächst reduziert und die hier erhobenen Daten letztendlich nicht in der statistischen Auswertung berücksichtigt wurden. Aufgrund der Lage der Versuchsflächen war die Grundfläche nicht ausreichend, um eine Versuchsanlage mit allen acht Varianten anzulegen. Deshalb wurden zwei Varianten (Rohphosphat und Crystal Green®) für diesen Standort aus dem Versuchsdesign genommen und nur die verbleibenden sechs Varianten untersucht. Darüber hinaus wurden die Versuche an diesem Standort im Jahr 2021 stark durch Wild- und Vogelfraß beschädigt, sodass der Bestand stark dezimiert wurde und die Versuchsdaten nicht statistisch ausgewertet werden konnten. Nichtsdestotrotz dienten die Versuche an diesem Standort als Demonstrationsversuche und lieferten wertvolle Erkenntnisse für das Projekt. Im zweiten Jahr konnte durch die Arbeit mit Schutznetzen der Schaden durch Wildtiere verhindert werden. Aufgrund der großen

Ertragsunterschiede zwischen den Versuchen in Warstein und denen in Halle (Westfalen) wurden die Versuche allerdings auch im zweiten Jahr getrennt ausgewertet, um zu verhindern, dass der Einfluss der Standortbedingungen hier den tatsächlichen Effekt durch die Düngung maskieren.

#### *Erschwerte klimatische Bedingungen während der Projektlaufzeit*

Aufgrund der erschwerten klimatischen Bedingungen insbesondere im Jahr 2022 (Trockensommer), konnte im zweiten Versuchsjahr deutlich weniger Ertrag bei den Klee grasversuchen erzielt werden als im Jahr 2021. Die Bestände konnten sich nach der Frühjahrsansaat erst sehr spät etablieren und relevante Biomasseerträge entwickeln, sodass in diesem Jahr nur bedingt auswertbare Ergebnisse für diese Kultur erzielt werden konnten und von einer Analyse der Nährstoffgehalte im Jahr 2022 teilweise abgesehen wurde.

#### *Netzwerkveranstaltungen und Öffentlichkeitsarbeit*

Aufgrund der Coronapandemie konnten deutlich weniger Treffen ins Präsenz stattfinden und einige öffentliche Veranstaltungen, die für die Öffentlichkeitsarbeit, Netzwerken, sowie den fachlichen und organisatorischen Austausch in der OG und nach außen genutzt werden sollten, wurden abgesagt bzw. digital durchgeführt.

### **c) Projektverlauf**

Projektbegleitend wurde für Öko-P über den gesamten Zeitraum von Februar 2020 bis Januar 2023 intensive Öffentlichkeitsarbeit durch die Projektleitung betrieben. Das Projekt wurde in mehreren Veranstaltungen vorgestellt und Ergebnisse diskutiert. Es wurde ein regelmäßiger fachlicher Austausch mit verschiedenen Institutionen, Zulassungsbehörden, Beratung und anderen Forschungsprojekten mit ähnlichen Fragestellungen gepflegt.

#### **2020**

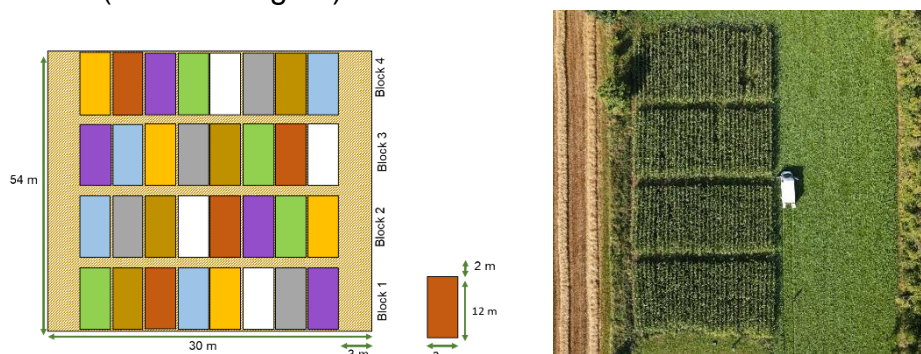
Im Allgemeinen war das erste Jahr des Projektes stark durch die aufkommende Coronapandemie und die damit einhergehenden Einschränkungen geprägt. Einige OG-Mitglieder gehören zur Corona-Risikogruppe, sodass in diesem Jahr von OG-Treffen in Präsenz abgesehen wurde und einige öffentlichkeitswirksame Veranstaltungen, wie beispielsweise die DLG-Feldtage abgesagt wurden. Die Netzwerkarbeit und der fachliche Austausch für das Projekt wurden dementsprechend auf alternativen Wegen durchgeführt und es konnten dennoch zahlreiche und wertvolle

Kontakte zur anderen Projekten in Deutschland und der EU hergestellt werden, die Kooperationen und einen intensiven Informationsaustausch für das Öko-P Projekt ermöglichen.

Für die Auswahl der zu untersuchenden Produkte für die Feldversuche des Projektes wurde eine intensive Recherche zu den verschiedenen Rezyklaten und Herstellungsverfahren vorgenommen. Im ersten Halbjahr konnte somit ein umfassender Überblick über die sich schnell und dynamisch entwickelnde Techniken in der Abwasserbranche zur P-Rückgewinnung gewonnen und eine Einschätzung zur Eignung dieser Produkte für die landwirtschaftliche Praxis vorgenommen werden. Darüber hinaus wurden Verordnungen und Rechtsvorschriften der EU fachlich geprüft, bewertet und mit einem Vertreter des EU-Beirates fachlich diskutiert.

Im Oktober 2020 kam es zu personellen Änderungen in der Projektleitung und die Aufgaben und Verantwortlichkeiten wurden von Dr. Stephan Jung an Hannah Fischer übergeben.

Bei der detaillierten Ausarbeitung eines Versuchsplans für die Anlegung und Durchführung der Feldversuche wurde großer Wert auf die Einbindung der Praxisbetriebe in der Planung gelegt. Die Versuche sollten zum einen wissenschaftlich haltbare Ergebnisse liefern und zum anderen möglichst nah an den Praxisbedingungen der einzelnen Betriebe liegen. Durch die Veränderung im Zeitplan der Durchführung der Feldversuche sowie durch fachliche und technische Erkenntnisse bei der detaillierteren Planung kam es zu einigen Änderungen des ursprünglichen Versuchsdesigns (s. IV. a) Zielerreichung und b) Abweichungen zwischen Projektplan und Ergebnissen). Letztendlich wurde sich als Versuchsdesign für eine randomisierte Blockanlage mit vier Wiederholungen und acht Varianten (fünf Rezyklate und drei Kontrollgruppen (ohne P, Rohphosphat und Triplesuperphosphat) entschieden (s. Abbildung 12).



**Abbildung 12:** Versuchsdesign: randomisierte Blockanlage mit vier Wiederholungen und acht Varianten in Theorie (links) und Praxis (rechts)

An allen Standorten wurden geeignete Teilflächen für die Versuche ausgewählt, auf denen ein deutlicher P-Mangel identifiziert werden konnte. Hierzu wurden an allen Standorten parzellengenaue Bodenproben (30 cm Tiefe) entnommen und auf verschiedene Parameter untersucht, um die Ausgangsbedingungen der Versuchsflächen ausführlich zu erfassen.

## **2021**

Zur Unterstützung der Versuchsanlage, -pflege und -dokumentation wurden zwei studentische Hilfskräfte eingestellt. Charlotte Klimpel und Tim Wantulla haben sich schnell eingearbeitet, konnten selbstständig und eigenverantwortlich arbeiten und waren somit eine große Unterstützung für das Projekt. Im Laufe des Jahres haben die beiden nicht nur die Anlage und Betreuung der Versuche unterstützt, sondern zusätzlich einen Teil der Datenauswertung der Feldversuche im Jahr 2021 im Rahmen ihrer Masterarbeiten übernommen (s. Anhang).

Vor der Düngung im Frühjahr 2021 wurde auf Grundlage der Ergebnisse der Bodenproben für alle Flächen individuelle Düngebedarfsermittlungen erstellt, um eine bedarfsgerechte Ausbringung der Düngemittel zu gewährleisten. Außerdem wurden die Düngeprodukte auf ihre Schadstoff- und Schwermetallgehalte untersucht, um ihre Unbedenklichkeit für den Einsatz auf Praxisflächen beurteilen zu können (Tabelle zu Schadstoffgehalten im Anhang).

Für die Versuche auf ökologischen Flächen wurde für alle drei Standorte eine Sondergenehmigung beim LANUV eingeholt und das „Inverkehrbringen von nicht-rechtskonformen Düngemitteln“ angezeigt. Die Versuchsflächen wurden mit dem Zeitpunkt der Düngung durch die P-Rezyklate aus der Öko-Förderung genommen und nach einem Umstellungszeitraum von zwei Jahren wieder in der Förderung aufgenommen.

Für die händische Ausbringung wurden die Rezyklate homogenisiert und teilweise vorgesiebt (s. Abbildung 13) und entsprechend ihrer Nährstoffgehalte parzellengenau abgewogen.





**Abbildung 13:** Homogenisierung der Knochenkohle+ durch Sieben (links), Proben der fünf ausgewählten Rezyklate (rechts)

Für die Versuche wurden die Düngemittel händisch breitflächig auf den Flächen verteilt (s. Abbildung 14) und durch die Landwirte in den Oberboden eingearbeitet.



**Abbildung 14:** händische parzellengenaue Ausbringung der Rezyklate im Feld

Im März – April 2021 wurde jeweils eine Versuchsfläche durch die Praxisbetriebe mit Klee gras bestellt und auf einer weiteren Fläche wurde im Mai 2021 Mais ausgesät (s. Abbildung 15). Um gleiche Voraussetzungen für den gesamten Pflanzenbestand zu schaffen und den Unkrautdruck möglichst gering zu halten, wurden die Versuchsflächen teilweise betriebsüblich durch die Betriebe maschinell oder bei erschwerten Bedingungen händisch durch die studentischen Hilfskräfte der LWK gehackt.

**Abbildung 15:** Maschinenarbeiten am Standort Warstein-Suttrop: Aussaat Maisversuch (links) und Striegeln zur Reduzierung des Unkrautdrucks (rechts)

Die Versuchspflanzen am Standort in Halle (Westfalen) wurde durch Vogel- und Wildfraß stark beschädigt und konnte aufgrund dessen nicht statistisch ausgewertet werden. Da die Maispflanzen allerdings deutliche Unterschiede in Abhängigkeit der Düngevarianten hinsichtlich der Pflanzenentwicklung zeichneten (s. Abbildung 16), dienten in die Versuche dort als Demonstrationsflächen.



**Abbildung 16:** Maisversuch am Standort Halle (Westfalen): Fraß- und Wildschäden (links), Unterschiede in der Pflanzenentwicklung (rechts)

Im Laufe der Vegetationsperiode wurden engmaschig Daten erhoben. Hierzu wurden bei regelmäßigen Boniturterminen im Abstand von 10 – 14 Tagen Stängeldurchmesser [mm] und Pflanzenlänge [cm] der Maispflanzen gemessen sowie mögliche Blattverfärbungen durch Nährstoffmangel dokumentiert. Außerdem wurden an zwei Zeitpunkten Pflanzen geerntet und im Feld gewogen, um den Ertrag [dt TM ha<sup>-1</sup>] des Maisbestandes zu erfassen. Eine Mischprobe aus sechs repräsentativen Pflanzen an beiden Ernteterminen wurde zur Verarbeitung und zur Bestimmung des Trockenmassegehaltes und der Analyse der N- und P-Gehalte an die Uni Bonn verschickt.





a) Markierung dauerhafter Repräsentanten



b) Messung Pflanzenlänge



c) Messung Stängeldurchmesser mittels elektrischer Schieblehre



d) Beerntete Kernparzellen



e) Kolbenertrag



f) Pflanzentransport

**Abbildung 17:** Datenerhebung Maisversuche: für jede Variante wurden dauerhafte Repräsentanten markiert (a), deren Pflanzenlänge [cm] (b) und Stängeldurchmesser [mm] (c) in regelmäßigen Abständen überprüft wurden. Für die Ernte wurden Pflanzen aus den Kernparzellen entnommen (d) und Spross- und Kolbengewicht getrennt erfasst (e). Ein Teil der Pflanzen wurde für weitere Analysen an die Universität Bonn geliefert (f)

Im Klee gras wurden vor jedem Schnitt Proben entnommen, um den Ertrag zu erfassen. Hiervon wurde jeweils eine Mischprobe pro Parzelle für weitere Analysen an die Universität Bonn weitergeleitet. Um zu untersuchen, ob die P-Düngung das Verhältnis von Leguminosen und Gras beeinflusst, wurde für einen Schnitt außerdem Artenzusammensetzung des Bestandes bestimmt. Es wurden keine signifikanten Unterschiede in der Zusammensetzung des Bestandes festgestellt. Nach der Entnahme der Klee grasproben wurden die Flächen jeweils von den Landwirten betriebsüblich geschnitten und die Biomasse abgefahren.





**Abbildung 18:** Datenerhebung Klee grasversuche: Quadratmeterschnitt im Feld (links) und Probenverarbeitung (rechts) zur Trockenmassebestimmung

Zur Bestimmung von Trockenmassegehalt, Stickstoff- und Phosphorgehalten wurden jeweils Pflanzenproben vom Mais- und Klee grasbestand an die Universität Bonn weitergeleitet.



**Abbildung 19:** Trockenmassebestimmung: Trockenschrank (links) und Rückwaage der Trockenmasse (rechts)

Am 29.06.2021 fand im Rahmen des Öko-P Projektes eine Feldbegehung statt, bei der die Flächen am Standort Warstein-Belecke gemeinsam mit den Projektbeteiligten sowie weiteren Landwirten und einem Berater von Bioland besichtigt und erste Ergebnisse der Feldversuche von Öko-P diskutiert wurden.



**Abbildung 20:** Feldbegehung Öko-P, Juni 2021

Nach der Ernte des Maisversuchs im Oktober 2021 wurde die Bodenbearbeitung durch die Landwirte selbst vorgenommen. Dabei wurde darauf geachtet möglichst wenig Bodenmaterial zu bewegen, um eine Vermischung zwischen den Parzellen zu vermeiden. Das Saatbett wurde für Klee gras als Nachfolgekultur vorbereitet.

Die statistischen Auswertungen der Versuche wurde in 2021 durch Tim Wantulla und Charlotte Klimpel im Rahmen ihrer Masterarbeiten unter Betreuung von Dr. Daniel Neuhoff der Universität Bonn vorgenommen.

## 2022

Im Jahr 2022 wurden erneut drei studentische Hilfskräfte (Tim Wantulla, Felix Pordzik und Leonie Palm) eingestellt, um die Versuchsdurchführung und die Datenerhebung zu unterstützen.

Aufgrund von deutlichen Verzögerungen in der Versuchsdurchführung im Öko-P Projekt (Begründung s. B. IV. b)), ist eine kostenneutrale Projektverlängerung über Oktober 2022 hinaus bis Ende Dezember 2022 beantragt und durch das LANUV genehmigt worden. Somit konnte gewährleistet werden, dass die Ergebnisse aus den Maisversuchen vollständig erfasst und in den Projektabschlussbericht einfließen konnten.

Das Klee gras wurde im Frühjahr 2022 an allen drei Standorten ähnlich wie nach der Maisernte durch die Landwirte umgebrochen und eingearbeitet. Das Saatbett wurde für Mais als Nachfolgekultur vorbereitet.

Nach der Ernte und Umbruch der Kulturen aus dem Jahr 2021 wurden erneut parzellengenaue Bodenproben an allen Standorten gezogen und zur Analyse mittel sequentieller P-Fraktionierung an die Uni Bonn weitergeleitet. Durch diese Analyse methode konnte untersucht werden welche P-Bodenfraktionen durch eine

Düngung mit den Rezyklaten aufgefüllt wurden. Dementsprechend konnten Schlussfolgerungen zu der Pflanzenverfügbarkeit dieser Produkte gezogen werden.

Im zweiten Jahr wurde keine Düngung vorgenommen. Um eine ökologische Fruchtfolge abzubilden, wurden die zwei Versuchskulturen auf den Flächen getauscht, sodass nach dem gedüngten Klee gras Mais folgte und nach dem gedüngten Mais Klee gras.

Die Aussaat sowie die Datenerhebung gestaltete sich im Jahr 2022 ähnlich zum Vorgehen in 2021.

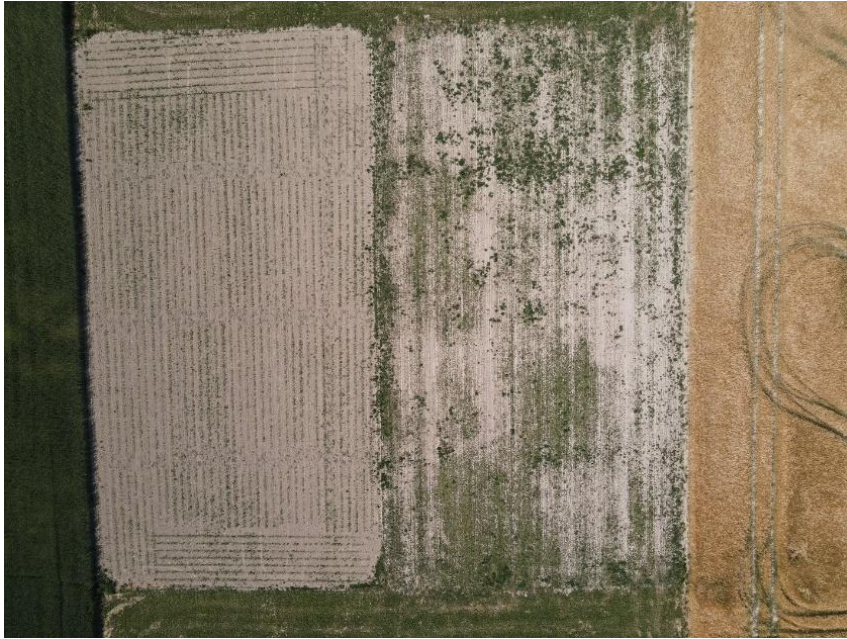
Am Standort Halle (Westfalen) wurde in diesem Jahr erfolgreich mit Vogelschutznetzen im Mais gearbeitet, um erneute Schäden und Ausfälle bei den Versuchen 2022 zu vermeiden. Allerdings zeigte die Versuchsfläche mit dem Klee grasbestand in diesem Jahr deutliche Ausfälle und wurde gemeinsam mit dem Ackerbauberater des Fachbereichs für Ökolandbau der LWK besichtigt. Die Ausfälle konnten auf verschiedene Bodenfaktoren zurückgeführt werden, was eine vergleichende Auswertung der Düngevarianten erschwert. Der Klee grasversuch wurde demnach auch in diesem Jahr nicht statistisch ausgewertet.



**Abbildung 21:** Drohnenfoto vom Standort Halle (Westfalen), deutliche Ausfälle im Klee grasbestand (untere Fläche)

Die klimatischen Bedingungen im Jahr 2022 waren an allen Standorten ungünstig für Pflanzenwachstum und -entwicklung und geprägt durch geringe Niederschlagsmengen und starke Trockenheit. Insbesondere die Etablierung des Klee grasbestandes wurde hierdurch beeinflusst, sodass die ersten Schnitte der Versuchsflächen hier erst sehr spät durchgeführt werden konnten und teilweise so verunkrautet waren (s. Abbildung 22), dass diese nicht zur Nährstoffanalyse an die Uni Bonn weitergeleitet wurden.





**Abbildung 22:** schlechte Entwicklung und starke Verunkrautung im Kleegasversuch (rechte Seite) am Standort Warstein-Belecke

Im Oktober 2022 übernahm Tim Wantulla mit einer 0,5 AK-Stelle die wissenschaftliche Projektleitung von Öko-P. Die organisatorische und administrative Projektleitung wurde weiterhin mit einer 0,5 AK von Hannah Fischer weitergeführt.

Die statistische Gesamtdatenauswertung über die komplette Projektlaufzeit und Standorte wurde durch Herr Wantulla vorgenommen und graphisch aufbereitet. Die Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation zu den Ergebnissen des Projektes wurde durch beide Projektleitungen gleichermaßen vorgenommen.

#### **d) Beitrag des Ergebnisses zu förderpolitischen EIP Zielen**

Die Europäische Innovationspartnerschaft "Produktivität und Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft" (EIP Agrar) verfolgt das Ziel, Innovationsprozesse zu fördern und den Innovationstransfer in die Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft sowie den Gartenbau zu verbessern. Die geförderten Projekte sollen im Sinne einer nachhaltigen Landwirtschaft möglichst konkrete und zielorientierte Lösungsansätze im Zusammenspiel aus Praxis, Beratung und Wissenschaft erarbeiten. Erwünscht ist neben der intensiven Mitwirkung von landwirtschaftlichen (gartenbaulichen oder forstwirtschaftlichen) Unternehmen ebenfalls die Beteiligung von wissenschaftlichen Einrichtungen.

Das hier dargestellte Projekt erfüllt die oben genannten Kriterien in vollem Umfang. Mit einer Partnerschaft aus Praxis (beteiligte Betriebe), Beratung (LWK NRW), sowie der

Wissenschaft (Uni Bonn) wurde daran gearbeitet, das Nährstoffmanagement auf ökologisch wirtschaftenden Betrieben zu verbessern. Ziel war es, innovative P-Rezyklate unter den Praxisbedingungen des Ökolandbaus zu erproben und gemeinsam innovative Lösungsansätze zu erarbeiten, die eine nachhaltige und wirksame Alternative zu herkömmlichen P-Düngeprodukten darstellen. Die Praxisbetriebe haben ihre langjährige Praxiserfahrung eingebracht, die LWK NRW die Erfahrung aus dem Versuchswesen und die Uni Bonn ihre wissenschaftliche Expertise sowie die technische Laborausstattung für die Analyse der Pflanzen- und Bodenproben. Ohne einen der Partner hätte das Projekt nicht in allen Teilbereichen zu einem gelungenen Abschluss geführt werden können.

Durch die praxisorientierte Forschung und die Ergebnisse der Feldversuche leistet das Projekt außerdem einen Beitrag zur Unterstützung der umweltgerechten Entwicklung sowie der Nachhaltigkeit in der Land- und Ernährungswirtschaft. Denn Phosphor als fossiler und, laut Einschätzung der EU Kommission, kritischer Rohstoff, ist eine knapper werdende Ressource. Der Import von Rohphosphat ist in vielerlei Hinsicht kritisch zu sehen, da er mit hohen Emissionen durch Transport und Aufarbeitung des Rohstoffes verbunden ist. Außerdem birgt der Einsatz von Rohphosphat als Düngemittel in der Landwirtschaft aufgrund von hohen Schwermetallgehalten ökologische sowie gesundheitliche Gefahren für Mensch und Tier. Da Phosphor als Pflanzennährstoff nicht ersetzt werden kann, ist ein nachhaltigerer Umgang für die zukünftige Nahrungsmittelproduktion zwingend nötig. Das Recycling von Phosphor in Kläranlagen ist ein vielversprechender Lösungsansatz, um neue P-Quellen für die Landwirtschaft zu erschließen und Nährstoffkreisläufe möglichst lokal zu schließen.

In unseren Feldversuchen konnte gezeigt werden, dass die rückgewonnenen P-Produkte unbedenklich sind und der in diesen enthaltene P für die Pflanzen verfügbar ist. Somit könnten die Rezyklate in Zukunft eine nachhaltige Alternative zu herkömmlichen P-Düngemitteln im Ökolandbau darstellen sobald diese Produkte eine Zulassung erteilt bekommen.

Auf diesem Weg könnten die natürlichen P-Lagerstätten und P-Bodenreserven geschont und damit die Nachhaltigkeit sowohl der konventionellen als auch der ökologischen Landwirtschaft verbessert werden.

Auch zur Stärkung der Wertschöpfungsketten sowie der Wettbewerbsfähigkeit der nordrhein-westfälischen Landwirtschaft leistet das Öko-P Projekt einen Beitrag. Denn



durch die Erschließung regionaler P-Quellen wird die Abhängigkeit von Importen aus dem Ausland reduziert und eine zusätzliche Wertschöpfung durch die Produktion neuer Düngemittel aus Abfallstoffen geschaffen.

#### **e) Nebenergebnisse**

Durch das Öko-P Projekt konnten wertvolle neue Kontakte zwischen der LWK NRW und verschiedenen Akteuren der Wissenschaft, Industrie und der Politik geschaffen werden, die auch in Zukunft von Vorteil sein werden.

Im Rahmen des Projektes wurden außerdem zwei Masterarbeiten und eine Bachelorarbeit an der Uni Bonn verfasst (s. Anhang). Eine weitere Bachelorarbeit ist derzeit in der Erarbeitung.

#### **f) Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben**

Aufgrund von Vogel- und Wildfraß konnte der Maisversuch am Standort Halle (Westfalen) in 2021 nicht statistisch ausgewertet werden und diente in diesem Jahr als Demonstrationsversuch.

Außerdem wurde die Versuchsdurchführung und –auswertung durch die extreme Trockenheit im Sommer 2022 erschwert. Daraus resultierte eine schlechte Entwicklung der Pflanzen und dem Ausfall einiger Daten.

## **V. Nutzen der Ergebnisse für die Praxis**

Für die landwirtschaftliche Praxis geben die Versuchsergebnisse Aufschluss über die Pflanzenverfügbarkeit der P-Rezyklate sowie ihren Einfluss auf P-Bodengehalte, Pflanzenentwicklung und Ertrag von Mais und Klee gras unter bestimmten Bedingungen. Außerdem konnte durch das Projekt Aufklärungsarbeit zu verschiedenen Verfahren der P-Rückgewinnung in Kläranlagen und den Vor- und Nachteilen sowie der rechtlichen Zulassungssituation der daraus entstehenden Düngemittel betrieben werden.

Darüber hinaus profitieren auch Akteure der Abwasseraufbereitung, Düngemittelindustrie und der Politik von den Ergebnissen und dem durch das Projekt angeregten Wissensaustausch mit den Landwirten. Wichtige Themen, die hier besprochen werden konnten waren die Ansprüche der (ökologischen) Landwirtschaft gegenüber neuen P-Düngemitteln und die Bereitschaft des Einsatzes neuer Produkte aus Klärschlamm und anderen Abfallstoffen. Dies sind wichtige Informationen, die

zukünftige (politische) Entscheidungen zur Förderung und Umsetzung von P-Rückgewinnung in Kläranlagen, der Zulassung neuer P-Rezyklate und der Entwicklung eines Marktes beeinflussen könnten.

## **VI.(Geplante) Verwertung und Nutzung der Ergebnisse**

Die Ergebnisse wurden im Laufe des Projektes bereits durch (Fach-)Vorträge und Artikel der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt (z.B. Kartoffeltag, Fachbeirat Ökolandbau, ZeLE etc.).

Weiterhin wurden die Ergebnisse in einer Informationsbroschüre für die interessierte Öffentlichkeit zusammengetragen und aufbereitet (s. Anhang). Die Broschüre wurde bereits auf Veranstaltungen der LWK NRW verteilt und wird bald online aus [oekolandbau.nrw.de](http://oekolandbau.nrw.de) abrufbar sein.

In einer internen Veranstaltung wurden die wichtigsten Erkenntnisse aus Öko-P an die Beratung der Landwirtschaftskammer NRW vermittelt und können von nun an über Beratungsangebote an betroffene Betriebe weitergeleitet werden.

Die Zulassung der Struvite für den Ökolandbau ist gerade in der Abstimmung und könnte durch die Ergebnisse und Erkenntnisse des Projektes zusätzlich unterstützt werden. Auch die weitere Prüfung und ggf. Berücksichtigung anderer Rezyklate könnte hierdurch angeregt werden und wurde bereits mit einer Vertreterin des MLV diskutiert.

## **VII. Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit**

Da der Markt an P-Rezyklaten noch nicht etabliert ist und einige Technologien und Verfahren bislang nur im Pilotmaßstab produzieren, ist eine wirtschaftliche Abschätzung der Entwicklung der P-Rezyklate kaum möglich. Tatsache ist jedoch, dass sich die Weltmarktpreise durch den Krieg in der Ukraine rasant entwickeln und somit auch teurere Aufbereitungsverfahren immer wettbewerbsfähiger werden. Da die Klärschlammverordnung Kläranlagen zukünftig dazu verpflichtet P rückzugewinnen, ist davon auszugehen, dass sich in den nächsten Jahren einige Verfahren herauskristallisieren werden. Die Ergebnisse von Öko-P können hierzu Daten zum Ertrag und Nährstoffverwertung und -effizienz unter Praxisbedingungen liefern.

Aus einer wissenschaftlichen Perspektive bieten die Ergebnisse der Feldversuche einige ergänzende Antworten zu anderen Forschungsergebnissen aus Gefäßversuchen und anderen Studien zur Löslichkeit und Pflanzenverfügbarkeit der Rezyklate. Allerdings werfen die Ergebnisse auch neue Fragestellungen auf, die es

durch weitere Forschungsprojekte zu untersuchen gilt. Die LWK NRW plant hierfür ein weiteres Forschungsprojekt, dass ähnliche Rezyklate (Struvite) aus anderen Ausgangsstoffen wie bspw. Gülle und Gärresten untersucht. Die an Öko-P beteiligten Betriebe haben hier bereits Interesse und Bereitschaft signalisiert an einem weiteren Projekt teilzunehmen.

Die Versuchsflächen von Öko-P sollen weiterhin über einen längeren Zeitraum von fünf Jahren über die Landesinitiative *Leitbetriebe Ökologischer Landbau in NRW* durch die LWK NRW beobachtet und begleitet werden. Auch die Uni Bonn zeigt hier großes Interesse an der Weiterführung dieses Themas und erarbeitet derzeit eine wissenschaftliche Veröffentlichung zu den Ergebnissen von Öko-P.

### **VIII. Nutzung Innovationsdienstleister (IDL)**

Die Innovationsdienstleisterin Frau Leibrock war eine gute, zuverlässige und wichtige Begleiterin während der Projektlaufzeit. Als Schnittstelle zwischen der Projektleitung und Prüfbehörde, war sie stets ansprechbar, hilfsbereit und unterstützend. Durch ihren wertvollen Erfahrungsschatz in der administrativen Abwicklung von EIP Projekten waren ihre Lösungsvorschläge stets pragmatisch und lösungsorientiert.

Außerdem wurde die Projektleitung durch Frau Leibrock stets auf relevante und spannende Veranstaltungen aufmerksam gemacht.

### **IX. Kommunikations- und Disseminationskonzept**

Im Laufe der gesamten Projektlaufzeit wurde intensive Öffentlichkeitsarbeit auf verschiedenen Kanälen betrieben, um das Projekt und die Ergebnisse nach außen zu kommunizieren und wertvolle Rückmeldungen aus verschiedenen Perspektiven für die weitere Durchführung und Weiterentwicklung des Projektes zu erhalten.

Im Anhang befinden sich exemplarisch ein Poster zur Vorstellung von Öko-P sowie Folien einer Präsentation vom 05.01.2023 beim 24. Kartoffeltag der LWK NRW.

#### *Internetauftritt*

Zum Anfang des Projektes wurde zunächst ein Artikel auf der Webseite der LWK und auf [oekolandbau.nrw.de](http://oekolandbau.nrw.de) veröffentlicht, um Informationen zu Projekthintergrund, -ziele und –strategie von Öko-P zu geben. Durch diese Maßnahme konnten direkt zu Beginn einige Kontakte und wertvoller Austausch generiert werden, die durch diesen Internetauftritt auf das Projekt aufmerksam gemacht wurden.

<https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/oekolandbau/versuche/oeko-p.htm>; <https://www.oekolandbau.nrw.de/forschung/projekte-oekoteam/phosphor-rezyklierung-im-oekologischen-landbau>)

### *Veranstaltungen*

Über die komplette Projektlaufzeit hat die Projektleitung aktiv an einer Vielzahl von Veranstaltungen teilgenommen, um fachlichen Input für die Fragestellungen des Projektes zu erhalten und darüber hinaus die Grundidee des Projektes und Versuchsergebnisse zu den Feldversuchen zu präsentieren und zu diskutieren. Da in diesem Zeitraum ein Großteil der Veranstaltungen digital durchgeführt wurden, war zusätzlich eine Teilnahme an internationalen Veranstaltungen möglich, die die Reichweite und Kommunikation des Projektes deutlich erhöhte.

Neben der aktiven Teilnahme an Veranstaltungen und Konferenzen wurde das konkret im Rahmen von Vorträgen oder Posterpräsentationen bei folgenden Veranstaltungen vorgestellt:

- interner Wissensaustausch und verschiedene Veranstaltungen in unterschiedlichen Fachbereichen der LWK NRW
- ZALF-Veranstaltung (29.09.2020)
- OG-Workshop der DSV (18.08.2021)
- ZeLE-Veranstaltung: Klimawandel und Landwirtschaft (07.09.2021)
- LWK-Niedersachsen: Praktikerworkshop zu Struvit (15.12.2021)
- Schulungsmaßnahme zur Landesdüngeverordnung (03.03.2022)
- Internes Treffen des AMPHORE-Projekt (25.05.2022)
- Heider Biogastagung (24.08.2022)
- Innovationstage des MLV (01.09.2022)
- ZeLE-Veranstaltung: Innovationen in der Landwirtschaft (10.11.2022)
- 24. Kartoffeltag der LWK NRW (05.01.2023)

Im Rahmen des Projektes wurde eine Feldbegehung am 29.06.2021 durchgeführt, um die Feldversuche und die untersuchten Produkte zu präsentieren. Hierfür wurde ein Handout mit den wichtigsten Informationen und ersten Ergebnissen erstellt und an die Teilnehmenden verteilt (s. Anhang).

*Beiträge in Newslettern, Fachzeitschriften, Magazinen etc.*

Darüber hinaus wurden Beiträge für eine Ausgabe des Rheinischen Landwirtschaftsverlag (LZ), den Lehrerrundbrief des bundesweiten Kompetenz- und Forschungsnetzwerks NutriNet, dem Newsletter der DVS (landaktuell) und der Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft (Berichte über Landwirtschaft) des BMELs verfasst (s. Anhang).

*Anbindung an die Beratung der LWK NRW*

Außerdem erwies sich die direkte Anbindung der Projektleitung an die Beratung der LWK NRW als sehr sinnvoll. Durch den regelmäßigen Austausch (bilateral oder im Rahmen von teaminternen Dienstbesprechungen), konnte ein Informationsfluss und Wissensaustausch zwischen dem Projekt und der Praxis unterstützt werden. Die Berater und Beraterinnen fungieren somit (auch über das Projektende hinaus) als Multiplikator\*innen für die Projektergebnisse und Erkenntnisse und konnten durch ihren Kontakt zu den Landwirt\*innen direkte Rückmeldung aus der Praxis an die Projektleitung weiterleiten.

*Direkter Austausch mit Akteur\*innen und Expert\*innen*

Außerdem wurde in der Projektdurchführung ein intensiver Austausch mit wichtigen Akteuren aus relevanten Bereichen der Wissenschaft, Politik, Wirtschaft und Praxis gepflegt. Neben den Mitgliedern der OG (Landwirte, Uni Bonn und TH Bingen), wurden Kontakte zu interessierten Landwirten und Landwirtinnen aus der Praxis sowie Vertreter\*innen der Wissenschaft und weiteren Projekte mit ähnlichem Themenschwerpunkt genutzt (Lfl Bayern, Uni Gießen, LLH, Uni Rostock, KIT, Bodenkunde der Uni Bonn, RePhor, Bioland e.V. etc.).

Für politische Fragestellungen und der Unterstützung des Zulassungsprozess von Rezyklaten für die EU-Düngemittelverordnung und insbesondere dem Öklandbau, wurde außerdem der Austausch zu Schlüsselpersonen des LANUVs (Düngemittelzulassung und Düngerecht, Ausnahmegenehmigung bei kleinräumigen Feldversuchen für neue noch nicht zugelassene Dünger- und Pflanzenschutzmittel), des Ministeriums für Landwirtschaft, (Umwelt) und Verbraucherschutz und der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) gesucht.

Grundsätzlich ist das Format der EIP-Förderung dazu geeignet die Entwicklung und Umsetzung von Innovationen in die Praxis zu unterstützen. Der transdisziplinäre

Ansatz und die Zusammenarbeit in Operationellen Gruppe ist ein wichtiger Punkt, um die Lücke zwischen Wissenschaft und Praxis zu schließen und gemeinsam praxisnahe Lösungsansätze für relevante Problemstellungen zu erarbeiten.

## **X. Danksagung**

Das Projekt wurde finanziert aus dem Programm zur Förderung von Projekten im Rahmen der Europäischen Innovationspartnerschaft „Produktivität und Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft“ (EIP Agrar), das integrativer Bestandteil des NRW-Programms Ländlicher Raum 2014-2020 ist und gemeinsam aus Mitteln der EU und des Landes Nordrhein-Westfalen getragen wird.

In erster Linie gilt ein großer Dank und Anerkennung den Landwirten, die dem Projekt ihre Flächen zur Verfügung gestellt haben und die fachliche Projektarbeit durch ihr Fachwissen unterstützt haben. Ihre Offenheit, Unternehmersinn und Motivation waren essentiell für den Erfolg des Projektes und ohne sie wäre solch eine praxisorientierte Durchführung und Umsetzung nicht möglich gewesen.

Außerdem geht ein großer Dank an eine Vielzahl an Personen, die das Projekt im Feld und Labor in den letzten drei Jahren tatkräftig unterstützt haben. Darunter zählen Mitarbeiter\*innen der LWK NRW aus dem Fachbereich 53, 61 und 64 sowie der Uni Bonn.

Besonderer Dank gilt darüber hinaus Outotec GmbH & Co. KG, Timac Agro Deutschland GmbH, die Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät Universität Rostock und der Kläranlage Linz Unkel, die dem Projekt ihre Düngemittel kostenlos zur Verfügung gestellt haben.

## C. Anhänge

- Prüfbericht GBA Ergebnisse Schadstoffanalyse nach Düngemittel- und Klärschlammverordnung (Mai 2020)
- Masterarbeit Tim Wantulla „Einfluss von P-Recycling-Düngern auf Ertrag und P-Effizienz von Öko-Mais“ (vorgelegt am 06.04.2022) *(in gedruckter Version nicht enthalten)*
- Masterarbeit Charlotte Klimpel „Einfluss von P-Recycling-Düngern auf Ertrag und P-Aufnahme von Klee gras im Ökologischen Landbau“ (vorgelegt am 01.07.2022) *(in gedruckter Version nicht enthalten)*
- Bachelorarbeit Friederike Charlotte Helene tho Seeth „Einfluss verschiedener P-Düngerarten auf die Zusammensetzung der P-Fractionen im Oberboden unter Mais“ (vorgelegt am 26.09.2022) *(in gedruckter Version nicht enthalten)*
- Programm für Öko-P Abschlussveranstaltung (geplant für den 03.03.2023)
- Öffentlichkeitsarbeit:
  - exemplarisch: Poster „Öko-P: Phosphor-Rezyklate – eine Alternative für den Ökolandbau“
  - exemplarisch: Vortrag „Öko-P: Recyclingdünger für den Ökolandbau?“ (24. Kartoffeltag, 05.01.2023)
  - Handout Feldbegehung 29.06.2021 „Phosphorrecyclingdünger für den Ökolandbau“
  - Artikel: „Phosphor-Recycling im Feldversuch“ (LZ 27, 08.07.2021, S.32)
  - Auszug landaktuell „Phosphor-Dünger im Ökolandbau“ (1.2022)
  - Auszug Lehrerrundbrief NutriNet „Phosphorversorgung im Ökolandbau verbessern“ (07.04.2022)
  - Auszug „Gemeinsam für die Landwirtschaft der Zukunft: Umsetzung von EIP-Agri in Deutschland“ (Sonderheft 234, 08.2022)
  - Informationsbroschüre Öko-P

Parameter	Klärschlamm- verordnung (mg/kg TM)	Düngemittel- verordnung (mg/kg TM)	Öko- Verordnung (IEG) Nr. 889/2008)	Crystal Green	Berliner Pflanze	AshDec	Pyreg	Knochen- KohlePlus	Rohphosphat (Hyper- phosphat)	Triphosphat- phosphat
Trockenmasse (%)				61,7	83,7	100	76,1	95,7	95,2	91,3
P205 (%)				25	25	17	14	25	22	39
Blei	-	150	45	< 10	16	10	87	< 10	17	
Cadmium	-	1,5 (50 mg/kg P205)	0,7 (206 mg/kg P)	< 0,5	< 0,5	< 0,5	1,1	< 0,5	1,4	
Chrom	nur messen	-	70	< 5	< 5	85	80	100	4,4	
Chrom (VI)	-	2	0	< 0,05	< 0,05	0,056	< 0,05	< 0,05		
Kupfer	-	900	70	< 5	23	560	540	86	16	
Nickel	-	80	25	< 2	< 2	56	58	10	22	
Quecksilber	-	1,0	0,4	< 0,3	< 0,3	< 0,3	< 0,3	< 0,3	0,025	
Zink	4.000	-	200	< 5	36	1400	2100	210	79	
Arsen	-	40	-	< 5	< 5	9,8	6,2	< 5	13	
Thallium	-	1,0	-	< 1	< 1	< 1	0,18	< 1	4	
Eisen	nur messen	-	-	97	2400	88000	130000	9400	22000	
PCB	0,1	-	-	< 0,01	< 0,01					
Dioxine und Furane	-	30 (ng/kg TM)	-	0,000000819	0,0030042			0,000000945		
Halogene (AOX)	400	-	-	< 1	15					
PAK (B(a)P)	1	-	-	< 0,05	< 0,05					
PFT	-	0,1	-	< 0,01	< 0,01			< 0,01		

Schwermetalle

organische  
Schadstoffe



RHEINISCHE FRIEDRICH – WILHELMS – UNIVERSITÄT BONN  
Landwirtschaftliche Fakultät

## **M A S T E R A R B E I T**

im Rahmen des Masterstudiengangs

**Nutzpflanzenwissenschaften**

zur Erlangung des Grades

**„Master of Science“**

### **Einfluss von P-Recycling-Düngern auf Ertrag und P-Effizienz von Öko-Mais**

vorgelegt von:

Tim Wantulla

Matrikel-Nr. 2796210

am: 06.04.2022

1. Prüfer: Dr. Daniel Neuhoff
2. Prüfer: Prof. Dr. Thomas Döring

## Kurzfassung

Die Verfügbarkeit von Rohphosphat, welches im deutschen Öko-Landbau neben Wirtschaftsdüngern die wichtigste P-Quelle darstellt, wird sich in Zukunft in Folge zur Neige gehender globaler Vorräte verschlechtern (ROSEMARIN et al., 2011), während der Bedarf an P-Düngern auf den Öko-Flächen Deutschlands angesichts negativer P-Bilanzen zunehmen wird (KOLBE, 2016). Es gibt zahlreiche Ansätze, P aus Klärschlamm und Schlachtnebenprodukten zurückzugewinnen und in der Landwirtschaft zu rezyklieren. Die Wirksamkeit einer Auswahl entsprechender P-Recycling-Dünger wurde in einem Silomais-Feldversuch unter den Bedingungen des Ökolandbaus untersucht.

Die getesteten Produkte deckten fünf verschiedene Ansatzpunkte der P-Rückgewinnung aus zwei verschiedenen Ausgangsstoffen ab: Die Rückgewinnung aus Klärschlamm (*Berliner Pflanze*), Klärschlammwasser (*Crystal Green*), Klärschlammmasche (*AshDec*), getrocknetem Klärschlamm (*Pyreg*) und entfetteten Knochenchips (*Knochenkohle+*). Der Versuch wurde in Form einer randomisierten Blockanlage mit dem Prüffaktor Düngung auf zwei verschiedenen ökologisch bewirtschafteten Flächen in Warstein etabliert. Neben den Rezyklaten wurden auch Tripelsuperphosphat und Rohphosphat als Positivkontrollen sowie eine ungedüngte Negativkontrolle untersucht, sodass sich an jedem Standort 8 Faktorstufen mit jeweils vier Wiederholungen (eine je Block) ergaben. Nach Beginn der Blattentwicklung wurden in regelmäßigen Abständen verschiedene Wachstumsparameter erfasst und an zwei Ernteterminen die Erträge bestimmt. Bei der Endernte wurden zusätzlich Pflanzenlänge und Stängeldurchmesser sowie die Gehalte an P und anderen Nährstoffen ermittelt. Alle Daten wurden durch Varianzanalysen und darauffolgende Tukey-Tests ausgewertet.

In diesem Versuch konnten zu keinem Zeitpunkt signifikante, ertragssteigernde Effekte der geprüften Düngemittel festgestellt werden. Die getesteten Rezyklate unterschieden sich diesbezüglich weder signifikant von den Kontrollen noch voneinander. Signifikante Unterschiede, die bezüglich Pflanzenlänge und Stängeldurchmesser im Laufe der Vegetationsperiode festgestellt wurden, waren zur Haupternte nicht mehr nachzuweisen. Zu diesem Zeitpunkt hatten Tripelsuperphosphat und *Crystal Green* signifikant höhere P-Aufnahmen durch die oberirdische Biomasse (40,7 bzw. 40,2 kg P ha<sup>-1</sup>) als die Negativkontrolle und Rohphosphat (28,2 bzw. 29,7 kg P ha<sup>-1</sup>) erzielt. Die restlichen Rezyklate unterschieden sich auch in diesem Punkt weder signifikant von den Kontrollen noch voneinander. An beiden Standorten wurden auch in den ungedüngten Parzellen für den Ökolandbau vergleichsweise hohe Erträge von durchschnittlich 172 bzw. 146 dt TM ha<sup>-1</sup> erzielt.

Es wird angenommen, dass P in Folge der P-Versorgung durch den Boden, hoher Niederschläge und hoher Stickstoffversorgung kein stark ertragslimitierender Faktor an den Standorten war und deshalb keine Ertragserhöhung durch die P-Düngung erreicht werden konnte. Ein

Vergleich der erzielten P-Aufnahmen und -Aufnahmeeffizienzen deutete dennoch darauf hin, dass sich insbesondere Crystal Green als P-Düngemittel im ökologischen Maisanbau eignen und die Wirkung von Rohphosphat übertreffen könnte.

In Zukunft gilt es in weiteren Studien zu überprüfen, ob sich Ertragswirkungen von P-Recycling-Düngemitteln, welche in Gefäßversuchen festgestellt wurden, in Feldversuchen unter den Bedingungen des Ökolandbaus bestätigen lassen. Dabei könnte insbesondere die Untersuchung von Effekten auf Kulturen mit unterschiedlichen P-Aneignungsvermögen an P-Mangel-Standorten von Interesse sein. Eine nachweisliche Wirksamkeit der P-Rezyklate ist eine wichtige Voraussetzung für die Zulassung und den Einsatz dieser im Ökolandbau.

## Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis .....	VI
Abbildungsverzeichnis .....	VII
Tabellenverzeichnis .....	IX
1 Einleitung .....	1
2 Literaturübersicht .....	2
2.1 P-Kreislauf in Pflanzen und Böden .....	2
2.2 P-Bedarf in der Landwirtschaft und P-Nachlieferung .....	4
2.3 P-Düngerverbrauch in Deutschland .....	6
2.4 P-Versorgung der Ökoflächen in Deutschland .....	7
2.5 P-Management im Ökolandbau .....	8
2.6 P-Rezyklierung und Aussichten für den organischen Landbau .....	10
2.7 Herstellungsprozesse und Eigenschaften ausgewählter P-Rezyklate .....	12
2.7.1 P-Rezyklate aus Klärschlamm .....	12
2.7.1.1 Berliner Pflanze .....	14
2.7.1.2 Crystal Green .....	15
2.7.1.3 AshDec .....	16
2.7.1.4 Pyreg .....	18
2.7.2 P-Rezyklate aus Schlachtabfällen .....	19
2.7.2.1 Knochenkohle+ .....	19
2.7.3 Eignung verschiedener P-Rezyklat-Dünger für den organischen Landbau .....	19
3 Zielsetzung der Arbeit .....	22
4 Material und Methoden .....	23
4.1 Versuchsstandorte .....	23
4.1.1 Struktur der beteiligten Betriebe .....	23
4.1.2 Bodeneigenschaften auf den Versuchsflächen .....	23
4.1.3 Klimadaten .....	25
4.2 Versuchsaufbau .....	26
4.3 Versuchsvorbereitung .....	28

4.4 Versuchsdurchführung .....	29
4.5 Datenerfassung .....	30
4.5.1 Messung der Pflanzenlängen und -durchmesser .....	30
4.5.2 Beurteilung des Entwicklungsstadiums .....	30
4.5.3 Chlorophyll-Messung .....	30
4.5.4 Bestimmung der Pflanzenbiomasse .....	30
4.5.5 Nährstoffanalysen .....	32
4.5.6 Statistische Auswertung .....	32
5 Ergebnisse .....	33
5.1 Wachstumsparameter .....	33
5.1.1 Bestandesdichte und BBCH-Stadien .....	33
5.1.2 Längenwachstum .....	34
5.1.2 Dickenwachstum .....	35
5.1.3 SPAD-Werte .....	36
5.2 Ertragsparameter .....	37
5.2.1 Zwischenernte .....	37
5.2.2 Haupternte .....	39
6 Diskussion .....	46
6.1 Hohe Erträge an beiden Standorten .....	46
6.2 Fehlende Ertragswirkung der geprüften Düngemittel .....	49
6.3 Effekte der Rezyklate .....	52
6.3.1 Effekte der Struvite Crystal Green und Berliner Pflanze .....	53
6.3.2 Effekte des Ascheprodukts AshDec .....	54
6.3.3 Effekte des Pyrolyseprodukts Pyreg .....	55
6.3.4 Effekte der Tierkohle Knochenkohle+ .....	56
6.4 Methodenkritik .....	57
7 Fazit und Ausblick .....	58
8 Literaturübersicht .....	60
9 Anhang .....	72

**Abkürzungsverzeichnis**

AD	AshDec
ANOVA	Analysis of Variance (Varianzanalyse)
BP	Berliner Pflanze
CG	Crystal Green
FM	Frischmasse
K	Kalium
K0	Kontrolle
KK	Knochenkohle+
MAP	Magnesium-Ammonium-Phosphat
N	Stickstoff
P	Phosphor
PY	Pyreg
RP	Rohphosphat
Standort K	Standort Kroll-Fiedler
Standort W	Standort Weber
TM	Trockenmasse
TSP	Tripelsuperphosphat

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abb. 1:</b> Phosphorkreislauf in naturbelassenen Böden mit Angaben zu jährlichen P-Flüssen in $\text{kg ha}^{-1}$ .....	3
<b>Abb. 2:</b> Schicksal des gedüngten P und Dynamiken zwischen den unterschiedlich stabilen Boden-P-Fraktionen.....	6
<b>Abb. 3:</b> Schematische Darstellung des Ablaufs der Abwasseraufbereitung in einem Klärwerk und der Ansatzpunkte für die Phosphorrückgewinnung .....	14
<b>Abb. 4:</b> Monatliche Niederschlagsmengen [mm] und Temperaturmittel [°C] im Jahresverlauf an den Standorten K und W .....	25
<b>Abb. 5:</b> Aufbau des P-Düngeversuchs in Form einer randomisierten Blockanlage mit Maisanbau während der Vegetationsperiode 2021 .....	26
<b>Abb. 6:</b> Händische Ausbringung der P-Düngemittel am Standort Kroll-Fiedler .....	29
<b>Abb. 7:</b> Kolben- und Spross-Mischproben der Zwischenernte .....	31
<b>Abb. 8:</b> Durchschnittliche Bestandesdichte [Pflanzen $\text{m}^{-2}$ ] in Abhängigkeit von der Düngevariante und dem Standort.....	33
<b>Abb. 9:</b> Durchschnittliche Pflanzenlänge [cm] an den Standorten K und W zu den jeweiligen Messterminen in Abhängigkeit von der Düngevariante .....	35
<b>Abb. 10:</b> Durchschnittlicher Stängeldurchmesser [mm] an den Standorten K und W zu den jeweiligen Messterminen in Abhängigkeit von der Düngevariante.....	36
<b>Abb. 11:</b> Durchschnittlicher Gesamtertrag [dt TM $\text{ha}^{-1}$ ] zur Zwischenernte am 24.08.2021 in Abhängigkeit von der Düngevariante und dem Standort.....	37
<b>Abb. 12:</b> Durchschnittlicher Sprossmasseertrag [dt TM $\text{ha}^{-1}$ ] zur Zwischenernte am 24.08.2021 in Abhängigkeit von der Düngevariante und dem Standort.....	38
<b>Abb. 13:</b> Durchschnittlicher Kolbenertrag [dt TM $\text{ha}^{-1}$ ] zur Zwischenernte am 24.08.2021 in Abhängigkeit von der Düngevariante und dem Standort.....	39
<b>Abb. 14:</b> Durchschnittlicher Sprossmasseertrag [dt TM $\text{ha}^{-1}$ ] zur Haupternte am 11. (W) bzw. 17.10.2021 (K) in Abhängigkeit von der Düngevariante und dem Standort .....	40
<b>Abb. 15:</b> Durchschnittlicher Gesamtertrag [dt TM $\text{ha}^{-1}$ ] zur Haupternte am 11. (W) bzw. 17.10.2021 (K) in Abhängigkeit von der Düngevariante und dem Standort .....	40



- Abb. 16:** Durchschnittlicher Kolbenertrag [dt TM ha<sup>-1</sup>] zur Haupternte am 11. (W) bzw. 17.10.2021 (K) in Abhängigkeit von der Düngevariante und dem Standort ..... 41
- Abb. 17:** Durchschnittliche P-Aufnahme durch die oberirdische Pflanzenbiomasse [kg ha<sup>-1</sup>] zur Haupternte am 11. (W) bzw. 17.10.2021 (K) in Abhängigkeit von der Düngevariante und dem Standort ..... 42
- Abb. 19:** Durchschnittliche P-Aufnahme durch die Kolben [kg ha<sup>-1</sup>] zur Haupternte am 11. (W) bzw. 17.10.2021 (K) in Abhängigkeit von der Düngevariante und dem Standort ..... 43
- Abb. 18:** Durchschnittliche P-Aufnahme durch die Sprossmasse [kg ha<sup>-1</sup>] zur Haupternte am 11. (W) bzw. 17.10.2021 (K) in Abhängigkeit von der Düngevariante und dem Standort ..... 43

## Tabellenverzeichnis

<b>Tab. 1:</b> Verteilung der VDLUFA-P-Versorgungsklassen auf ökologischen Acker- und Grünlandflächen [%].....	7
<b>Tab. 2:</b> Blockgenaue und durchschnittliche Bodeneigenschaften der Versuchsstandorte .....	24
<b>Tab. 3:</b> Dem Versuchsaufbau entsprechende, randomisierte Verteilung der Düngemittel .....	27
<b>Tab. 4:</b> P-, N- und TM-Gehalte sowie Ausbringungsmengen der P-Düngemittel.....	28
<b>Tab. 5:</b> BBCH-Stadien der Pflanzen zu den jeweiligen Boniturterminen.....	34
<b>Tab. 6:</b> Durchschnittliche Pflanzenlänge [cm] in Abhängigkeit von der Düngevariante zur Haupternte .....	35
<b>Tab. 7:</b> Durchschnittlicher Stängeldurchmesser [mm] in Abhängigkeit von der Düngevariante zur Haupternte.....	36
<b>Tab. 8:</b> Durchschnittliche SPAD-Werte in Abhängigkeit von der Düngevariante und dem Standort zu den jeweiligen Messterminen .....	37
<b>Tab. 9:</b> Durchschnittliche P-Verwertungs- und Aufnahmeeffizienzen zur Haupternte .....	44
<b>Tab. 10:</b> Durchschnittliche N-Aufnahmen, C/N- und N/P- Verhältnisse der Kolben zur Haupternte am in Abhängigkeit von der Düngevariante und dem Standort .....	45
<b>Tab. 11:</b> Durchschnittliche N-Aufnahmen, C/N- und N/P- Verhältnisse der gesamten oberirdischen Biomasse zur Haupternte in Abhängigkeit von der Düngevariante und dem Standort .....	45

## 1 Einleitung

Phosphor (P) zählt neben Stickstoff zu den wichtigsten, oft ertragslimitierenden Faktoren landwirtschaftlicher Produktionssysteme weltweit. Während die durchschnittliche P-Versorgung auf deutschen Ökoflächen derzeit noch als ausreichend zu bewerten ist, gibt es angesichts der überwiegend negativen P-Bilanzen Grund zu der Annahme, dass sich diese in Zukunft vielerorts verschlechtern wird (KOLBE, 2016). Im Ökolandbau wird P überwiegend in Form von Wirtschaftsdüngern und Rohphosphaten gedüngt. Die Ausbringung dieser ist jedoch wegen der Gehalte an anderen Nährstoffen bzw. Schadstoffen durch die EU-Ökoverordnung reguliert und kann somit nicht ausschließlich nach dem P-Bedarf ausgerichtet werden (EUR-LEX, 2021a). Die Wirksamkeit von Rohphosphat ist aufgrund seiner schlechten Löslichkeit außerdem vielerorts nicht gegeben und auch die Verfügbarkeit bzw. Wirtschaftlichkeit des Einsatzes wird in Zukunft in Folge zur Neige gehender weltweiter Vorräte abnehmen (ROSEMARIN et al., 2011).

Klärschlamm und Schlachtabfälle bergen ein P-Potenzial in sich, welches bisher größtenteils ungenutzt. Jedoch werden und wurden bereits zahlreiche Verfahren zur P-Rückgewinnung aus diesen entwickelt. Die dabei entstehenden Produkte unterscheiden sich in ihren stofflichen Zusammensetzungen und damit in der Menge und Pflanzenverfügbarkeit des enthaltenen P sowie der Schadstoffbelastung. Anders als im konventionellen Landbau ist der Einsatz von Klärschlamm laut EU-Öko-Verordnung untersagt. Daher könnten insbesondere Klärschlamm-Rezyklate im Ökolandbau die Nutzung einer bisher unverfügbaren P-Quelle ermöglichen, welche ein wichtiges Mittel zur Deckung des zukünftig ansteigenden P-Bedarfs sein könnte. Außerdem könnten derartige P-Recycling-Düngemittel aufgrund des Kreislaufcharakters und der Lokalität ihrer Herstellung eine Alternative zu Rohphosphat schon vor dessen zukünftiger Knappheit darstellen, welche den Ansprüchen des Ökolandbaus bzw. des IFOAM-Prinzips der Ökologie gerechter wird.

Um zu beurteilen, ob P-Rezyklate für den Einsatz als Düngemittel im Ökolandbau geeignet sind, müssen diese aufgrund der Vielseitigkeit ihrer Herstellungsverfahren und stofflichen Zusammensetzung einzeln bewertet werden. Dabei müssen zum einen jeweils die Nachhaltigkeit des Herstellungsverfahrens und dessen Potenzial zur kommerziellen Etablierung berücksichtigt werden, wobei letzteres für eine ausreichende Verfügbarkeit des Produkts entscheidend ist. In Bezug auf das Produkt selbst gilt es, die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes sowie die Schadstoffbelastung und nicht zuletzt die Wirksamkeit zu beurteilen.

Daher sollen in dieser Arbeit die Effekte vier verschiedener Klärschlamm-Rezyklate sowie der eines Tierknochen-Rezyklats auf das Wachstum und die P-Aufnahme von Mais unter den Bedingungen des organischen Landbaus evaluiert werden.

## 2 Literaturübersicht

### 2.1 P-Kreislauf in Pflanzen und Böden

Phosphor (P) ist ein Makronährstoff und essentiell für die Produktion pflanzlicher Rohstoffe sowie Nahrungs- und Futtermittel. Durch die Pflanzenwurzeln wird er überwiegend in Form von Phosphat-Anionen ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  oder  $\text{HPO}_4^{2-}$ ) aus der Bodenlösung aufgenommen und enzymatisch als Phosphatester in verschiedenen Molekülen gebunden (AMELUNG et al., 2018). Als Bestandteil der Phospholipide der Zellmembranen und der Nucleinsäuren der DNA- und RNA-Moleküle ist P für Zellteilungsprozesse erforderlich. Die Esterbindungen des Adenosintriophosphats sind Träger der Energie, welche unter anderem bei der Biosynthese von Stärke und der Nährstoffaufnahme benötigt wird (HAWKESFORD et al., 2012). P-Mangel äußert sich bei Pflanzen durch Wachstumshemmungen in allen Organen sowie einer erhöhten Anthocyan-Bildung, insbesondere in älteren Blättern. Diese verfärben sich in Folge dessen rötlich (AMELUNG et al., 2018).

Eine ausreichende P-Versorgung ist dementsprechend erforderlich, um das Pflanzenwachstum zu gewährleisten und wirtschaftliche Erträge zu erzielen. Schluffige, lehmige und tonige Böden der gemäßigten Breiten weisen meist Gesamt-P-Gehalte von 200 bis 800  $\text{mg kg}^{-1}$  vor, wobei etwa 10-45% des P in organischer Form vorliegt. In landwirtschaftlich ungenutzten Böden ist der P-Kreislauf weitestgehend geschlossen (Abb. 1). Zu geringfügigen Austrägen kann es jedoch durch Erosion ( $0,1-5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ), Auswaschung ( $0,1-0,2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ) sowie Phosphinbildung und -verflüchtigung ( $< 0,1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ) kommen (AMELUNG et al., 2018). Die P-Nachlieferung erfolgt vor allem durch Verwitterung, wodurch je nach Ausgangsgestein bis zu 5  $\text{kg P ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  freigesetzt werden. Bei den P-haltigen primären Mineralien handelt es sich überwiegend um verschiedene Apatite, wobei Fluorapatit am weitesten verbreitet ist. Teilweise von Pflanzen und Mikroorganismen aufgenommen, gelangt der P über die Mineralisation ihrer Rückstände zurück in den Boden (SCHNUG und DE KOK, 2016; AMELUNG et al., 2018). Die bei diesen Prozessen entstehenden  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ - und  $\text{HPO}_4^{2-}$ -Ionen sind pflanzenverfügbar, können jedoch insbesondere bei niedrigen pH-Werten auch an Aluminium- und Eisen-Oxide sowie aluminium- und eisenhaltige Huminstoffe sorbieren oder in Aggregaten fixiert bzw. okkludiert werden (FILIPPELLI, 2017; AMELUNG et al., 2018). Bei hohen pH-Werten fallen sie v.a. mit Calcium als sekundäre Minerale aus. Auch organische P-Formen aus mineralisierten Rückständen können an Partikeloberflächen stabilisiert werden oder schwer lösliche organische Verbindungen bilden (SCHNUG und DE KOK, 2016; AMELUNG et al., 2018).

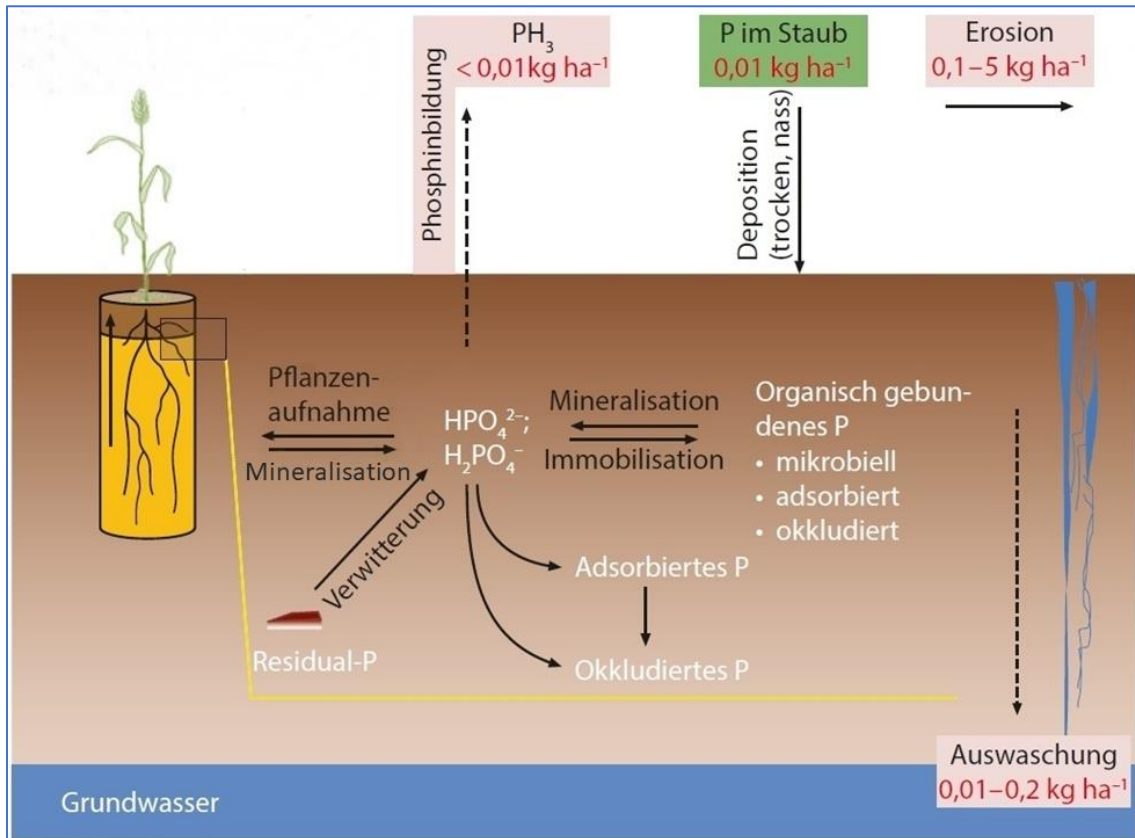


Abb. 1: Phosphorkreislauf in naturbelassenen Böden mit Angaben zu jährlichen P-Flüssen in  $\text{kg ha}^{-1}$  (modifiziert nach AMELUNG et al., 2018)

Die verschiedenen Formen, in denen Phosphor im Boden vorliegt, unterscheiden sich in ihrer Stabilität und Pflanzenverfügbarkeit. Zu den labilen, leicht verfügbaren Fraktionen gehören der P in rasch mineralisierbaren, organischen Material und leicht löslichen Calciumphosphaten sowie schwach sorbierter P (SCHNUG und DE KOK, 2016). Der in der Bodenlösung vorhandene P ist überwiegend unmittelbar pflanzenverfügbar, macht jedoch weniger als 0,1% des Gesamt-P-Gehaltes eines Bodens aus (AMELUNG et al., 2018). Der in Primärmineralen enthaltene sowie fixierte bzw. okkludierte P ist ebenso wie solcher in schwer löslichen organischen Verbindungen schlecht pflanzenverfügbar (SCHNUG und DE KOK, 2016; FILIPPELLI, 2017). Neben anderen Faktoren wie beispielsweise der Bildung von sehr dichten oder sauren Unterbodenhorizonten, die das Wurzelwachstum behindern, führen die zuvor beschriebenen Prozesse, bei denen P aus labilen in stabile Fraktionen übergeht, irgendwann zu P-Limitierung. Durch eine sich anpassende Pflanzensukzession ist diese jedoch nur mehrere Dekaden relevant, sofern es nicht zu erosionsbedingten Austrägen kommt (AMELUNG et al., 2018).

## 2.2 P-Bedarf in der Landwirtschaft und P-Nachlieferung

Landwirtschaftlich genutzte Böden unterscheiden sich von naturbelassenen in Bezug auf den P-Kreislauf unter anderem dadurch, dass es regelmäßig zu Austrägen in Form von Ernten kommt. Angestrebt werden dabei höchst mögliche Erträge pro Fläche und eine Deckung des entsprechenden Nährstoffbedarfs. Inwiefern ein genutzter Boden diesen decken kann, hängt neben den Ansprüchen der Kultur von seinen Eigenschaften sowie den klimatischen Bedingungen und der Art der Bewirtschaftung ab.

Betrachtet man beispielsweise einen Silomaisbestand, welcher dem deutschen Durchschnitt im Jahre 2020 entsprechend einen Ertrag von 420 dt ha<sup>-1</sup> erbringen soll, benötigt dieser bei einem angenommenen P-Entzug von 2,4 kg P je 10 dt Trockenmasse (TM) ha<sup>-1</sup> und einem TM-Gehalt von 28% eine P-Versorgung von ca. 29 kg ha<sup>-1</sup> (EDER und BRANDHUBER, 2014; STATISTISCHES BUNDESAMT 2021a). Der durchschnittliche Gehalt an gelöstem P in der Bodenlösung liegt zwischen ungefähr zwischen 0,3-0,8 mg P l<sup>-1</sup>, was einer Menge von einigen 100 g P ha<sup>-1</sup> entspricht (AMELUNG et al., 2018). Für eine optimale Versorgung ist es dementsprechend notwendig, dass P ständig in ausreichenden Mengen in die Bodenlösung nachgeliefert und pflanzenverfügbar wird.

Das Ausmaß dieser Nachlieferung aus der festen Phase des Bodens ist v.a. abhängig von den Anteilen der oben beschriebenen, unterschiedlich stabilen P-Formen am Gesamt-P-Vorrat des Bodens. Sie erfolgt insbesondere durch P-Desorption, die Auflösung von Ca-Phosphaten und der Mineralisierung P-haltiger organischer Verbindungen. Die Verteilung der Formen ist u.a. durch das Alter bzw. den Verwitterungsfortschritt des Bodens sowie den pH-Wert, die Bodenart und den Anteil an organischer Masse bestimmt (AMELUNG et al., 2018).

Neben der Verfügbarkeit und Nachlieferung von gelöstem P ist jedoch auch die Fähigkeit der individuellen Pflanze, P aufzunehmen und selbst verfügbar zu machen, entscheidend. Bei P-Mangel bilden Pflanzenwurzeln verstärkt Wurzelhaare, welche effizienter als Haupt- und Seitenwurzeln in der Absorbierung von P sind (JUNGK und CLAASSEN, 1988). Je nach Verarmungszone im Boden ist die Ausbildung eines lateralen Wurzelsystem von Vorteil (Rubio et al., 2003). Auch von einigen Arten gebildete, spezielle Strukturen wie Aerenchym oder Proteoidwurzeln ermöglichen es, mit geringer P-Verfügbarkeit auszukommen (LAMBERS et al., 2006; POSTMA und LYNCH, 2011). Des Weiteren führt die Absonderung von verschiedenen Wurzelexsudaten, welche u.a. organischen Säuren oder Phosphatasen beinhalten, direkt oder indirekt durch die Senkung des pH-Werts zu erhöhter P-Freisetzung aus der festen Bodenphase (DAKORA und PHILLIPS, 2001). Bei P-Mangel können außerdem verstärkt Symbiosen mit Mykorrhizapilzen an den Wurzeln gebildet werden. Durch die Mykorrhiza kann zusätzlicher Raum für die P-Aufnahme und in Folge der Ausscheidung von beispielsweise Phosphatasen durch die Pilze für die Pflanze sonst schwer zugänglicher P erschlossen werden (SMITH und

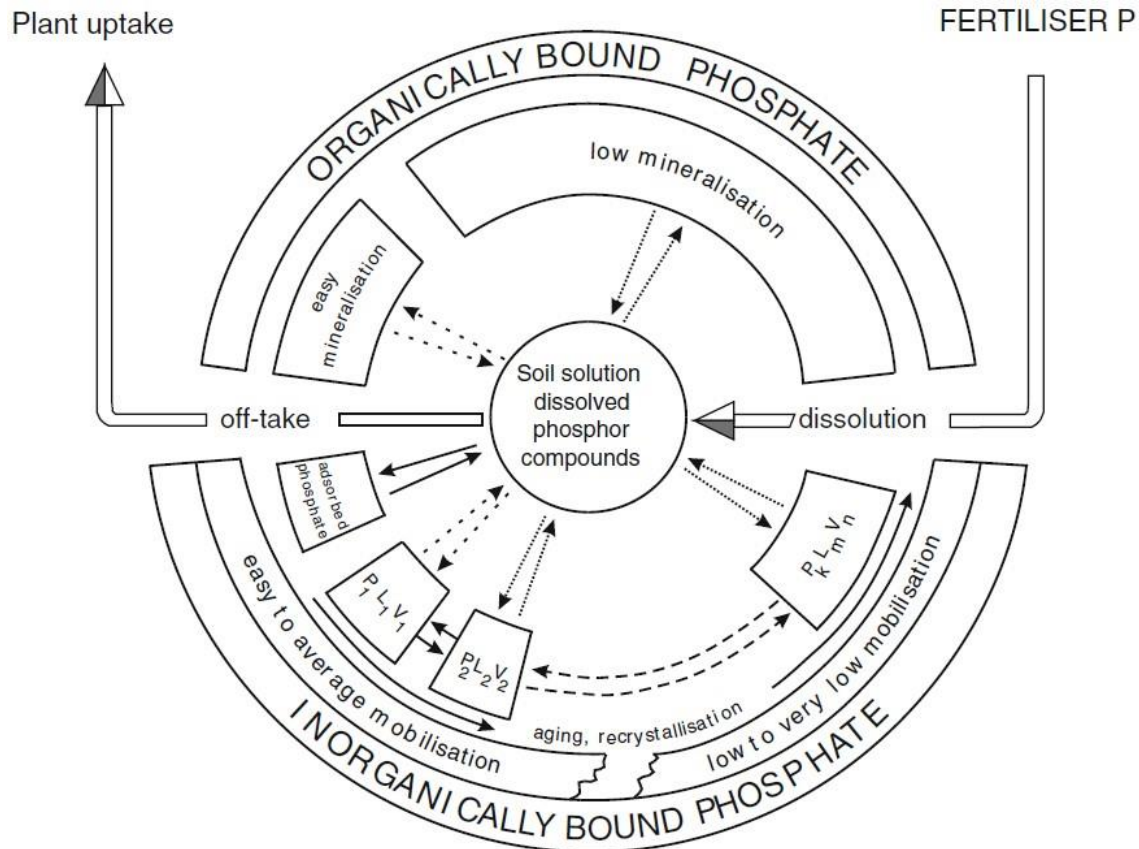
READ, 2008). Wie effizient die P-Aufnahme und effektiv die Verbesserung der P-Verfügbarkeit durch die Pflanze sind, ist arten- und sortenabhängig (WEN et al., 2019). Außerdem unterscheiden sich Pflanzenarten in ihrer P-Verwertungseffizienz, also der Menge an P, die sie für die Bildung einer bestimmten Menge an TM benötigen. Diese wird auch durch Umweltfaktoren beeinflusst (VENEKLAAS et al., 2012).

Ebenso wie die Mineralisationsrate ist die Geschwindigkeit der P-Aufnahme temperaturabhängig, da diese in der Pflanze auch durch aktive Transporter erfolgt. Für eine rasche P-Diffusion hin zur Verarmungszone der Rhizosphäre ist außerdem ein ausreichender Wassergehalt des Bodens entscheidend (FILIPPELLI, 2017; AMELUNG et al., 2018).

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die leicht pflanzenverfügbaren P-Vorräte eines Bodens zu erfassen. In Deutschland ist beispielsweise die Calcium-Acetat-Lactat-Methode verbreitet, bei der P mit einer auf einen pH-Wert von 4,1 gepufferten Lösung aus Calciumacetat, Calciumlactat und Essigsäure aus getrockneten Bodenproben (0 bis 20 oder 30 cm) extrahiert und anschließend fotometrisch bestimmt wird. Durchgeführt werden diese Bodenanalysen hierzulande von dem Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA) und verschiedenen privaten Anbietern (VDLUFA, 2012; BMEL, 2019). Auf Basis der so bestimmten  $P_2O_5$ -Gehalte in mg je 100 g Boden wird ein Acker- oder Grünlandboden in eine P-Gehaltsklasse eingeordnet: A = sehr niedrig bis E = sehr hoch. Entsprechend dieser Klasse und unter Berücksichtigung fruchtfolgebedingter P-Austräge sowie -Einträge in Form von Wirtschaftsdüngern o.ä. kann beurteilt werden, ob die P-Versorgung der Pflanzen durch den Boden durch den Einsatz weiterer Düngemittel ergänzt werden sollte (KOLBE, 2010).

Wie wirksam dieser zunächst ist, hängt nicht zuletzt von den Bodeneigenschaften ab. Sofern die für das Düngemittel spezifischen Bedingungen gegeben sind, werden nach der Ausbringung Phosphat-Anionen aus dem Düngemittel freigesetzt und gelangen in die Bodenlösung. Dabei ist zum einen von der Anwesenheit von Calcium-, Eisen- und Aluminium-Kationen, und somit vom pH-Wert in der Bodenlösung abhängig, in welcher Art und in welchem Ausmaß diese anschließend ausgefällt werden (SAMPLE et al., 1980). Zum anderen wird in Abhängigkeit von der Sorptionskapazität des Bodens ein Teil der Phosphat-Anionen adsorbiert (SCHWERTMANN & TAYLOR, 1989). In Folge dessen werden im Jahr der Ausbringung durchschnittlich nur ca. 10-20% des gedüngten P durch Pflanzen aufgenommen. Ein Großteil verbleibt im Boden, wo er in Fraktionen unterschiedlicher Pflanzenverfügbarkeit übergeht (FARDEAU, 1996).





**Abb. 2: Schicksal des gedüngten P und Dynamiken zwischen den unterschiedlich stabilen Boden-P-Fraktionen.** P wird durch Düngemittel in den Boden eingebracht und als Phosphat-Anionen aus diesen herausgelöst. Diese werden teilweise von Pflanzen aufgenommen, werden jedoch größtenteils in unterschiedlich stabilen organischen und anorganischen Formen gebunden. Die anorganischen Formen verändern sich im Laufe der Zeit und nehmen dadurch an Stabilität zu oder ab.  $P_1, P_2, \dots, P_k$  = anorganische Form;  $L_1, L_2, \dots, L_m$  = Löslichkeit von  $P_1$ - $P_k$ , abnehmend von  $L_1$  bis  $L_m$ ;  $V_1, V_2, \dots, V_n$  = Löslichkeitsrate von  $P_1$ - $P_k$ , abnehmend von  $V_1$  bis  $V_2$  (modifiziert nach SCHNUG und HANEKLAUS, 2016)

### 2.3 P-Düngerverbrauch in Deutschland

In Deutschland hat der jährliche Verbrauch von P-Düngemitteln seit dem späten 20. Jahrhundert stark abgenommen. So sank er von rund 523.680 t P im Jahre 1980 auf ca. 124.938 t P im Jahre 2012 (MOTESHAREZADEH et al., 2017). Im Wirtschaftsjahr 2020/21 belief sich der Absatz phosphathaltiger Düngemittel auf insgesamt 83.868 t P, wobei der überwiegende Teil in Form von Mehrnährstoffdüngern (PK-, NP- und NPK-Dünger) vertrieben wurde. Weicherdiges Rohphosphat, teilaufgeschlossenes Rohphosphat, Dicalciumphosphat, Rohphosphat mit wasserlöslichem Anteil, Thomasphosphat und Rohphosphat mit kohlensaurem Kalk machten zusammen ca. 2%, Superphosphat (auch Tripelsuperphosphat) ca. 11% des Absatzes aus (STATISTISCHES BUNDESAMT, 2021b). Betrachtet man die jährliche Gesamtmenge ausgebrachten Ps, so bilden tierische Wirtschaftsdünger heutzutage die wichtigste P-Quelle. Im Jahre 2010 wurden in dieser Form zwischen 151.867 und 283.660 t P gedüngt. 123.938 t P wurden als Mineraldünger ausgebracht (KRATZ ET AL., 2014)

Die jahrzehntelange, intensive Düngung im 20. Jahrhundert in Deutschland und anderen Ländern Europas hat dort vielerorts die Vorräte leicht pflanzenverfügbaren Ps in landwirtschaftlich genutzten Böden erhöht (EUROPEAN FERTILIZER MANUFACTURERS' ASSOCIATION, 2000; MEDINSKI et al., 2018). In Westeuropa war der kumulative P-Entzug durch Ernten je ha Kulturboden in den Jahren 1965 bis 2007 ( $350 \text{ kg ha}^{-1}$ ) um ein Vielfaches geringer, als der kumulative Input durch Mineraldüngemittel und Stalldung während dieser Periode ( $1.115 \text{ kg ha}^{-1}$ ). Trotz abnehmendem P-Düngeaufwand seit den 1980er Jahren stieg die durchschnittliche P-Aufnahme durch Nutzpflanzen weiterhin an und betrug in den Jahren 1965 und 2007 4,9 bzw. 9,9  $\text{kg ha}^{-1}$  bei einer P-Applikation von 23,8 bzw. 17,2  $\text{kg ha}^{-1}$  (SATTARI et al., 2012).

## 2.4 P-Versorgung der Ökoflächen in Deutschland

Bis heute profitieren in Deutschland auch ökologisch wirtschaftende Landwirtinnen und Landwirte, welche gemäß EU-Öko-Verordnung keine hochlöslichen Mineraldünger wie z.B. Tripelsuperphosphat verwenden dürfen (EUR-LEX, 2021a), von der langen Periode intensiver, konventioneller P-Düngung (KOLBE, 2016). Wirtschaftliche Erträge werden teilweise aufgrund der in dieser Zeit gestiegenen P-Vorräte erreicht (OEHL et al., 2000).

Eine Auswertung verschiedener Studien aus den Jahren 2000 bis 2015, bei welcher Daten von 213 Betrieben aus sechs Bundesländern betrachtet wurden, ergab folgende Verteilung der P-Gehaltsklassen ökologisch bewirtschafteter Acker- und Grünlandflächen:

**Tab. 1: Verteilung der VDLUFA-P-Versorgungsklassen auf ökologischen Acker- und Grünlandflächen [%]**  
(modifiziert nach Kolbe, 2016; VDLUFA, 2018)

Gehaltsklasse ( $\text{mg P}_2\text{O}_5 \text{ 100 g}^{-1}$ )	A ( $< 5$ )	B (6-9)	C (10-20)	D (21-34)	E ( $> 35$ )
Ackerland	13	27	36	16	8
Grünland	21	28	30	13	8

Im konventionellen Landbau gilt die Gehaltsklasse C als erstrebenswert. Liegt diese vor, wird eine Erhaltungsdüngung entsprechend der Abfuhr durch die Ernte empfohlen (VDLUFA, 2018). Im ökologischen Landbau wird diese Empfehlung oft für die Gehaltsklasse B gegeben, da von etwa 30% geringeren Erträgen ausgegangen werden muss und diese somit in vielen Fällen als ausreichend gilt (KOLBE, 2010). Des Weiteren wurden die Klassen im Jahre 2018 durch den VDLUFA neu definiert, sodass bei einer heutigen Beurteilung der o.g. Daten mehr Flächen als ausreichend bzw. überversorgt gelten würden (Gehaltsklasse B seit 2018: 3,4 bis 6,9  $\text{mg P}_2\text{O}_5 \text{ je 100 g Boden}$ ) (VDLUFA, 2018). Vor diesem Hintergrund und auf Basis der genannten Erhebungen ist die P-Versorgung aktuell also nur auf einem relativ geringen Teil der Ökoflächen Deutschlands ungünstig. Dadurch bedingte Ernteauffälle sind jedoch insbesondere

unter “alten” Ökobetrieben durchaus verbreitet. Des Weiteren schwanken P-Salden landesweit zwischen -16 und 26 kg P pro ha und Jahr. Deutschland weit ergibt sich für Ökoflächen ein Mittelwert von -5 kg P pro ha und Jahr, und auch die Mittelwerte der Bundesländer sind negativ (KOLBE, 2016). Aktuell werden die Vorräte also nicht ausreichend erhalten, weshalb langfristig eine Zunahme der unterversorgten Flächen zu erwarten ist (LØES und ØGAARD, 2001).

## 2.5 P-Management im Ökolandbau

Trotz des Bestrebens im Ökolandbau, Nährstoffkreisläufe weitestgehend geschlossen zu halten (IFOAM, 2021), sind P-Austräge in Form von Ernten oder in Folge von Nährstoffveredlung im Rahmen der Tierproduktion unvermeidbar. Um dem Trend der P-Verarmung auf Ökoflächen entgegenzuwirken ist es daher notwendig, die vielerorts negativen Bilanzen durch angemessenes P-Management zu verbessern.

Dieses fängt mit der gezielten Nutzung geeigneter Arten und Sorten sowie der Gestaltung der Fruchtfolge an. Wie in Kapitel 2.2 beschrieben unterscheiden sich Pflanzenarten in ihrer Fähigkeit, P verfügbar zu machen und aufzunehmen.

Als Kultur mit hohen Ansprüchen an die P- bzw. Nährstoffversorgung allgemein bei vergleichsweise schlechtem P-Aneignungsvermögen in der Hauptbedarfsphase sei hier z.B. Mais (*Zea mays*) zu nennen. Während dieser in der Vergangenheit im Ökolandbau im Vergleich zu seiner wichtigen Rolle im konventionellen Futterbau von geringer Bedeutung war, zeigt eine stetige Zunahme des jährlichen Absatzes an Öko-Mais-Saatgut, dass sich dies ändert (STORTMANN, 2020). Da Stickstoff im Ökolandbau als ertragslimitierender Faktor von großer Bedeutung ist und Mais auf einen Mangel stark reagiert, wird Öko-Mais in der Regel nach mehrjährigen Leguminosen oder einer legumen Zwischenfrucht angebaut (DÖRING, 2018). Zur Förderung der P-Versorgung in der Jugendphase bieten sich jedoch insbesondere auf Standorten mit P-Mangel auch andere Zwischenfrüchte an. Allgemein zeichnet sich Mais aufgrund seiner langen Vegetationszeit durch eine gute Ausnutzung der stetigen Nährstoffnachlieferung aus Grün- und Wirtschaftsdüngern aus (BECKMANN und KOLBE, 2002). Kulturen mit hohen P-Aufnahme-Effizienzen wie Phacelia (*Phacelia tanacetifolia*), Buchweizen (*Fagopyrum esulentum*) oder Serradella (*Ornithopus sativus*) eignen sich, um als Zwischenfrucht P im Boden zu mobilisieren und in ihrer Biomasse zu binden. Der mobilisierte und nach der Einarbeitung aus der Gründüngung freigesetzte P wird für die Folgekultur verfügbar, was eine ähnliche Wirkung wie eine organische Düngung haben kann (EICHLER-LÖBERMANN et al., 2008). Eine verbesserte Nutzung des P-Vorrats kann auch durch den gleichzeitigen Anbau verschiedener Kulturen auf derselben Fläche erfolgen (mixed cropping). Dabei kann dieser durch unterschiedliche Hauptaufnahmezeitpunkte oder Wurzeltiefen komplementär genutzt, oder durch Sekundärkulturen mit hohem P-Mobilisierungsvermögen für die Hauptkultur besser verfügbar gemacht werden (HINSINGER et al., 2011). Beispielsweise

kann der Anbau von Mais mit Ackerbohnen (*Vicia faba*) oder Gartenbohnen (*Phaseolus vulgaris*) die Maiserträge in Folge erhöhter P-Mobilisierung durch die jeweilige Sekundärkultur im Vergleich zum alleinigen Anbau erhöhen (LI et al., 2007; LATATI et al., 2016).

Das wichtigste Element im P-Management stellt die Düngung dar, wobei im Ökolandbau in dieser Hinsicht der Einsatz von Wirtschaftsdüngemitteln an erster Stelle steht. Nutztiere verwerten ungefähr 10-25% des aufgenommenen Ps (STEIN-BACHINGER et al., 2013). Bei der Haltung fallen Festmist, Jauche und Gülle an, die je nach Form und Tierart 0,1 bis 8,7 kg P je t FM enthalten und ausgebracht werden können (BARTELS et al., 2021). Auch innerhalb einer Form von Wirtschaftsdünger gibt es Unterschiede in Bezug auf die vorliegenden P-Formen. So kann der Anteil der anorganischen Fraktion aus überwiegend stabileren Calcium- und Magnesiumphosphaten 60-90% betragen. Die organischen P-Formen setzt sich v.a. aus gut löslichen Phytaten (Geflügel- und Schweinemist) bzw. Pyrophosphaten (Rindermist) zusammen (KRATZ et al., 2016). Somit gibt es Schwankungen in Bezug auf die Löslichkeit und damit Pflanzenverfügbarkeit des Ps in Wirtschaftsdüngern (KRATZ et al., 2010). Die P-Freisetzung aus organischen Verbindungen hängt von der Mineralisationsrate und damit von der mikrobiellen Aktivität im Boden ab. Diese wird nicht zuletzt durch die Bodenbearbeitung beeinflusst (ZIBILSKE und BRADFORD, 2003). Organische Dünger haben darüber hinaus unterschiedliche Gehalte an niedermolekularen organischen Säuren, welche im Boden Komplexe mit Eisen und Aluminium eingehen und damit das Ausmaß der P-Sorption reduzieren können (ØGAARD, 1996; KRATZ et al., 2016). Der Effekt einer Ausbringung von Wirtschaftsdüngern auf die pflanzliche P-Aufnahme ist also abhängig von der Zusammensetzung des Düngers. Eine langfristige, wiederholte Ausbringung hat meist eine Zunahme leicht verfügbaren Ps im Boden zufolge (z.B. MOTAVALLI und MILES, 2002; HUANG et al, 2011). Würde ein Betrieb ohne P-Importe ausschließlich eigens produzierte Futtermittel verwenden, so würde es durch den Produktexport trotz der erreichten, teilweisen Rezyklierung der Nährstoffe langfristig zu einer Reduzierung der Boden-P-Vorräte kommen (MÖLLER, 2009). Des Weiteren ist nur ein geringer Teil der Ökobetriebe Deutschlands viehlos (NIEBERG und RAHMANN, 2005). Ein langfristiger Ausgleich des P-Defizits auf Landesebene durch erhöhten Anfall bzw. erhöhte Ausbringung von Wirtschaftsdüngemitteln im Vergleich zu heute erscheint daher schwierig. Da diese neben P weitere Nährstoffe, aber auch Schadstoffe enthalten, deren übermäßige Einbringung in den Boden es aus ökologischen sowie gesetzlichen Gründen zu verhindern gilt, kann die Ausbringung außerdem nicht ausschließlich nach dem P-Düngebedarf ausgerichtet werden (BMJ, 2017; BARTELS et al., 2021).

Neben Wirtschaftsdüngern und organischen Reststoffen stehen im Ökolandbau ausschließlich schwer lösliche Rohphosphate als Mineraldüngemittel zur Verfügung, welche 5-13% P in Form von Calciumphosphaten enthalten (CORDELL und WHITE, 2011; JÖRGENSEN, 2018). Deren Wirksamkeit ist nur bei pH-Werten unter ca. 6, ausreichend Regenfällen und einer entsprechend

hohen Löslichkeit gegeben, sodass der Einsatz dieser ausschließlich bei geeigneten Standortbedingungen erfolgreich ist (SINAJ et al., 2001; PAULSEN et al., 2016). Die P-Mobilisierung aus Rohphosphaten kann durch Fruchtfolgen mit bestimmten Kulturen unterschiedlicher P-Aufnahme-Strategien verbessert werden (Steffens et al., 2003). Darüber hinaus gibt es Ansätze, die P-Verfügbarkeit aus Rohphosphaten durch Vermengen mit kompostierenden Wirtschaftsdüngern (MAHIMAIRAJA et al. 1995), oft in Kombination mit der Inokulation mit Phosphat-lösenden Pilzen (BISWAS und NARAYANASAMY, 2006), zu erhöhen. Zu diesem Zweck wurde auch die Behandlung mit elementarem Schwefel und schwefeloxidierenden Bakterien geprüft (ARIA et al., 2010). Eine zukünftige Verbesserung der Wirksamkeit von Rohphosphat im organischen Landbau ist also denkbar. Hinzu kommt jedoch, dass diese geogen bedingt teils hohe Schadstoffbelastungen vorweisen und die maximale Ausbringungsmenge dadurch eingeschränkt ist. Je nach gesteinsbildendem Material enthalten sie Schwermetalle wie Cadmium und Uran in unterschiedlichen Mengen, deren Eintrag in die Böden neben der daraus resultierenden Umweltbelastung das Risiko mit sich bringt, dass diese Schadstoffe über Pflanzen und Tiere in die menschliche Ernährung gelangen (KRATZ und SCHNUG, 2005). Ein weiteres Problem stellt die zukünftige Verfügbarkeit von Rohphosphaten dar. Diese werden neben dem direkten Einsatz als Düngemittel auch für die Herstellung von wasserlöslichen Mineraldüngern für die konventionelle Landwirtschaft verwendet (KRATZ et al., 2014). Globale, wirtschaftlich abbaubare Reserven könnten Schätzungen zufolge in 48 bis 172 Jahre verbraucht sein (ROSEMARIN et al., 2011). Der weltweite Bedarf hingegen könnte sich, bedingt durch Bevölkerungswachstum und zunehmenden Wohlstand in Entwicklungsländern, bis zum Jahre 2050 verdoppeln (NEDELICIU et al., 2020). Über die genaue Verteilung der Reserven gibt es unterschiedliche Angaben (VAN KAUWENBERGH, 2010). Fest steht jedoch, dass sich ein Großteil dieser auf wenige Länder konzentriert, wobei Marokko und Westsahara in den meisten Fällen als mit Abstand an erster Stelle stehend genannt werden. Mit abnehmenden Reserven weltweit besteht so die Möglichkeit der Marktmanipulation durch wenige Länder (GILBERT, 2009).

Im Ökolandbau wie auch in der konventionellen Landwirtschaft besteht also dringender Bedarf nach alternativen P-Quellen.

## **2.6 P-Rezyklierung und Aussichten für den organischen Landbau**

Es gibt zahlreiche Ansätze, P aus Klärschlamm, Schlachtabfällen, Essensresten, Stallmist, nicht-landwirtschaftlichen Pflanzenrückständen und diversen industriellen Abfällen zurückzugewinnen (MÖLLER et al., 2018; OHTAKE und TSUNEDA, 2019). Diese befinden sich in vielen Fällen noch in Entwicklung und unterscheiden sich teilweise stark in ihren bisherigen Potenzialen zur großflächigen Etablierung und Integrierung in entsprechende Industrien (SCHIPPER, 2019).

Das P-Potenzial jährlich anfallender Wirtschaftsdünger, Klärschlämme, Fleischknochenmehle und Komposte in Deutschland (431.000-667.000 t P) übersteigt den jährlichen landwirtschaftlichen P-Einsatz in organischer und mineralischer Form (326000-458000 t P), weshalb der Bedarf rechnerisch durch Nährstoffrecycling gedeckt werden könnte (KRATZ et al., 2014). Im Jahre 2010 wurden in Deutschland bereits 33.000 t P in Form von Schlachtnebenprodukten und 12.000 t P in Form von Klärschlamm gedüngt (KRATZ et al., 2014). Hierzulande ist der direkte Einsatz von Klärschlamm im Ökolandbau jedoch verboten (EUR-LEX, 2021a) und auch im Bereich der konventionellen Landwirtschaft aufgrund der Schadstoffbelastung umstritten (DEUTSCHER BUNDESTAG, 2002). Knochenmehl ist nach EU-Öko-Verordnung als Düngemittel zugelassen, jedoch nicht nach den Richtlinien verschiedener deutscher Bio-Verbände einschließlich Demeter und Bioland (STEIN-BACHINGER et al., 2013). Des Weiteren ist der Einsatz von Pflanzenkohle als Bodenverbesserer zulässig, welche einen Höchstwert von 4 mg polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen pro kg TM nicht überschreitet (EUR-LEX, 2021a). Dieser ist in den meisten Fällen jedoch nicht wirtschaftlich (HAUBOLD-ROSAR et al., 2016).

Das Ziel der verbesserten P-Versorgung im Ökolandbau durch P-Rezyklierung wird in Zukunft von der Verfügbarkeit, Wirksamkeit, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit sowie der Eignung bzw. Zulassung entsprechender Düngemittel für den Ökolandbau abhängen. In Deutschland stehen vor allem Produkte im Fokus, die auf der P-Rückgewinnung aus Klärschlamm basieren (GÜNTHER et al., 2018). In Folge der im Jahre 2017 beschlossenen Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung könnte die Produktion dieser in Zukunft stark zunehmen. Die Verordnung verpflichtet deutsche Kläranlagen größer 50.000 bzw. 100.000 Einwohnerwerte ab dem Jahr 2032 bzw. 2029 erstmals dazu, die P-Konzentration des entwässerten Klärschlammes je nach technischer Umsetzbarkeit auf mindestens 20 g P je kg TM oder um 50% zu reduzieren. Werden die Gehalte von 20 g je kg TM nicht erreicht oder unterschritten, so muss darüber hinaus 80% des P aus der Klärschlammverbrennungsgasche zurückgewonnen werden (ABFKLÄRV, 2017). Von der Neuordnung sind 500 der 9.300 Kläranlagen in Deutschland betroffen, welche zusammen zwei Drittel des Abwassers Deutschlands verarbeiten (KABBE, 2017).

Ab Juli 2022 werden erstmals Phosphatsalze (auch Struvite genannt) sowie thermisch oxidierte und pyrolysierte/gasifizierte Materialien in die EU-Düngemittelverordnung integriert. Für Phosphatsalze und thermisch oxidierte Materialien wird Klärschlamm als Ausgangsmaterial zulässig sein, für alle drei Kategorien darüber hinaus Gülle, tierische Nebenprodukte der Kategorie zwei und drei, pflanzliche Materialien, Bioabfälle, pflanzliche Abfälle aus der Lebensmittelindustrie sowie Verarbeitungsrückstände der Biodiesel- und Bioethanol-Herstellung (EUR-LEX, 2021bcd). Somit ist der Weg für den Einsatz von P-Recycling-Düngern in der konventionellen Landwirtschaft geebnet, was auch eine wichtige Voraussetzung für die

Integration dieser Produkte in die EU-Öko-Verordnung ist. Neben der rechtlichen Zulassung ist die Akzeptanz der Produkte unter Landwirtinnen und Landwirten sowie Verbänden für eine Etablierung im Ökolandbau entscheidend. Vertreter von Naturland e.V., Biopark e.V. und Bioland haben sich bereits offen in Bezug auf den Einsatz von Phosphatsalzen gezeigt, wobei als Voraussetzungen u.a. die Reinheit des Produkts und die ökologische Vertretbarkeit des Herstellungsverfahrens genannt werden (HOPPENHAUS, 2021). Bioland war darüber hinaus bereits maßgeblich an dem Projekt “nurec4org” beteiligt, in welchem die Einsatzmöglichkeiten für Nährstoffrezyklate im Ökolandbau evaluiert wurden (KRAUS et al., 2019b). Auch eine Erhebung aus dem Jahre 2013, bei der Personen von 139 Bioland-Betrieben nach ihrer Gewichtung verschiedener Kriterien zum Einsatz von P-Rezyklaten aus Abwasser und Klärschlamm befragt wurden, ergab, dass neben der Wirksamkeit die Schadstoffbelastung sowie der Energieaufwand des Herstellungsprozesses als wichtig erachtet wurden. Der Preis und die Streufähigkeit hingegen waren eher untergeordnete Kriterien (JEDELHAUSER et al., 2015). Die Rezyklate bzw. Rezyklatgruppen nach Art der Herstellung unterscheiden sich in diesen Aspekten zum Teil deutlich, weshalb sie bei einer Beurteilung meist einzeln betrachtet werden (MÖLLER et al., 2018; KRAUS et al., 2019a).

## **2.7 Herstellungsprozesse und Eigenschaften ausgewählter P-Rezyklate**

Im Folgenden werden ausgewählte P-Recycling-Düngemittel und die zugrunde liegenden P-Rückgewinnungsverfahren vorgestellt werden. Dabei wird jeweils auch der aktuelle Stand der großtechnischen Etablierung sowie die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens besprochen. Im Anschluss sollen Eigenschaften der Produkte und Herstellungsprozesse hervorgehoben werden, welche für eine Eignung dieser für den Ökolandbau von Relevanz sind.

### **2.7.1 P-Rezyklate aus Klärschlamm**

Nahezu 100% des durch den Menschen aufgenommenen P wird durch Exkrememente wieder ausgeschieden (JÖNSSON et al., 2004). Bei der Abwasseraufbereitung fallen hierzulande jährlich ca. 1,8 Millionen t TM Klärschlamm an (STATISTISCHES BUNDESAMT, 2021c), was bei einem durchschnittlichen P-Gehalt von 2,3 % (KRATZ und SCHNUG, 2006) einem P-Potenzial von ca. 41.400 t P im Jahr entspricht. Zum besseren Verständnis entsprechender P-Rückgewinnungsverfahren sollen zunächst der Aufbau und die Prozesse einer Kläranlage erklärt werden. Diese sind zusätzlich schematisch in Abb. 3 dargestellt. Die darin ebenfalls hervorgehobenen Ansatzpunkte für die P-Rückgewinnung werden anschließend erläutert.

In Kläranlagen werden Abwässer in mehreren Schritten aufbereitet, sodass anschließend eine Rückführung in Flüsse und Bäche möglich ist. Nach dem ersten Schritt des Zulaufs des Abwassers beginnt die mechanische Reinigung. Grobe Abfälle wie Toilettenpapier, Hygieneartikel oder auch Laub und Steine werden mit einem fest angebrachten Rechen entfernt.



Das Abwasser gelangt anschließend in ein Sandfangbecken, in welchem die Fließgeschwindigkeit reduziert und durch Luftzufuhr ein spiralförmiger Abfluss erzeugt wird. Dadurch sammeln sich Stoffe wie Kies oder Sand am Beckengrund und können abgepumpt werden. Im darauffolgenden Vorklärbecken wird die Fließgeschwindigkeit weiter reduziert, wodurch sich feine Schwebstoffe absetzen und den Primärschlamm bilden. Dieser wird zur Faulung weitergeleitet, während das Abwasser die biologische und chemische Behandlung durchläuft. Im sogenannten Belebungsbecken werden gelöste Stoffe wie z.B. verschiedene C-, N- und P-Verbindungen durch Bakterien und andere Mikroorganismen in Feststoffe und Gase umgewandelt. In einigen Anlagen wird überschüssiger P, welcher nicht durch den Zellaufbau der Mikroorganismen gebunden wird, durch die Zugabe von Metallsalzen ausgefällt. Alternativ besteht die Möglichkeit der erweiterten biologischen P-Elimination, bei der zusätzliche polyphosphat-akkumulierende Mikroorganismen in der biologischen Behandlung angereichert werden. Das je nach Kläranlage entstehende Gemisch aus "Belebtschlamm" und chemischen Schlamm wird im Nachklärbecken durch Absetzen vom Wasser getrennt und zum Teil als Rücklaufschlamm zur Anreicherung mit den benötigten Mikroorganismen zurück in das Belebungsbecken geleitet. Der restliche Überschussschlamm wird zur Faulung weitergeleitet (KRAUS et al., 2019b; BMLRT, 2022; WUPPERVERBAND, 2022). Vor der Faulung wird der Wassergehalt und damit das Volumen des Überschussschlamm in einem Eindicker reduziert. Zusammen mit dem Primärschlamm gelangt er anschließend in einen Faulturm, während das überschüssige Wasser wieder der Wasserlinie zugeführt wird. Im Faulturm werden hochmolekulare organische Inhaltsstoffe, bestehend aus Fetten, Eiweißen und Kohlenhydraten, von verschiedenen Bakterienarten aufgespalten und in Kohlenstoffdioxid, organische Säuren und Alkohole umgewandelt. Die organischen Säuren und Alkohole werden weiter zu Essigsäure und schließlich zu Methangas umgewandelt. Der Klärschlamm wird in einem darauffolgenden Behälter entwässert und anschließend, meist zur Monoverbrennung, abtransportiert (KLÄRANLAGE HAMM-WINDECK-WISSEN, 2022).

Bei der Rückgewinnung von P aus Klärschlamm ist zwischen Verfahren, die in die Kläranlage integriert werden und solchen, die diesen nachgeschaltet werden zu unterscheiden (Abb. 3). Den im Folgenden als erstes besprochenen sogenannten "Struviten" *Berliner Pflanze* und *Crystal Green* liegen integrierte Verfahren zugrunde, die im Anschluss vorgestellten Produkte *AshDec* und *Pyreg* entstehen bei nachgeschalteten Verfahren.

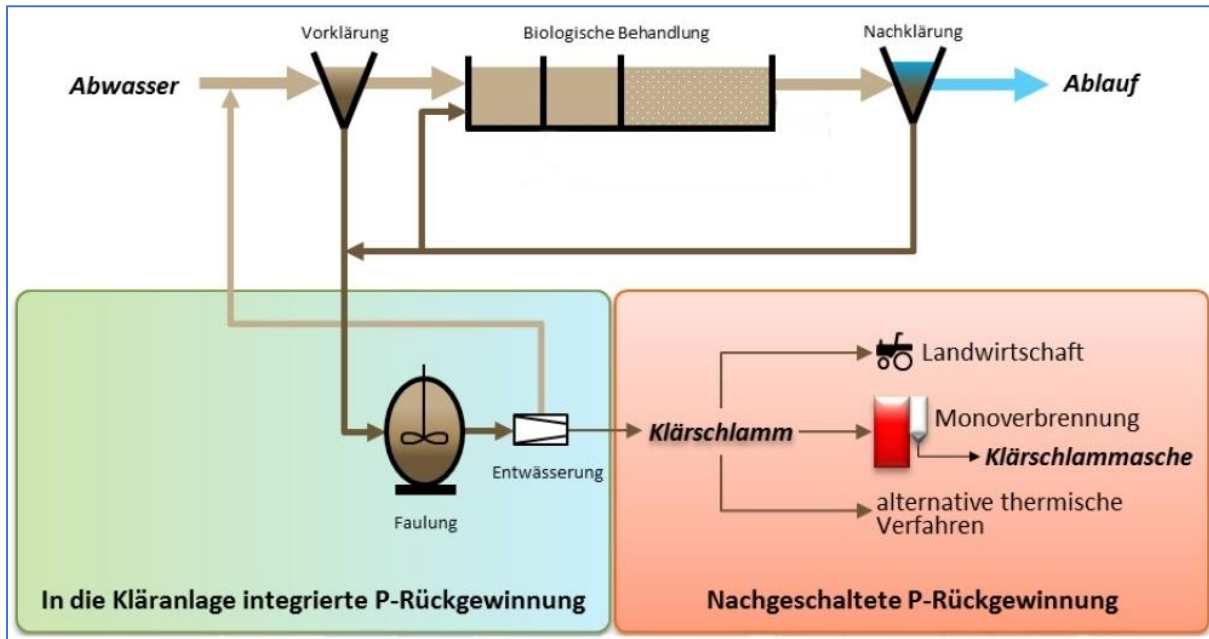


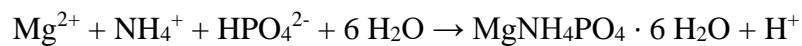
Abb. 3: Schematische Darstellung des Ablaufs der Abwasseraufbereitung in einem Klärwerk und der Ansatzpunkte für die Phosphorrückgewinnung (verändert nach KRAUS et al., 2019b)

### 2.7.1.1 Berliner Pflanze

Der Mehrnährstoff-Dünger *Berliner Pflanze* wird im Klärwerk Waßmannsdorf bei Schönefeld, Brandenburg von den Berliner Wasserbetrieben hergestellt und hat einen durchschnittlichen  $P_2O_5$ -Gehalt von 23%. Die weitere durchschnittliche Zusammensetzung beläuft sich unter anderem auf 12% Magnesiumoxid, 5% Stickstoff, 20% organische C-Verbindungen, 20% Wasser, 10% Carbonate und 10% andere Mineralien wie z. B. Calcium (BWB, 2022; PCS, 2022). Seit dem Jahre 2008 ist das Produkt in Folge eines Antrags der Berliner Wasserwerke in Deutschland als Düngemittel zugelassen (BWB, 2022).

Das Düngemittel ist ein Produkt des ersten großtechnischen P-Rückgewinnungsverfahrens aus Faulschlamm, welches seit 2006 von der Pollution Control Service GmbH und der CNP Cycles GmbH unter dem Namen *AirPrex*<sup>®</sup> vermarktet wird (CNP CYCLES GMBH, 2020; PCS, 2022). Der ursprüngliche Zweck des Verfahrens war, die unkontrollierte Bildung des Phosphatsalzes Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP) und die P-Rückbelastung nach der Faulung in Folge der erweiterten biologischen P-Elimination zu reduzieren. Im anaeroben Milieu eines Faulturms werden Polyphosphate aus der bakteriellen Biomasse zurückgelöst. Das freigesetzte ortho-Phosphat gelangt über das Faulwasser nach der Entwässerung wieder in die Wasserlinie und lagert sich als MAP in Rohrleitungen, Pumpen und weiteren Anlageteilen ab, wodurch es zu Leistungseinschränkungen der Anlage sowie erhöhtem Verschleiß und Wartungsaufwand und somit Kosten kommen kann (ORTWEIN, 2016).

Das *AirPrex*<sup>®</sup>-Verfahren basiert auf einem Reaktorsystem, welches zwischen Faulturm und Faulschlammmentwässerung in eine Kläranlage eingegliedert werden kann. Nach der Einleitung des Klärschlammes wird dieser Luftstripping unterzogen. Der pH-Wert steigt in Folge des Ausgasens von Kohlenstoffdioxid auf 7,8-8,2 an. Unter diesen Bedingungen führt eine gleichzeitige Zugabe von Magnesiumchlorid verstärkt zur Ausfällung von wasserhaltigen MAP, auch Struvit genannt:



Die Struvit-Mikrokristalle können je nach Anpassung des Systems im Schlamm belassen und der P aus diesem nach einer Monoverbrennung zurückgewonnen werden. Alternativ wird vermehrt Struvit in einem weiteren, nachgeschalteten Reaktor ausgefällt und so das Wachstum von Makrokristallen bewirkt. Diese werden ausgeschleust und gewaschen, wobei der P-Gehalt des Schlammes reduziert wird. Diese Variante ermöglicht die Nutzung des Struvits als Düngemittel, ist insgesamt jedoch kostenaufwendiger. (ORTWEIN, 2016; CNP CYCLES GMBH, 2020).

Die P-Rückgewinnungsrate des Verfahrens in Bezug auf die Gesamtfracht des Klärschlammes beträgt 7%, weshalb die im Rahmen der neuen Klärschlammverordnung vorgeschriebene Reduktion der P-Gehalte im Klärschlamm durch eine Integration nicht erreicht wird (VODEGEL und MÜLLER, 2017). Im Jahre 2018 war das *AirPrex*<sup>®</sup>-System in neun Kläranlagen (davon sechs in Deutschland) installiert. Die größte (1 Mio Einwohnerwerte) befindet sich in Amsterdam, Niederlande und produziert täglich 3 bis 5 t Struvit = 380 bis 635 kg P, was 3,8 kg je 10.000 Einwohnerwerte entspricht (DPP, 2018; KRAUS et al., 2019b). Durch die Erhöhung des Trockenrests im entwässerten Klärschlamm um bis zu 4% und den um bis zu 25% reduzierten Verbrauch von polymeren Flockungshilfsmitteln bei der Entwässerung sowie die Kostenreduktionen in Folge der kontrollierten MAP-Ausfällung ist die Integrierung des Verfahrens in eine Kläranlage in der Regel wirtschaftlich sinnvoll und rechnete sich beispielsweise bei der Anlage in Amsterdam nach 7,5 Jahren (ORTWEIN, 2016; DPP, 2018). Diese ist jedoch nur in solchen möglich, in denen die erweiterte biologische P-Elimination praktiziert wird. In Deutschland trifft dies auf ca. 30% der Kläranlagen zu (EWERT und WAGENBACH, 2014).

### 2.7.1.2 Crystal Green

Auch *Crystal Green*<sup>®</sup> ist ein Mehrnährstoffdünger auf Struvit-Basis. Durchschnittlich setzt er sich unter anderem zu 28% aus P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, zu 10% aus Magnesium und zu 5% aus Stickstoff zusammen (OSTARA, 2019).

Das zugrunde liegende P-Rückgewinnungsverfahren wird seit 2005 von dem kanadischen Unternehmen Ostara Nutrient Recovery Technologies Inc. vermarktet und basiert auf zwei in

die Kläranlage integrierte Reaktoren. Im anaeroben *Wasstrip*<sup>®</sup>-Reaktor wird aus dem eingedickten Überschussschlamm der biologischen Behandlung bzw. der erweiterten biologischen P-Elimination vor der Faulung bereits eine Rücklösung des mikrobiellen Polyphosphats forciert, wodurch die P-Rückgewinnungsrate erhöht wird. Dabei ist je nach Anpassung des Reaktors eine Zufuhr des Abwassers aus der Primärschlamm-Eindickung oder Teilen des Primärschlammes möglich, um leicht abbaubare Kohlenstoffverbindungen einzubringen und damit die Abgabe der Polyphosphate durch die Mikroorganismen zu begünstigen. In einer darauffolgenden Einheit wird der Überschussschlamm weiter eingedickt und das mit ortho-Phosphaten angereicherte Zentrat abgeleitet. Der eingedickte Überschussschlamm wird im Faulturm zusammen mit dem Primärschlamm der Faulung unterzogen, wo nun vor allem Ammonium ausgefällt wird. Das bei der anschließenden Entwässerung entstehende Zentrat wird mit dem aus der Überschussschlamm-Eindickung Entstandenen verschnitten und in den *Pearl*<sup>®</sup>-Reaktor, einem Hydrozyklon, geleitet. In diesem wird der pH-Wert durch das Hinzufügen von Natronlauge erhöht und in Folge der gleichzeitigen Zugabe von Magnesiumchlorid MAP ausgefällt, welche durch die Rezirkulation im Reaktor gefördert wird. Die Reaktionsgleichung gleicht dementsprechend der im *AirPrex*<sup>®</sup>-Verfahren. Die Konstruktion des Reaktors ermöglicht das Entstehen gleichmäßig großer Struvit-Kristalle und Granulate, welche nach Erreichen der gewünschten Größe entnommen und getrocknet werden. Die Granulate werden als Düngemittel unter dem Namen *Crystal Green* vertrieben (KRAUS und KABBE, 2017; DPP, 2018b; KRAUS et al., 2019b).

In Bezug auf die Gesamtfracht des Klärschlammes werden 12% des P zurückgewonnen, was für eine Erfüllung der Anforderungen der neuen Klärschlammverordnung nicht ausreicht (VODEGEL und MÜLLER, 2017). Das System war im Jahre 2021 weltweit in 23 Kläranlagen integriert, jedoch in keiner Deutschlands (OSTARA, 2021). Die größte Anlage befindet sich in einem Klärwerk in Chicago, USA (4,5 Mio Einwohnerwerte), in welcher täglich im Durchschnitt ca. 19 t Struvit = 2.413 kg P anfallen. Dies entspricht 5,4 kg je 10.000 Einwohnerwerte. Die Wirtschaftlichkeit der Integration des Verfahrens ergibt sich aus denselben Gründen wie bei dem *AirPrex*<sup>®</sup>-Verfahren (bis zu 4% erhöhter Trockenrest und 20% reduzierter Flockungshilfsmittel-Verbrauch), wobei eine solche auch hier nur in Kläranlagen möglich ist, in welchen die erweiterte biologische P-Elimination erfolgt (ORTWEIN, 2016; DPP, 2018b; OSTARA, 2018). Ostara Nutrient Recovery Technologies Inc. bietet den vertraglich gesicherten Kauf und Vertrieb der entstehenden Granulate an (DPP, 2018b).

### 2.7.1.3 AshDec

Das *AshDec*<sup>®</sup>-Verfahren hat seinen Ursprung im EU-Projekt “Sustainable and Safe Re-use of Municipal Sewage Sludge for Nutrient Recovery” (SUSAN) (HERZEL et al., 2018). Im Rahmen dieses Projekts entwickelte der Fachbereich Thermochemische Reststoffbehandlung und

Wertstoffrückgewinnung an der Bundesanstalt für Materialforschung (BAM) und -prüfung in den Jahren 2003-2008 einen Prozess zur thermochemischen Behandlung von Klärschlammasche mit dem Ziel der Nährstoff-Rückgewinnung (ADAM et al., 2009). Dieser wurde zur Verbesserung der Nährstoffverfügbarkeit des Produkts über die Jahre zum *AshDec*<sup>®</sup>-Verfahren weiterentwickelt (HERZEL et al., 2018). Inzwischen setzt sich das Produkt in Abhängigkeit von der Zusammensetzung der Klärschlammasche unter anderem aus durchschnittlich 16,7% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 12% Silizium, 9,6% Calcium, 7,4% Kaliumoxid, 3,5% Schwefel, 1,4% Magnesium sowie 6,8% Natrium, 5,6% Aluminium und 6,2% Eisen zusammen (HERMANN und SCHAAF, 2019).

Das Verfahren ist inzwischen von der BAM und dem finnischen Unternehmen Outotec Oyj patentiert und hat das Ziel, die Pflanzenverfügbarkeit des P in Klärschlammasche zu erhöhen und die Schwermetallgehalte zu verringern (HERZEL et al., 2018; KRAUS et al., 2019b). Andere mögliche Ausgangsmaterialien sind Aschen, welche als Nebenprodukte bei der Verbrennung von Gülle, Hühnerstreu oder Rückständen aus anaerober Faulung sowie Schlachtungen anfallen (DPP, 2019). Die Asche wird zunächst erwärmt und mit einem alkalischen Natrium- oder Kalium-Additiv wie z.B. Natrium- oder Kaliumcarbonat sowie einem Reduktionsmittel, beispielsweise getrocknetem Klärschlamm, versetzt. In einem Drehofenreaktor werden Asche und Additive bei 950-1000 °C erhitzt, wobei einige Schwermetalle gasförmig in den Filtern der Anlage aufgefangen und organische Schadstoffe eliminiert werden. Der P in der Asche liegt vorwiegend als schlecht pflanzenverfügbares Whitlockit vor. Dieses wird durch die Behandlung mit den alkalischen Additiven in Calcium-Alkali-Phosphat-Verbindungen, welches von besserer Pflanzenverfügbarkeit ist, überführt. Die Reaktionsgleichung ist im Folgenden vereinfacht angegeben, da Whitlockit in den Aschen durch das Einbauen von Aluminium, Eisen, Kalium, Magnesium und Natrium in unterschiedlichen Formen vorliegen kann:



Das phosphathaltige Material wird mechanisch nachbehandelt und so zu einem potenziell marktfähigen P- bzw. Mehrnährstoffdünger aufbereitet (HERZEL et al., 2018; DPP, 2019; KRAUS et al., 2019b).

Während des *AshDec*<sup>®</sup>-Verfahrens werden 98% des P aus der (Klärschlamm-)Asche zurückgewonnen, was bedeutet, dass damit die Vorgaben der neuen Klärschlammverordnung eingehalten werden können (VODEGEL und MÜLLER, 2017). Eine Anlage kann entweder in Verbindung mit einer Klärschlammmonoverbrennungsanlage oder alleinstehend gebaut werden, wobei letzteres eine regelmäßige Anlieferung der Asche erfordert (HERZEL et al., 2018). Bisher ist das Verfahren noch nicht kommerziell umgesetzt worden. Jedoch ist der Bau einer Demonstrationsanlage in Altenstadt, Bayern im Rahmen eines Projekts der BAM (R-

Rhenania, 2020-2025) geplant, in welcher nach Inbetriebnahme täglich durchschnittlich 32 t Endprodukt = 2,3 t P anfallen sollen (BAM, 2020). Eine Vermarktung des Produkts als Dünger ist wegen der Energiekosten des Verfahrens und der aktuellen Marktpreise von mineralischen P-Düngern, zumindest im Bereich der konventionellen Landwirtschaft, derzeit kaum wirtschaftlich (DPP, 2019).

#### 2.7.1.4 Pyreg

Das Karbonisierungs-Verfahren *Pyreg*<sup>®</sup> wurde in den Jahren 1999-2009 an der Technischen Hochschule Bingen entwickelt und wird seither von der Pyreg GmbH vermarktet (PYREG GMBH, 2020). Unter anderem ist auch Klärschlamm als Ausgangsmaterial möglich, wobei sich das Produkt in Abhängigkeit von den Stoffgehalten des Ausgangsmaterials unter anderem aus ca. 10-16% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 2-8% Calciumoxid, 1% Magnesiumoxid, 0,5-1% Schwefel und 0,5% Kaliumoxid zusammensetzt (LEIMKÖTTER, 2016; APPEL und FRIEDRICH, 2017).

Hauptbestandteil des Verfahrens ist der *Pyreg*<sup>®</sup>-Reaktor. In diesem wird getrockneter Klärschlamm nicht wie üblich verbrannt, sondern auf 500-700 °C erhitzt, schonend entgast und anschließend durch Luftzugabe karbonisiert. Dadurch wird die Bildung von Whitlockit verhindert, weshalb kein nachträglicher Aufschluss zwecks Verbesserung der Pflanzenverfügbarkeit des beinhalteten P notwendig ist (DPP, 2018c; PYREG GMBH, 2020). In welcher Form der P letztlich im Karbonisat vorliegt und wie pflanzenverfügbar dieser ist, hängt jedoch v.a. von den P-Verbindungen im Klärschlamm ab. Diese werden durch die Art des P-Eliminations-Verfahrens und der dabei verwendeten Stoffe bestimmt und verhalten sich während einer anschließenden thermischen Behandlung unterschiedlich (STECKENMESSER et al., 2016). Die im Reaktor entstehenden, brennbaren Gase werden in einer nachgeschalteten Brennkammer bei ca. 1.000 °C durch flammenlose Oxidation verbrannt, bevor sie abkühlen können. Dadurch wird der Anfall von Kondensaten, Teeren und anderen Problemstoffen verhindert. Die Karbonisate werden ausgegeben und sind potenziell direkt als Dünger verwendbar (DPP, 2018c; PYREG GMBH, 2020).

Bei dem Verfahren werden über 90% des P aus dem Klärschlamm zurückgewonnen, was eine Einhaltung der Vorgaben der neuen Klärschlammverordnung ermöglicht (DPP, 2018c). Der Reaktor kann dezentral Kläranlagen nachgeschaltet werden. Im Jahre 2020 war dies bereits in sechs Kläranlagen weltweit der Fall, wovon sich drei in Deutschland befanden (PYREG GMBH, 2020). Die größte Anlage befindet sich in der Kläranlage Homburg an der Saar (80.000 Einwohnerwerte), wo täglich ca. 1,1 t Karbonisat = 1 t P anfallen. Dies entspricht 125 kg P je 10.000 Einwohnerwerte. Durch die entstehende Wärmeenergie während des Verfahrens läuft der Reaktor autotherm. Bis zu 150 kWth überschüssiger Wärmeenergie können darüber hinaus anderweitig genutzt werden, beispielsweise zur Trocknung des Klärschlammes. Da das Produkt nicht weiterbearbeitet werden muss, entfallen Transport- und Verbrennungskosten. Die

Installation des Reaktors rechnet sich bei ab einer Kläranlagengröße von 50.000 Einwohnerwerten und einem Anfall von 1.000 t Klärschlamm (Trockenmasse) pro Jahr. Der Ausgangsschlamm muss einen Trockensubstanzgehalt von 80% sowie einen Mindestheizwert von 10 MJ kg<sup>-1</sup> haben (DPP, 2018c; PYREG GMBH, 2020). Zumindest im Rahmen der ab Juli 2022 eintretenden Änderungen der EU-Düngemittelverordnung wird sich an dem Verbot des Einsatzes von Klärschlamm-Karbonisaten in der Landwirtschaft nichts ändern, sodass vorerst keine Erlöse durch den Verkauf dieser zu erwarten sind (EUR-LEX, 2021bcd).

### **2.7.2 P-Rezyklate aus Schlachtabfällen**

In Deutschland fallen jährlich ca. 2,6 Millionen t Schlachtnebenprodukte aus der Fleischerzeugung an (STN, 2020). Dies entspricht einem P-Potenzial von etwa 100.000 t (KRATZ et al., 2014; MAYER und KALTSCHMITT, 2022). Die Nebenprodukte werden nach EU-Verordnung in drei Kategorien unterschiedlichen epidemiologischen Risikos eingeteilt (EUR-LEX, 2009, 2011), wobei K1-Material (z.B. von Wild- und Zootieren oder von mit TSE oder verbotenen Substanzen belasteten Nutztieren) derzeit überwiegend verbrannt und nicht rückgeführt wird. Das Material der restlichen Kategorien kann, teilweise auch im Ökolandbau, als Düngemittel eingesetzt werden, weißt bei hohem Knochenanteil jedoch eine schlechte Pflanzenverfügbarkeit vor. Diese kann durch Säureaufschluss oder Verbrennung mit anschließendem Aufschluss verbessert werden (BMEL, 2020).

#### **2.7.2.1 Knochenkohle+**

Für die Pyrolyse von entfetteten Tierknochen zur Verbesserung der Pflanzenverfügbarkeit enthaltener Nährstoffe existieren bereits zahlreiche Ansätze, wobei die eingestellten Temperaturen je nach Verfahren zwischen ca. 200 und 1000°C schwanken (LEINWEBER et al., 2019). *Knochenkohle+* beschreibt ein Pyrolyseprodukt, dessen Oberfläche durch gasförmige Schwefel-Komponenten modifiziert wurden. Dies wird durch das Einbringen der Kohle als Filtermaterial in eine Biogasanlage erreicht. Bei der Einbringung in den Boden werden die reduzierten Schwefelverbindungen des Produkts oxidiert, was eine Senkung des pH-Wertes und damit eine erhöhte Lösung der Calciumphosphate aus dem Knochenmaterial zufolge hat. Das Produkt setzt sich im Durchschnitt unter anderem aus 20% P, 30% Kalzium, 10% Kohlenstoff, 6% Magnesium und 1% Stickstoff sowie Spurenelementen zusammen (LEINWEBER, 2016; ZIMMER et al., 2018). Das Verfahren wurde im Jahre 2012 durch Wissenschaftler der Universität Rostock patentiert (DE102011010525), bisher jedoch in noch keiner Anlage kommerziell etabliert.

### **2.7.3 Eignung verschiedener P-Rezyklat-Dünger für den organischen Landbau**

Neben der Verfügbarkeit von P-Rezyklat-Düngern sind die Zulassung im Rahmen der EU-Öko-Verordnung sowie die Akzeptanz der Produkte unter den Landwirten für einen breiten Einsatz

im Ökolandbau entscheidend. In Bezug auf dafür wichtige Aspekte wie Wirksamkeit, Schadstoffbelastung und Nachhaltigkeit der zugrunde liegenden Verfahren weisen die genannten Produkte bzw. Produktklassen Unterschiede auf.

Die Struvite sind nach einem Bericht des UBA in ihrer Herstellung ökologisch als vorteilhaft zu bewerten, da die Anwendung entsprechender Verfahren aus den in 3.7.2.1 genannten Gründen mit Energieeinsparungen für den Kläranlagenbetrieb einhergehen und durch die Ausschleusung von gelösten Phosphaten und Ammonium das Eutrophierungspotential des Wassers gesenkt wird (KRAUS et al., 2019ab). Der Einsatz von ca. 3-15 t Magnesiumchlorid je t zurückgewonnenen P und geringen Mengen Kalkhydrat oder Natriumhydroxid wird in einer Beurteilung im Auftrag des Schweizer Bundesamtes geringe Umweltbelastung bewertet. Des Weiteren fällt kein weiterer Abfall an (ERNST BASLER + PARTNER AG, 2017). Die Belastung von Struviten mit organischen Schadstoffen und Schwermetallen wurde in verschiedenen Berichten und Erhebungen als unbedenklich eingestuft. In Gefäß- und Freilandversuchen mit unterschiedlichen Kulturen wurden P-Düngewirkungen festgestellt, die einer konventionellen Minereraldüngung entsprachen (z.B. LFU, 2015; KRAUS et al., 2019ab).

Die thermische Behandlung von Klärschlammmasche wird in verschiedenen Berichten wie dem des UBA als ökologisch "vertretbar" bzw. vergleichbar mit der Herstellung konventioneller P-Düngemittel beschrieben. In Bezug auf das *AshDec*<sup>®</sup>-Verfahren basiert dies u.a. auf dem geringen Chemikalieneinsatz und Energiebedarf (ca. 4300 kWh t<sup>-1</sup> P), wobei der Anfall von Sonderabfall in Form von 0,25 t Filterstaub t<sup>-1</sup> P als Nachteil aufgeführt wird (ERNST BASLER + PARTNER AG, 2017; KRAUS et al., 2019ab). Organische Schadstoffe werden während der Schlammverbrennung zerstört, das Ausmaß der Schwermetallbelastung des Produkts hängt jedoch stark von der des Ausgangsmaterials ab und ist somit im Einzelfall zu beurteilen (KRAUS et al., 2019b). Bisherige Düngeversuche ergaben stark variierende Effekte der Ascheprodukte auf die pflanzliche P-Aufnahme und Erträge in Abhängigkeit von der Art und -sorte sowie den Bodeneigenschaften (BMEL, 2020).

Thermische Aufschlussverfahren wie das der Pyreg GmbH benötigen in der Regel keine weiteren Chemikalien. Im Falle der Installation eines *Pyreg*<sup>®</sup>-Reaktors in einem Klärwerk kommt es, wie in 3.7.1.4 erläutert, an verschiedenen Stellen zu Energieeinsparung bzw. -erzeugung, weshalb eine solche mit ökologischen Vorteilen verbunden ist. Andererseits fallen bei derartigen Verfahren ca. 0,6 bis 1 t schwermetallreiche Flugasche je t P an, welche entsorgt werden muss (ERNST BASLER + PARTNER AG, 2017). Die Produkte sind je nach Ausgangsmaterial und Karbonisierungs-Temperatur unterschiedlich stark mit Schwermetallen, organischen Schadstoffen und polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen belastet, sodass in dieser Hinsicht eine Beurteilung im Einzelfall notwendig ist. In Feldversuchen konnte unter Praxisbedingungen bisher keine Düngewirkung der Karbonisate nachgewiesen werden,



wobei sowohl Getreide mit hohem P-Aneignungsvermögen als auch Mais, welcher im Jugendstadium sensitiv auf P-Mangel reagiert, betrachtet wurden (APPEL und FRIEDRICH, 2017).

Struvite werden aufgrund ihrer geringen Schadstoffbelastung sowie der ökologischen Bilanz ihrer Herstellung oft als für den ökologischen Landbau geeignet eingestuft. Jedoch besteht hier die Einschränkung der geringen P-Rückgewinnungs-Rate der zugrunde liegenden Verfahren, wodurch diese in Bezug auf die Einhaltung der zukünftigen Vorschriften durch die Klärschlammverordnung für viele Kläranlagen hierzulande unattraktiv sind. Die Eignung der anderen genannten Rezyklate hängt v.a. von der sehr individuellen Schadstoffbelastung ab. Für die Beurteilung der Wirksamkeit der Produkte bedarf es in Zukunft praxisnaher Feldversuche unter Bedingungen des ökologischen Landbaus.

### 3 Zielsetzung der Arbeit

In der vorliegenden Arbeit wurden die Recycling-P-Düngemittel *Berliner Pflanze* (Berliner Wasserbetriebe), *Crytal Green* (Ostara Nutrient Recovery Technologies Inc.), *AshDec* (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung; Outotec Oyj), *Pyreg* (Pyreg GmbH) und *Knochenkohle+* (Burgstaler, Leinweber und Wiedow) in einem Mais-Feldversuch getestet. Ziel war es, die Wirksamkeit der Produkte unter den Bedingungen des ökologischen Landbaus zu untersuchen.

Dabei galt es, die folgenden Fragen zu beantworten:

- Welchen Einfluss haben die verschiedenen P-Recycling-Dünger auf das Wachstum, den Ertrag und die Nährstoffaufnahme von Mais?
- Wie unterscheiden sie sich in ihrer Wirkung und in Bezug auf die P-Aufnahmeeffizienz von Tripelsuperphosphat und Rohphosphat?

## 4 Material und Methoden

Der im Folgenden beschriebene Versuch war Teil des Projekts “Alternative Phosphordünger (P-Rezyklate) zur Ertragssteigerung von Leguminosen und Getreide im Ökologischen Landbau” (Kurzbezeichnung: “Öko-P”) der Europäischen Innovationspartnerschaft „Landwirtschaftliche Produktivität und Nachhaltigkeit“ (“EIP-AGRI”), welches von der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen durchgeführt wurde. Ziel dieses Projekts war es, neben ihrer Wirksamkeit auch die Schadstoffbelastung sowie die ökonomische Eignung verschiedener Rezyklat-P-Dünger unter den Bedingungen des ökologischen Landbaus zu prüfen (LWK NRW, 2020).

### 4.1 Versuchsstandorte

Der Versuch wurde im Jahre 2021 an zwei verschiedenen Standorten mit P-Mangel im Kreis Soest, Nordrhein-Westfalen angelegt. Die Versuchsflächen gehören zu den Bioland-Ökobetrieben Kroll-Fiedler in Warstein-Belecke und Weber-Berres GbR in Warstein-Suttrop, und sind ca. 5,8 km Luftlinie von einander entfernt. Sie werden im Folgenden als Standort K (Kroll-Fiedler) bzw. W (Weber-Berres GbR) bezeichnet.

#### 4.1.1 Struktur der beteiligten Betriebe

Auf dem Betrieb Kroll-Fiedler wird seit 1989 nach Bioland-Richtlinien gewirtschaftet und seit über 60 Jahren Milchvieh gehalten. Im Jahre 2021 setzte sich der Bestand aus den Zweinutzungsrasen Rot- und Schwarzbuntes Niederungsrind zusammen und belief sich auf etwa 80 Kühe zuzüglich deren Kälber. Der Feldfruchtanbau umfasste neben Futterkulturen auch Backgetreide wie etwa Dinkel und Weizen sowie Hanf, Lupinen und Schälhafer für den Naturkostmarkt. Die landwirtschaftliche Nutzfläche inklusive Grünland war 85 ha groß (Kroll-Fiedler, 2021).

Der Milchviehbetrieb Weber-Berres GbR wurde 2001 auf Ökolandbau und -tierhaltung nach Bioland-Richtlinien umgestellt. Im Jahre 2021 wurden ungefähr 90 Kühe der Rasse Rotbuntes Niederungsrind gehalten. Die landwirtschaftliche Nutzfläche von 125 ha teilte sich in Grünland sowie Ackerland für den Anbau von Futter-, Getreide- und Hülsenfruchtklturen auf (LWK, 2021).

#### 4.1.2 Bodeneigenschaften auf den Versuchsflächen

Die genaue Lage des Standortes K lautet 51°30'26"N 8°19'43"O und liegt 318 m über NN. Bei der Bodenart des Schlags, auf dem der Versuch angelegt wurde, handelt es sich um schluffigen Lehm (Lu). Der Boden der Versuchsfläche hat 42 Bodenpunkte und fiel in die P-Gehaltsklasse B, die P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Gehalte schwankten teilweise jedoch (Tab. 2). Das P-Nachlieferungspotenzial war niedrig bis mittel, der pH-Wert belief sich auf durchschnittlich 6,3. Auf der Fläche befand sich

vor Anlage des Versuchs ein Klee grasbestand, welcher im Vorjahr als Weide diente. Er wurde zuletzt mit 200 dt ha<sup>-1</sup> Gärresten gedüngt und im Frühjahr 2021 mittels Pflug umgebrochen.

Der Standort W befindet sich 51°27'42"N 8°22'15"O und liegt 364 m über NN. Der Boden ist ein schluffiger Lehm (Lu) mit 47 Bodenpunkten. Die Teilfläche, auf der der Versuch angelegt wurde, fiel in die P-Gehaltsklasse A und wies ein hohes P-Nachlieferungspotenzial sowie einen durchschnittlichen pH-Wert von 5,3 vor. Auch hier stand vor dem Versuch Klee gras, welches im Frühjahr umgebrochen wurde. Zuletzt wurde im Vorjahr mit Gülle gedüngt (38,9 kg ha<sup>-1</sup> N, davon 18,9 kg ha<sup>-1</sup> NH<sub>4</sub>; 15,6 kg ha<sup>-1</sup> P) und im Mai 2021 gepflügt.

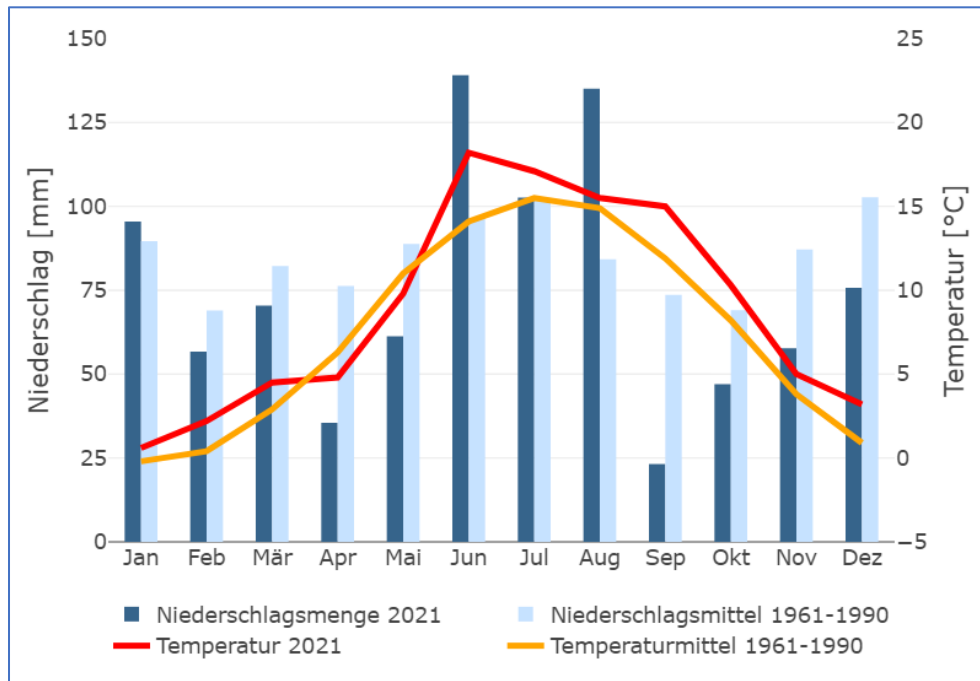
Weitere Bodeneigenschaften der Standorte sind blockgenau in Tab. 2 aufgeführt:

**Tab. 2: Blockgenaue und durchschnittliche Bodeneigenschaften der Versuchsstandorte in 30 cm Tiefe,** bestimmt durch die Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt Nordrhein-Westfalen; Bodenproben vom 02.12.21 (Kroll-Fiedler) und 01.04.22 (Weber); N<sub>gesamt</sub> nach DIN EN 16168, P-Nachlieferungspotenzial nach Flossmann und Richter (1982) bestimmt; alle anderen Parameter nach Methodenhandbuch I der VDLUFA (VDLUFA, 1999) bestimmt

		pH	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	N <sub>gesamt</sub>	C <sub>org</sub>	C/N	Humus	P-Nachlieferungspotenzial
			[mg 100 g <sup>-1</sup> Boden]				[%]		[%]	
Kroll-Fiedler	Block A	6,5	6,6	16,3	7,9	0,2	2	10	3,4	niedrig
	Block B	6,2	7,1	14,3	7,8	0,2	2	11	3,4	mittel
	Block C	6,2	4,1	15,9	7,9	0,2	1,8	9	3,1	mittel
	Block D	6,2	5	16,1	8,4	0,2	2	11	3,4	niedrig
	<b>Mittelwert</b>	<b>6,3</b>	<b>5,7</b>	<b>15,7</b>	<b>8</b>	<b>0,2</b>	<b>2</b>	<b>10</b>	<b>3,3</b>	-
Weber	Block A	5,4	2	3,3	5,6	0,2	2	9	3,4	hoch
	Block B	5,3	2	3,5	5,8	0,2	2	9	3,4	hoch
	Block C	5,2	2	3,1	5,8	0,2	2	9	3,4	hoch
	Block D	5,4	2,4	3,5	5,4	0,3	2,3	9	4	hoch
	<b>Mittelwert</b>	<b>5,3</b>	<b>2,1</b>	<b>3,4</b>	<b>5,7</b>	<b>0,2</b>	<b>2,1</b>	<b>9</b>	<b>3,6</b>	-

### 4.1.3 Klimadaten

In unmittelbarer Nähe zu den Versuchsstandorten befanden sich keine Wetterstationen, deren Daten öffentlich zugänglich waren. Deshalb wurden jene nahegelegener Messstationen des Deutschen Wetterdienstes verwendet (Abb. 4).



**Abb. 4: Monatliche Niederschlagsmengen [mm] und Temperaturmittel [°C] im Jahresverlauf an den Standorten K und W.** Dargestellt für das Anbaujahr 2021 (DWD Wetterstation Rütchen) und die Referenzjahre 1961-1990 (DWD Wetterstationen Warstein und Eslohe für Niederschlag bzw. Temperatur) – (DWD, 2021a und 2021b, Meteostat, 2022).

Verglichen mit den Mitteln der Referenzjahre 1961-1990 war das Jahr 2021 an den Standorten durchschnittlich wärmer (Temperaturmittel von 7,5 bzw. 8,9 °C) und niederschlagsärmer (1021,3 bzw. 899,8 mm Gesamtniederschlag), was sich insgesamt auch beim Betrachten der Vegetationsperiode (Mai bis September) widerspiegelt. In den Monaten Juni und September waren die Temperaturen verglichen mit den mehrjährigen Mitteln durchschnittlich 29% (4,1 °C) bzw. 26% (3,1 °C) höher. April und Mai waren hingegen die einzigen Monate im gesamten Jahr, in denen die Temperaturen geringer waren (- 23% / 1,5 °C bzw. 11% / 1,2 °C).

Hervorzuheben ist außerdem, dass der Sommer 2021, wie an vielen anderen Orten Deutschlands, durch starke Regenfälle gekennzeichnet war. Entgegen dem Trend über die Monate hinweg waren sowohl Juni als auch August deutlich niederschlagsreicher als im mehrjährigen Mittel (+ 44% / 42,6 mm bzw. 61% / 50,9 mm) (Abb. 4).

### 4.2 Versuchsaufbau

An beiden Standorten wurde ein Mais-Feldversuch in Form einer randomisierten Blockanlage mit dem Prüffaktor Düngung etabliert, um die fünf untersuchten P-Düngemittel in ihrer Wirksamkeit zu bewerten.

Zum Vergleich wurden neben einer ungedüngten Kontrolle auch ein Rohphosphat des Herstellers TIMAC AGRO Deutschland GmbH und ein Tripelsuperphosphat des Herstellers Triferto untersucht, sodass sich insgesamt folgende acht Faktorstufen ergaben: AshDec = AD, Berliner Pflanze = BP, Crystal Green = CG, Knochenkohle+ = KK, Pyreg = PY, Rohphosphat = RP, Tripelsuperphosphat = TS und Kontrolle ohne P-Düngung = K0.

Die Versuchsfläche war an beiden Standorten in vier Blöcke mit je einer Parzelle pro Faktorstufe, also insgesamt 32 Parzellen aufgeteilt. Diese waren 3 x 12 m = 36 m<sup>2</sup> groß und lagen in jedem Block unmittelbar nebeneinander. Die Blöcke waren mit einem Abstand von jeweils 2 m hintereinander angeordnet. Links und rechts der Blockanlage wurde jeweils ein 3 m breiter Randstreifen angelegt. Insgesamt ergab sich eine Versuchsfläche von 0,16 ha pro Standort (Abb. 3).

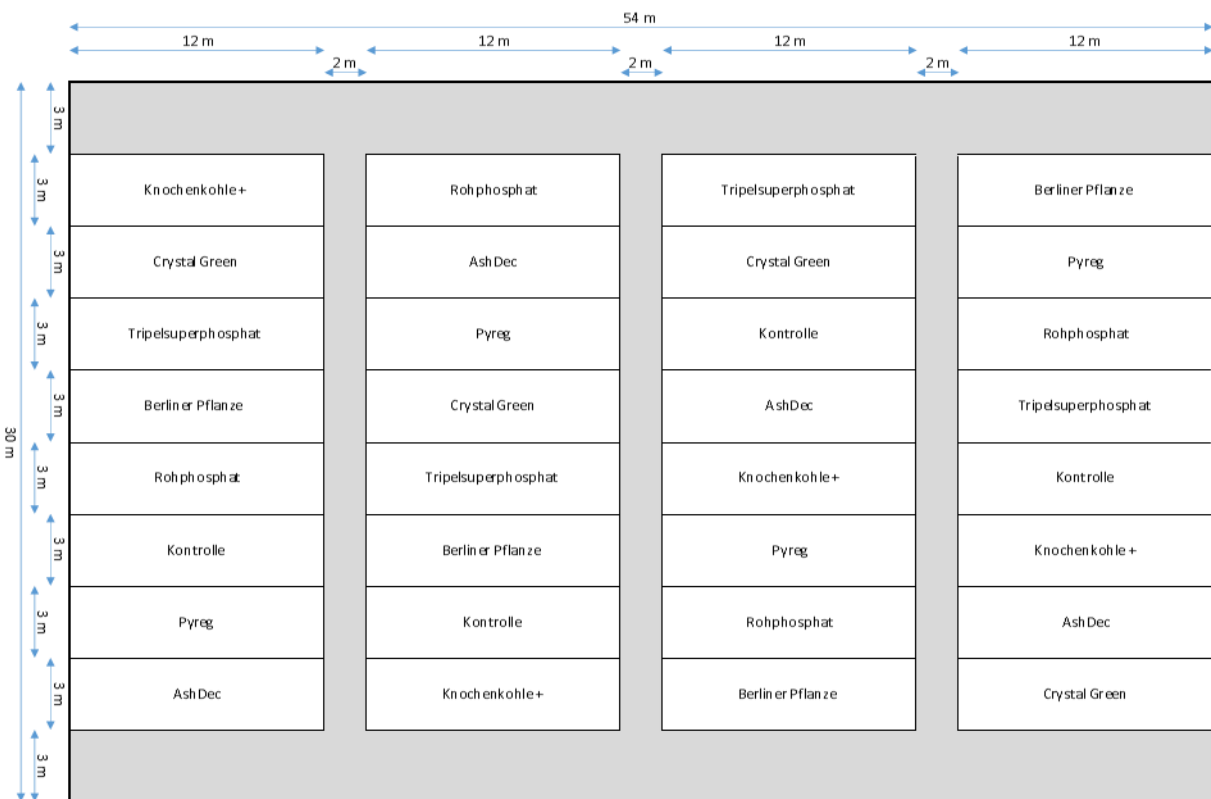


Abb. 5: Aufbau des P-Düngeversuchs in Form einer randomisierten Blockanlage mit Maisanbau während der Vegetationsperiode 2021; exemplarisch am Standort K (zur Darstellung um 180° gedreht)

Die Verteilung der Düngemittel an den jeweiligen Standorten sowie die  $P_2O_5$ -Gehalte der jeweiligen Parzellen sind in Tab. 3 angegeben. In Folge der randomisierten Verteilung der Düngewarianten ergaben sich für die durchschnittlichen Bodenparameter der Parzellen je nach Düngemittel ähnliche Werte (Anhang-Abb. 2).

**Tab. 3: Dem Versuchsaufbau entsprechende, randomisierte Verteilung der Düngemittel auf die je 32 Parzellen an den Standorten Kroll-Fiedler (K) und Weber (W) sowie  $P_2O_5$ -Gehalte der jeweiligen Parzellen [ $mg\ 100\ g^{-1}$  Boden] in der Vegetationsperiode 2021; AD = AshDec, BP = Berliner Pflanze, CG = Crystal Green, K0 = Kontrolle, KK = Knochenkohle+, PY = Pyreg, RP = Rohphosphat, TS = Tripelsuperphosphat; rote/orangene/grüne/blau Färbung = VDLUFA P-Gehaltsklasse A/B/C/D**

Ort	Block	Parzelle - Düngewariante   $P_2O_5$ -Gehalt [ $mg\ 100\ g^{-1}$ Boden]							
K	4	BP   5	PY   5	RP   4	TS   4	K0   6	KK   6	AD   6	CG   4
	3	TS   4	CG   5	K0   3	AD   3	KK   5	PY   4	RP   5	BP   4
	2	RP   7	AD   5	PY   6	CG   12	TS   6	BP   14	K0   4	KK   4
	1	KK   12	CG   5	TS   5	BP   7	RP   6	K0   6	PY   7	AD   5
W	4	K0   3	CG   3	TS   3	RP   2	KK   2	AD   2	BP   2	PY   2
	3	RP   2	KK   2	K0   2	AD   2	PY   2	BP   2	TS   2	CG   2
	2	AD   2	K0   2	PY   2	BP   2	CG   2	TS   2	KK   2	RP   2
	1	PY   2	BP   2	CG   2	KK   2	TS   2	RP   2	K0   2	AD   2

Der Mais war die erste Kultur einer dreijährigen Fruchtfolge mit Klee-/Luzernegras (2022) und Winterroggen (2023). Unter Einbezug dieser und der P-Gehaltsklassen der Böden wurden für den Standort K ein Düngebedarf von 135 und für den Standort W von 146  $kg\ P\ ha^{-1}$  ermittelt. Unter Einbezug der P-Gehalte der Düngemittel wurden die für eine entsprechende P-Düngung nötigen Düngemittelmengen berechnet und auf den Parzellen ausgebracht (Tab. 4).

Die verwendeten Struvite Berliner Pflanze und Crystal Green enthielten u.a. auch Stickstoff. Die dadurch bedingte Stickstoff-Düngung war auf den Crystal-Green-Parzellen am höchsten und wurde auf den restlichen Parzellen durch die Ausbringung von Haarmehlpellets ausgeglichen (Tab. 4). Diese enthielten 140  $g\ N\ kg^{-1}$  Produkt und wurden aufgrund ihres niedrigen P-Gehalts von 1,5  $g\ P\ kg^{-1}\ TM^{-1}$  bei einem TM-Gehalt von 93% gewählt. Auf allen Parzellen der Standorte K und W erfolgte so eine N-Gabe von 100 bzw. 108  $kg\ N\ ha^{-1}$ .

**Tab. 4: P-, N- und TM-Gehalte sowie Ausbringungsmengen der verwendeten P-Düngemittel und jeweilige Menge der ergänzenden Haarmehlpelletedüngung**

P-Düngemittel	P-Düngemittel- Nährstoff- und TM-Gehalte			Ausbringungsmenge P-Düngemittel [kg ha <sup>-1</sup> ]		Ergänzende Haarmehlpellet- düngung [kg ha <sup>-1</sup> ]	
	g P kg <sup>-1</sup> TM	g N kg <sup>-1</sup>	TM [%]	Standort K	Standort W	Standort K	Standort W
Berliner Pflanze	110	500	83,7	1469	1586	189	206
Crystal Green	110	500	61,7	1994	2153	0	0
AshDec	75	0	100	1803	1947	722	778
Pyreg	61	0	76,1	2914	3147	722	778
Knochenkohle+	110	0	95,7	1286	1389	722	778
Tripelsuperphosphat	170	0	91,3	872	942	722	778
Rohphosphat	100	0	95,2	1422	1536	722	778

An beiden Standorten wurde die frühreife Mais-Sorte *Crosbey* der Deutsche Saatveredelung AG (DSV) mit einer Siloreifezahl von 220 verwendet. Sie weist eine geringe Anfälligkeit für Krankheiten vor und ist durch ihren kompakten Wuchs bei hohem Stärkegehalt sowohl für die Nutzung als Körner- und CCM-Mais als auch als Silomais geeignet (DSV, 2021). Zum Schutz vor Vogelfraß war das Saatgut mit elementarem Schwefel gebeizt. Gesät wurde mit einer Aussaatstärke von 9 keimfähigen Körnern m<sup>-2</sup> und einem Reihenabstand von 75 cm, sodass sich vier Reihen je Parzelle ergaben.

### 4.3 Versuchsvorbereitung

An jedem Standort wurden parzellengenaue Bodenproben (0-30 cm) gezogen (K: 02.12.2020; W: 01.04.2021), welche zur Analyse an die Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt Nordrhein-Westfalen (LUFÄ NRW) in Münster geschickt wurden (K: 08.01.2021 bis 19.02.2021; W: 16.03.2021 bis 04.05.2021). Die organischen Kohlenstoffgehalte, die Stickstoffgehalte (separate Bodenbeprobung), die daraus berechneten C/N-Verhältnisse und die P-Nachlieferungspotenziale wurden blockgenau ermittelt, die P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-, K<sub>2</sub>O- und Mg-Gehalte sowie die pH-Werte parzellengenau. Des Weiteren wurden die Bodenarten bestimmt. Das P-Nachlieferungspotenzial wurde nach Flossmann und Richter 1982, der N-Gehalt nach DIN EN 16168 und alle anderen Parameter nach Methodenhandbuch I der VDLUFA (VDLUFA, 1999) bestimmt.

Zur Berechnung der Düngemengen wurde das Tool NPM<sub>ax</sub> der Landwirtschaftskammer verwendet (LWK NRW, 2018). Dabei wurden die den P-Gehalten entsprechenden Boden-P-Gehaltsklassen sowie die geplante dreijährige Fruchtfolge berücksichtigt, welche sich aus Mais



(2021), Klee-/Luzerngras (2022) und Winterroggen (2023) zusammensetzte. Zwecks Verteilgenauigkeit wurde die zu düngende Menge in vier Tüten pro Parzelle aufgeteilt.

#### 4.4 Versuchsdurchführung

Die Ausbringung der P-Düngemittel erfolgte an den Standorten K und W am 11. bzw. 14.05.2021 (Abb. 6). Am Standort W wurden die ersten drei Meter der Parzelle 5 (Tripelsuperphosphat) bei der Einrichtung eines benachbarten Versuchs versehentlich vor der vorangegangenen Bodenbearbeitung gedüngt, sodass dieser Teilbereich bei der Düngung des restlichen Versuchs ausgelassen wurde. Die Böden an den Standorten K und W wurden am 12. bzw. 14.05.2021 mittels Grubber und Walze bzw. Grubber und Kreiselegge bearbeitet. Am 14.05.2021 wurde an beiden Standorten der Mais durch einen Lohnunternehmer mit einer sechsreihigen, pneumatischen Einzelkornsämaschine gesät. Die Haarmehlpellets zur N-Düngung wurden am 22. (K) und am 25.06.2021 (W) ausgebracht.



**Abb. 6: Händische Ausbringung der P-Düngemittel am Standort Kroll-Fiedler am 11.05.2021;** Im Vordergrund von links nach rechts: Rohphosphat, AshDec (rötlich), Pyreg (schwarz), Crystal Green (weiß)

Das Unkrautmanagement erfolgte je nach Notwendigkeit. Am Standort Weber wurde kurz nach der Saat am 22.05.2021 gestriegelt und am 10.06.2021 händisch sowie am 28.06.2021 maschinell gehackt. Am Standort Kroll-Fiedler wurde am 14.06.2021 maschinell und am Folgetag ergänzend händisch gehackt.

Am 29.06.2021 (BBCH 13-15) wurden einzelne Pflanzen, die in Folge von Doppel- oder Mehrfachbelegungen Stängel an Stängel standen, entfernt und anschließend die Bestandesdichte erfasst. Eine Berliner-Pflanze-Parzelle am Standort W wurde auf Grund des niedrigen Feldaufgangs von 2 Pflanzen  $m^{-2}$  vom weiteren Verlauf des Versuchs ausgeschlossen. 15 Pflanzen pro Parzelle wurden für die folgende Datenerfassung markiert. Es wurden

ausschließlich Pflanzen aus der Kernparzelle ausgewählt, also je Parzelle nur aus den mittleren zwei Reihen abzüglich der ersten und letzten drei Meter. Über die Vegetationsperiode hinweg kam es wiederholt zu vereinzelt Pflanzenschäden durch Wildtiere, Witterung und Arbeitsschritte, weshalb zu verschiedenen Zeitpunkten einige Pflanzen für die Bonituren neu ausgewählt werden mussten.

## **4.5 Datenerfassung**

### **4.5.1 Messung der Pflanzenlängen und -durchmesser**

Die ausgewählten Pflanzen wurden an insgesamt sechs Terminen zwischen dem 05.07. und 13.09.2021 gemessen. Dabei wurde je nach organisatorischer Möglichkeit ein 10 bis 14-tägiger Abstand zwischen den Terminen eingehalten. Mittels Zollstock bzw. Messschieber wurden Pflanzenlänge und -durchmesser bestimmt. Der Zollstock wurde dazu am Boden direkt neben dem Stängel angesetzt. Gemessen wurde bis zur obersten Spitze des letzten gestreckten Blattes der Pflanze bzw. nach dem Rispschieben bis zur Spitze der Rispe. Der Durchmesser wurde an der breitesten Stelle über dem ersten Nodium gemessen.

### **4.5.2 Beurteilung des Entwicklungsstadiums**

Das Entwicklungsstadium der Pflanzen wurde zu jedem Boniturtermin an beiden Standorten jeweils für den gesamten Bestand geschätzt. Die Pflanzen wurden der BBCH-Skala nach Weber und Bleiholder (1990) entsprechend bewertet.

### **4.5.3 Chlorophyll-Messung**

Zu jedem zweiten Termin wurde mit Hilfe eines Chlorophyll-Meters (SPAD 502 Plus der Firma Konica Minolta) der relative Chlorophyllgehalt an zehn zufällig ausgewählten Pflanzen je Parzelle gemessen. Dabei wurde der Sensor des Geräts am jeweils jüngsten, voll entwickelten Blatt mittig vor der Blattader angesetzt.

### **4.5.4 Bestimmung der Pflanzenbiomasse**

Zur Biomassebestimmung erfolgte neben der Haupternte am 11. (W) bzw. 17.10.2021 (K) an beiden Standorten auch eine Zwischenernte am 24.08.2021. Dabei wurden an allen Terminen sechs Pflanzen je Kernparzelle entnommen, welche mittels Messer und Astschere ca. drei bis fünf cm über dem Boden abgetrennt wurden. Bei der Haupternte wurden 35 weitere Pflanzen je Parzelle entnommen, welche vor Ort gewogen und anschließend entsorgt wurden.

Zur Bestimmung der FM wurden an den jeweiligen Folgetagen zunächst die sechs ganzen Pflanzen und anschließend die abgetrennten Kolben (inklusive Spindel und Lieschblätter) gewogen. Die von den Kolben befreiten Restpflanzen wurden daraufhin mit einem Cramer Gartenhäcksler Kompostmeister Silent 3500 zerkleinert. Aus dem gemischten Häckselgut einer

Parzelle wurde je eine Mischprobe entnommen. Dabei wurde das Material der ersten beiden gehäckselten Pflanzen je Parzelle ausgelassen bzw. vor dem Zerkleinern und Mischen der restlichen Pflanzen entsorgt, um Einträge aus vorherigen Häcksel-Vorgängen zu minimieren. Aus den abgetrennten Kolben wurden je Parzelle drei bis vier für eine Mischprobe ausgewählt, wobei taube und beschädigte Kolben aussortiert wurden (Abb. 7).



**Abb. 7: Kolben- und Spross-Mischproben der Zwischenernte vom 24.08.2021 nach der Einwaage und vor der Trocknung zur TM-Bestimmung**

Nach der Einwaage wurden alle Mischproben zunächst für 24 Stunden bei 65 °C und anschließend für weitere 24 Stunden bei 105 °C bis zur Gewichtskonstante getrocknet. Die getrockneten Proben wurden erneut gewogen und das Verhältnis der so ermittelten TM zur vorher erfassten FM zur parzellengenauen Bestimmung der durchschnittlichen TM-Gehalte je Pflanze genutzt. Diese wurden mit den parzellengenauen FM-Erträgen und Bestandesdichten verrechnet, um anschließend die durchschnittlichen TM-Erträge je ha<sup>-1</sup> in Abhängigkeit von der Düngevariante zu erhalten. Bei der Haupternte wurden dabei die FM der 35 weiteren Pflanzen je Parzelle berücksichtigt, welche am Tag der Ernte an den Standorten gewogen worden waren. In allen Fällen wurden im Rahmen der FM-Bestimmung Fehlentwicklungen und Schäden der gewogenen Kolben festgehalten. Schließlich wurden bei der Bestimmung der TM-Erträge nur vollständig entwickelte bzw. unbeschädigte Kolben berücksichtigt.

#### 4.5.5 Nährstoffanalysen

Aus allen zuvor angefertigten und getrockneten Mischproben der Haupternte wurden Teilmengen für die C-, N- und P-Analysen entnommen und unter Einsatz der Scheibenschwingmühle RS 200 der Firma Retsch vermahlen. Dabei wurden eine Drehzahl von  $1400 \text{ min}^{-1}$  und eine Mahldauer von 60 bzw. 40 Sekunden für die Kolben- bzw. Restpflanzenproben gewählt.

Im Labor wurden aus jeder Probe 200 mg Mahlgut mit je 3 ml konzentriertem  $\text{H}_2\text{O}_2$  und 6 ml konzentrierter  $\text{HNO}_3$  in einem Mikrowellen-Aufschlussgerät (MARXpress der Firma CEM) aufgeschlossen. Zur Bestimmung der C- und N-Gehalte wurde ein Elementaranalyser (EA 3000 der Firma Eurovector) genutzt. Die P-Gehalte wurden mit Hilfe eines Continuous Flow Analysers (QuAAtro 39 der Firma Seal Analytical) mit der Molybdän-Blau-Methode ermittelt.

Aus den ermittelten Nährstoffgehalten wurden das C/N und das N/P-Verhältnis der Pflanzen sowie die P-Verwertungseffizienz (nach SANDAÑA, 2016) und die P-Aufnahmeeffizienz (nach YU et al., 2021) berechnet.

#### 4.5.6 Statistische Auswertung

Für die statistische Auswertung wurden die Programme SAS (Version 9.1) und RStudio (Version 4.1.1) genutzt. Zunächst wurden dabei beide Standorte gemeinsam betrachtet.

Um zu ermitteln, ob die Voraussetzungen für weitere Tests erfüllt waren, wurden die verwendeten Daten auf Varianzhomogenität und Normalverteilung der Residuen geprüft. Es folgte für jede betrachtete Variable eine zweifaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) auf einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$ . Sofern keine signifikante Interaktion zwischen den Faktoren Standort und Düngevariante festgestellt wurde, wurden die Daten der beiden Standorte zusammen ausgewertet. Im Anschluss an die jeweiligen Varianzanalysen wurde der post hoc Test Tukey HSD zum Vergleich der Gruppenmittelwerte auf einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$  angewandt.

Für alle weiteren Schritte der Datenverarbeitung und -visualisierung wurden die Programme RStudio (Version 4.1.1) und Microsoft® Excel 2019, für die Textverarbeitung das Programm Microsoft® Word 2019 verwendet.

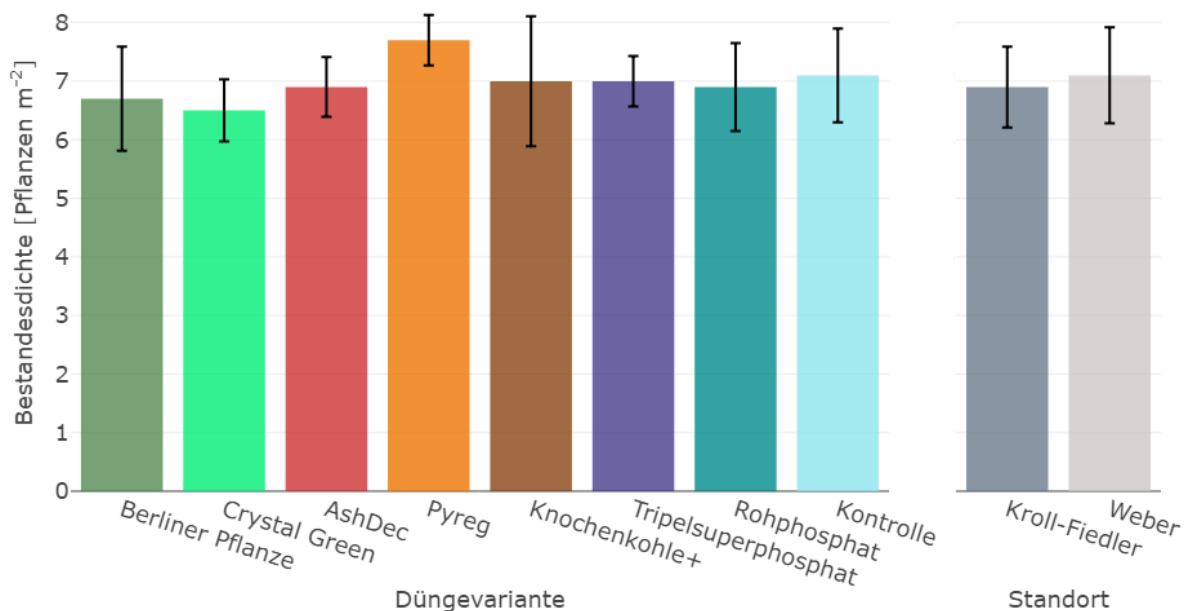
## 5 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Versuchs beschrieben und grafisch dargestellt. Da in keinem Fall eine signifikante Interaktion zwischen den Faktoren Standort und Düngevariante festgestellt wurde, wurden die Daten beider Standorte gemeinsam ausgewertet und zu jeder Variabel neben den Unterschieden zwischen den Düngevarianten die Mittelwerte der Standort verglichen. Insgesamt zeigten sich in fast jedem Fall signifikante Unterschiede zwischen den Standorten, während die meisten der geprüften Düngemittel auf den überwiegenden Teil der untersuchten Variablen keinen signifikanten Einfluss hatten. Die Erträge fielen unabhängig von der Düngung hoch aus.

### 5.1 Wachstumsparameter

#### 5.1.1 Bestandesdichte und BBCH-Stadien

Die angestrebte Bestandesdichte von 9 Pflanzen  $\text{m}^{-2}$  konnte auf dem überwiegenden Teil der Parzellen nicht erreicht bzw. beibehalten werden. Sie schwankte schließlich zwischen 5 und 9 Pflanzen  $\text{m}^{-2}$ , wobei sie auf nur einer Parzelle dem Zielwert entsprach und über alle Düngevarianten hinweg durchschnittlich darunter lag. An beiden Standorten belief sie sich auf knapp 7 Pflanzen  $\text{m}^{-2}$  (Abb. 8).



**Abb. 8: Durchschnittliche Bestandesdichte [Pflanzen  $\text{m}^{-2}$ ] in Abhängigkeit von der Düngevariante und dem Standort am 29.06.2021**

Weder die Düngung noch der Standort hatten einen signifikanten Effekt auf die Bestandesdichte. Ein Blockeffekt wurde ebenfalls nicht festgestellt. Hinzuzufügen ist, dass in Bezug auf die Bestandesdichte keine Normalverteilung der Residuen vorlag.

Die Entwicklung der Pflanzen verlief auf beiden Versuchsflächen ähnlich. Zu keinem Messtermin wurden signifikante Unterschiede zwischen den Standorten oder den Parzellen festgestellt. Im Laufe der Vegetationsperiode wurden vereinzelt Fraßschäden, Maisbeulenbrand-Geschwüre und Fehlentwicklungen festgestellt. Die in Tab. 5 aufgeführten Spannen des Entwicklungsstandes zu den jeweiligen Terminen wurden über beide Bestände hinweg beobachtet.

**Tab. 5: BBCH-Stadien der Pflanzen an den Standorten K und W zu den jeweiligen Boniturterminen** (nach Weber & Bleiholder, 1990)

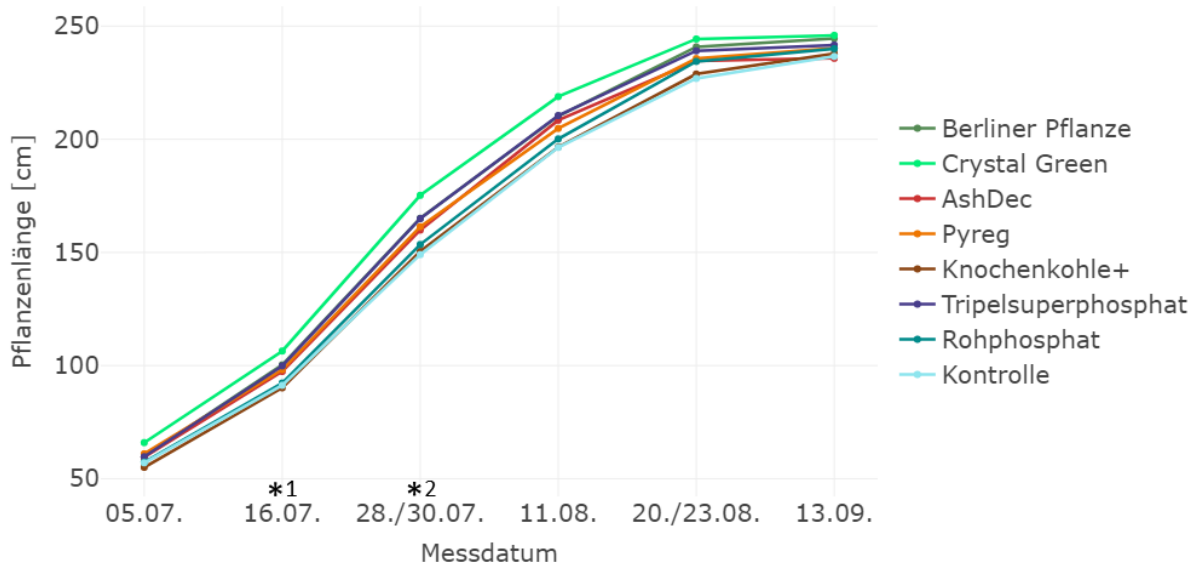
	05.07.	16.07.	28./30.07.	11.08.	20./23.08.	13.09.
BBCH	14-31	16-31	33-53	55-67	65-71	67-79

### 5.1.2 Längenwachstum

Auf beiden Versuchsflächen nahm die durchschnittliche Pflanzenlänge bis zum letzten Messtermin im September zu (Abb. 9). Zwischen den letzten beiden Messterminen war die mittlere Zunahme am niedrigsten und schwankte je nach Düngevariante zwischen 1,2 (AshDec) und 9,7 cm (Kontrolle). Die Spannweite zwischen den Mittelwerten in Abhängigkeit von der Düngung war bei der dritten Längenmessung am höchsten (26,2 cm) und der letzten am geringsten (10,1 cm). Am zweiten Messtermin waren die Pflanzen der Crystal-Green-Parzellen im Durchschnitt signifikant länger als die der Knochenkohle+-Parzellen (106,4 bzw. 90,1 cm). Dies war auch am dritten Messtermin der Fall (175,2 bzw. 150,4 cm), wobei sich hier darüber hinaus ein signifikanter Unterschied zu den Pflanzen der Parzellen ohne P-Düngung zeigte (149 cm) (Abb. 9). Tendenziell erzielte das Struvit Crystal Green zu allen Terminen die höchsten Pflanzenlängen, während die Pflanzen, welche nicht oder mit Knochenkohle+ gedüngt wurden, die geringsten vorwiesen. Nach der dritten Längenmessung gab es in Abhängigkeit von der Düngung jedoch keine signifikanten Unterschiede mehr, so auch nicht zur Haupternte (Tab. 6).

Die Standorte hingegen unterschieden sich in Bezug auf die durchschnittliche Länge der Pflanzen ab dem vierten Messtermin signifikant. Bei der Haupternte waren die Pflanzen am Standort K durchschnittlich 11 cm länger, als am Standort W (240 bzw. 229 cm). Blockeffekte gab es zu keinem Zeitpunkt.





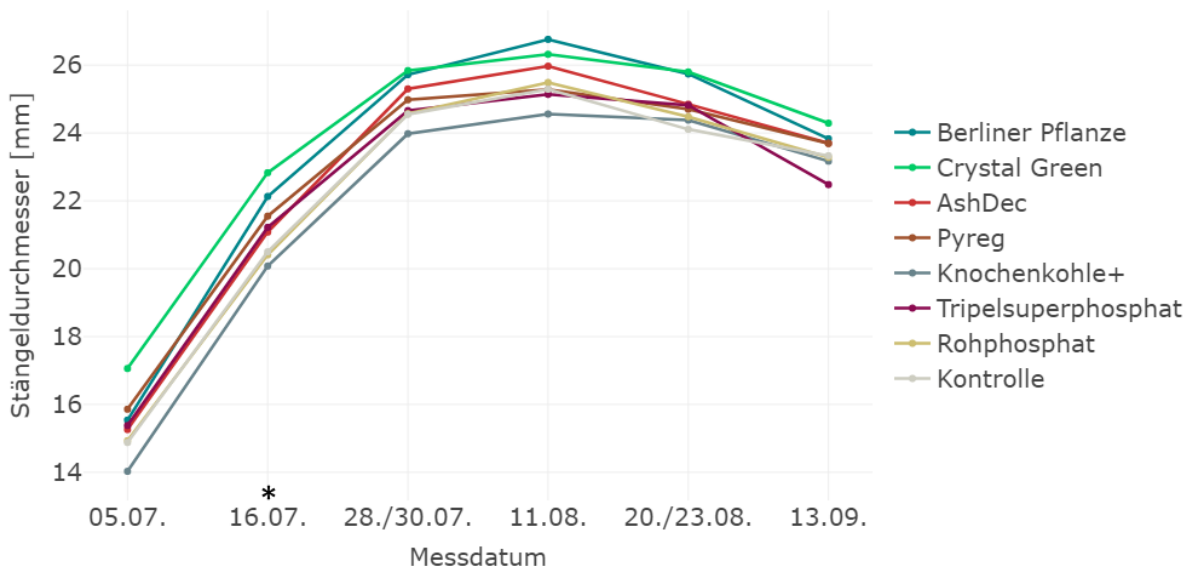
**Abb. 9: Durchschnittliche Pflanzenlänge [cm] an den Standorten K und W zu den jeweiligen Messterminen in Abhängigkeit von der Düngevariante;** \*1 – Die Pflanzen der Crystal-Green-Parzellen waren an diesem Termin durchschnittlich signifikant länger, als jene der Knochenkohle+-Parzellen; \*2 – Die Pflanzen der Crystal-Green-Parzellen waren an diesem Termin durchschnittlich signifikant länger, als jene der Knochenkohle+- und Kontroll-Parzellen

**Tab. 6: Durchschnittliche Pflanzenlänge [cm] in Abhängigkeit von der Düngevariante zur Haupternte am 11. (W) bzw. 17.10.2021 (K)**

	BP	CG	AD	PY	KK	TS	RP	K0
Durchschnittliche Pflanzenlänge [cm]	238,4	239,6	230,8	234,8	232,2	237,7	234,7	228,7

### 5.1.2 Dickenwachstum

Unabhängig von der Düngung nahm der durchschnittliche Stängeldurchmesser der Pflanzen bis zum vierten Messtermin zu, wobei die Zunahme mit jeder Messung geringer wurde (Abb. 10). Ab dem vierten Termin wurde schließlich im gesamten Bestand eine Abnahme bis zur Haupternte festgestellt. Eine Ausnahme bildeten die Pflanzen der Tripelsuperphosphat-Parzellen. Hier wurde eine Zunahme von 0,6 mm zwischen dem letzten Messtermin und der Haupternte festgestellt. Die Spannweite der durchschnittlichen Stängeldurchmesser in Abhängigkeit von der Düngung war zur ersten Messung am höchsten (3 mm) und zur fünften am geringsten (1,7 mm). Crystal Green erzielte, wie auch bei der durchschnittlichen Pflanzenlänge, am zweiten Messtermin signifikant höhere Werte als Knochenkohle+ (22,8 bzw. 20,1 mm). An allen anderen Terminen sowie zur Haupternte wurde kein signifikanter Effekt der Düngung auf den durchschnittlichen Stängeldurchmesser festgestellt (Abb. 10; Tab. 7).



**Abb. 10: Durchschnittlicher Stängeldurchmesser [mm] an den Standorten K und W zu den jeweiligen Messterminen in Abhängigkeit von der Düngevariante; \* - Die Pflanzen der Crystal-Green-Parzellen hatten an diesem Termin durchschnittlich signifikant dickere Stängel**

**Tab. 7: Durchschnittlicher Stängeldurchmesser [mm] in Abhängigkeit von der Düngevariante zur Haupternte am 11. (W) bzw. 17.10.2021 (K)**

	BP	CG	AD	PY	KK	TS	RP	K0
Durchschnittlicher Stängeldurchmesser [mm]	23,9	24	22,8	22	22,2	23	22,2	22,9

Durch den Standort hingegen wurde er zu jeder Messung signifikant beeinflusst. So waren die Stängeldurchmesser am Standort K, den ersten Messtermin ausgenommen, im Durchschnitt stets signifikant dicker. Bei der Haupternte belief sich der Unterschied auf 4,2 mm (24,9 bzw. 20,7 mm) und war damit größer als zwischen allen Düngevarianten innerhalb der Standorte. Darüber hinaus zeigten sich zum ersten, vierten und sechsten Termin Blockeffekte.

### 5.1.3 SPAD-Werte

Zu keiner Messung unterschieden sich die durchschnittlichen SPAD-Werte in Abhängigkeit von der Düngung signifikant. Mit jedem Termin nahmen die Werte im Durchschnitt zu, während die Unterschiede zwischen den Düngevarianten geringer wurden (Tab. 8).

Am ersten Messtermin waren die durchschnittlichen Werte am Standort K signifikant höher als am Standort W (43 bzw. 40,8). Dieses Verhältnis kehrte sich bei den darauffolgenden Messungen jedoch um (Tab. 8). Bei diesen wurden darüber hinaus Blockeffekte festgestellt.



**Tab. 8: Durchschnittliche SPAD-Werte in Abhängigkeit von der Düngevariante und dem Standort zu den jeweiligen Messterminen**

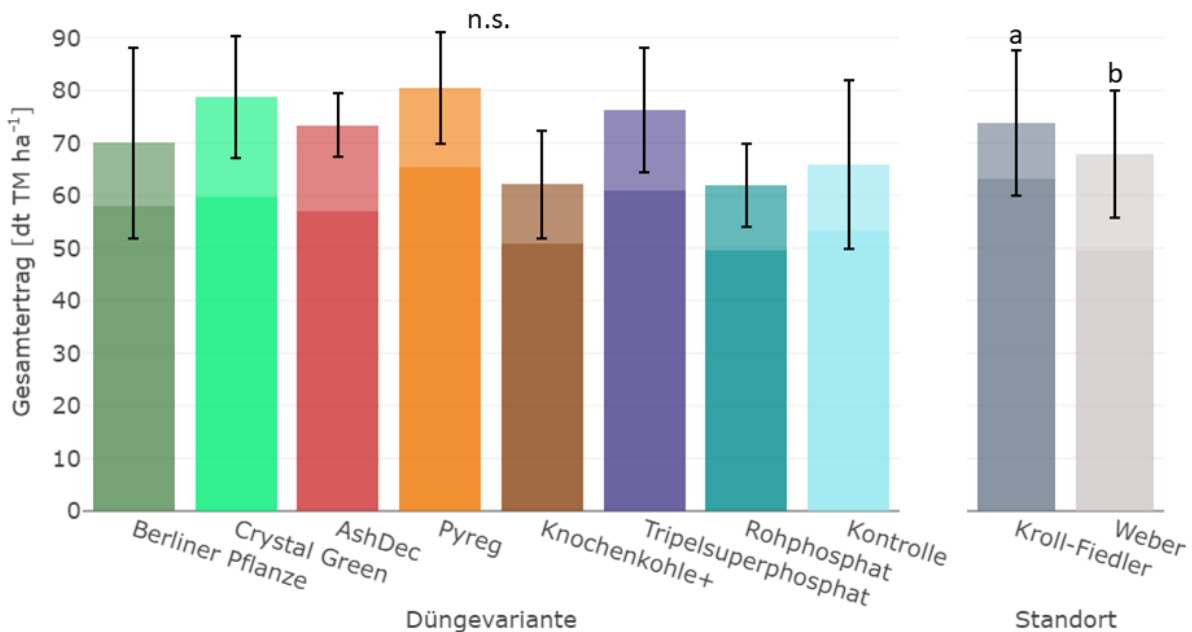
Messtermin	Düngevariante								Standort	
	BP	CG	AD	PY	KK	TS	RP	K0	K	W
16.07.2021	42,5	43,2	41,7	41,6	41,2	42,3	41,5	41,3	43a	40,8b
11.08.2021	43,4	43,1	42	42,7	42,2	42,3	42,4	42,1	42b	43,1a
13.09.2021	44,2	44,4	44	44,6	44,5	43,9	44	44,8	43,3b	45,2a

## 5.2 Ertragsparameter

### 5.2.1 Zwischenernte

Dem Ergebnis der Varianzanalyse zufolge hatte die Düngung einen signifikanten Effekt auf den Gesamtertrag zur Zwischenernte am 24.08.2021. Der anschließende Tukey-Test zeigte jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Düngevarianten (Abb. 11). Die durchschnittlichen Gesamterträge reichten von 62 (Knochenkohle+, Rohphosphat) bis 80 dt TM ha<sup>-1</sup> (Pyreg) und setzten sich zum überwiegenden Teil aus Sprossmasseertrag zusammen.

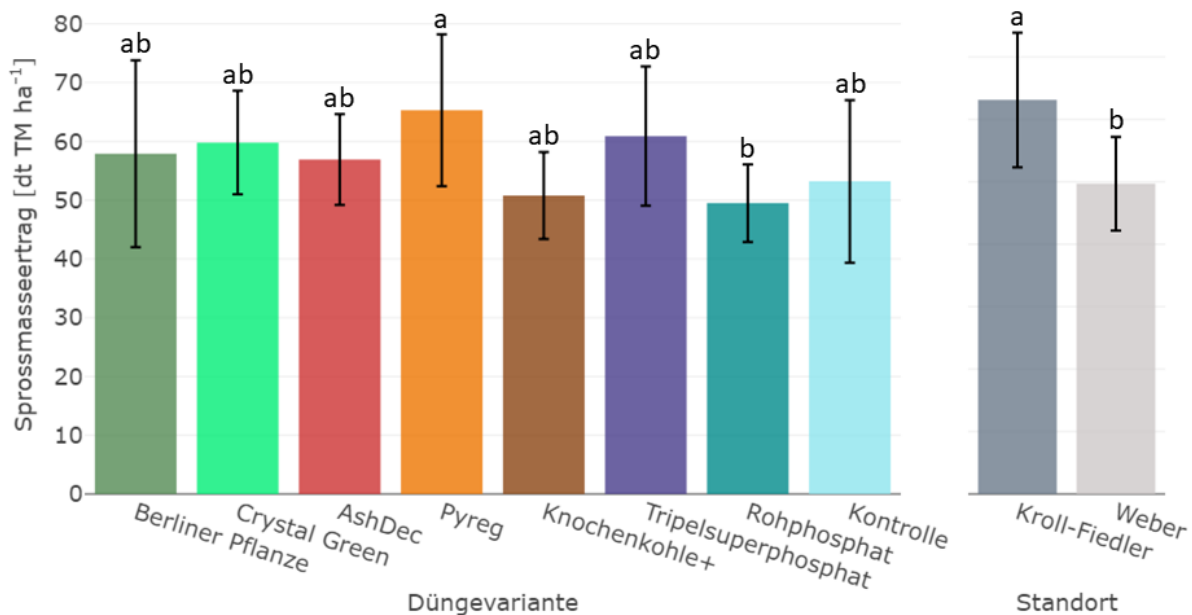
Darüber hinaus waren sie am Standort K signifikant höher als am Standort W (74 bzw. 68 dt TM ha<sup>-1</sup>), wiesen am Standort K jedoch einen geringeren Kolbenanteil vor (Abb. 11). Es wurden keine Blockeffekte festgestellt.



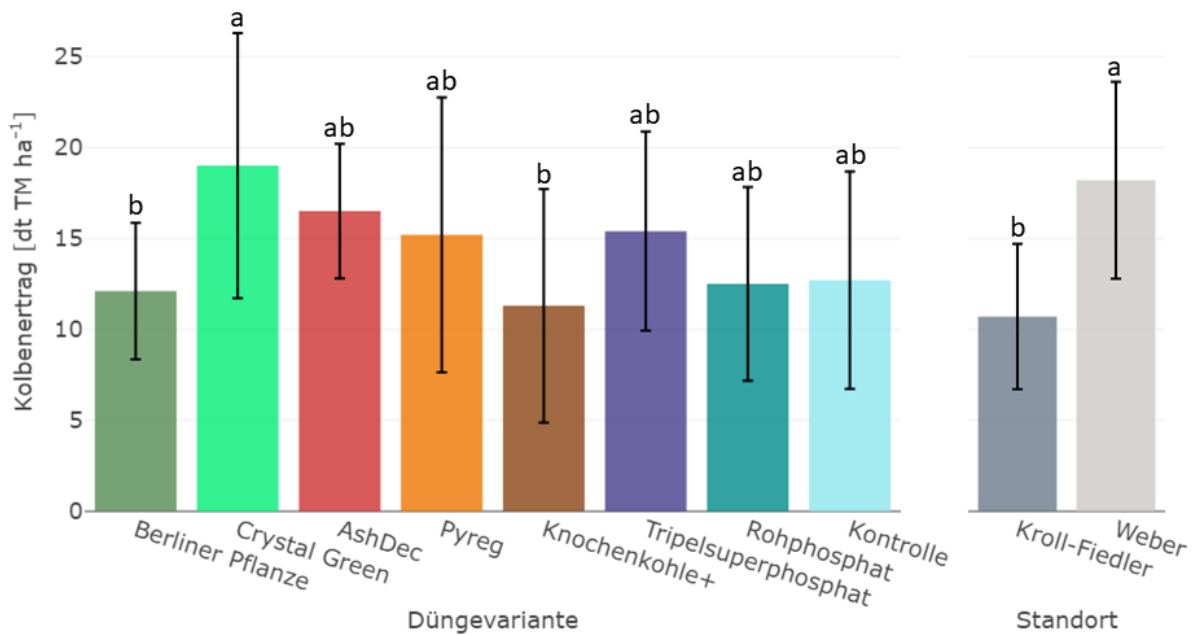
**Abb. 11: Durchschnittlicher Gesamtertrag [dt TM ha<sup>-1</sup>] zur Zwischenernte am 24.08.2021 in Abhängigkeit von der Düngevariante und dem Standort;** Säulen unterteilt in Kolben- (oberer Teil) und Sprossmasseertrag (unterer Teil); Säulen desselben Prüffaktors mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant (Tukey-Test,  $\alpha = 0,05$ )

Bei der separaten Betrachtung von Kolben- und Sprossmasseertrag konnte ebenfalls ein signifikanter Effekt der Düngung festgestellt werden, welcher sich in diesen Fällen auch in den Ergebnissen des Tukey-Tests widerspiegelte (Abb. 12, 13). Pyreg erzielte signifikant höhere durchschnittliche Sprossmasseerträge als Rohphosphat (49,5 bzw. 63,9 dt TM ha<sup>-1</sup>). Anders als bei der Pflanzenlänge und dem Stängeldurchmesser stach Crystal Green an dieser Stelle nicht heraus. Beim Betrachten der Kolben-TM hingegen ergab sich ein anderes Ertragsbild in Abhängigkeit von der Düngung. Hier waren die durchschnittlichen Erträge bei Crystal Green signifikant höher als beim zweiten Struvit Berliner Pflanze oder Knochenkohle+ (19 bzw. 12 und 11 dt TM ha<sup>-1</sup>). Außerdem zeigten sich verglichen mit den Sprossmasse- und Gesamterträgen höhere Standardabweichungen bzw. eine stärkere Streuung der Daten.

Der durchschnittliche Sprossmasseertrag am Standort K überstieg den am Standort W (63 bzw. 50 dt TM ha<sup>-1</sup>). Auf der anderen Seite wurden am Standort W signifikant höhere durchschnittliche Kolbenenerträge erzielt als am Standort K (18 bzw. 11 dt TM ha<sup>-1</sup>). Relativ gesehen war der Unterschied zwischen den Standorten an dieser Stelle am deutlichsten (Abb. 11, 12, 13).



**Abb. 12: Durchschnittlicher Sprossmasseertrag [dt TM ha<sup>-1</sup>] zur Zwischenernte am 24.08.2021 in Abhängigkeit von der Düngevariante und dem Standort; Säulen desselben Prüffaktors mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant (Tukey-Test,  $\alpha = 0,05$ )**

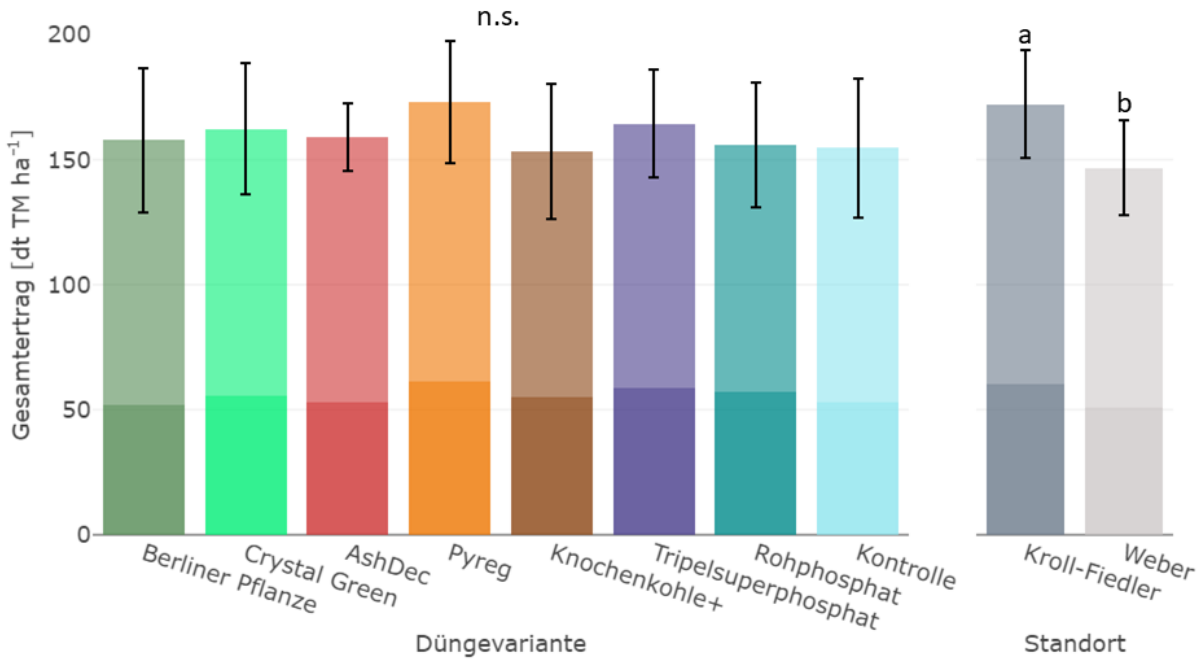


**Abb. 13: Durchschnittlicher Kolbenertrag [dt TM ha<sup>-1</sup>] zur Zwischenernte am 24.08.2021 in Abhängigkeit von der Düngevariante und dem Standort;** Säulen desselben Prüffaktors mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant (Tukey-Test,  $\alpha = 0,05$ )

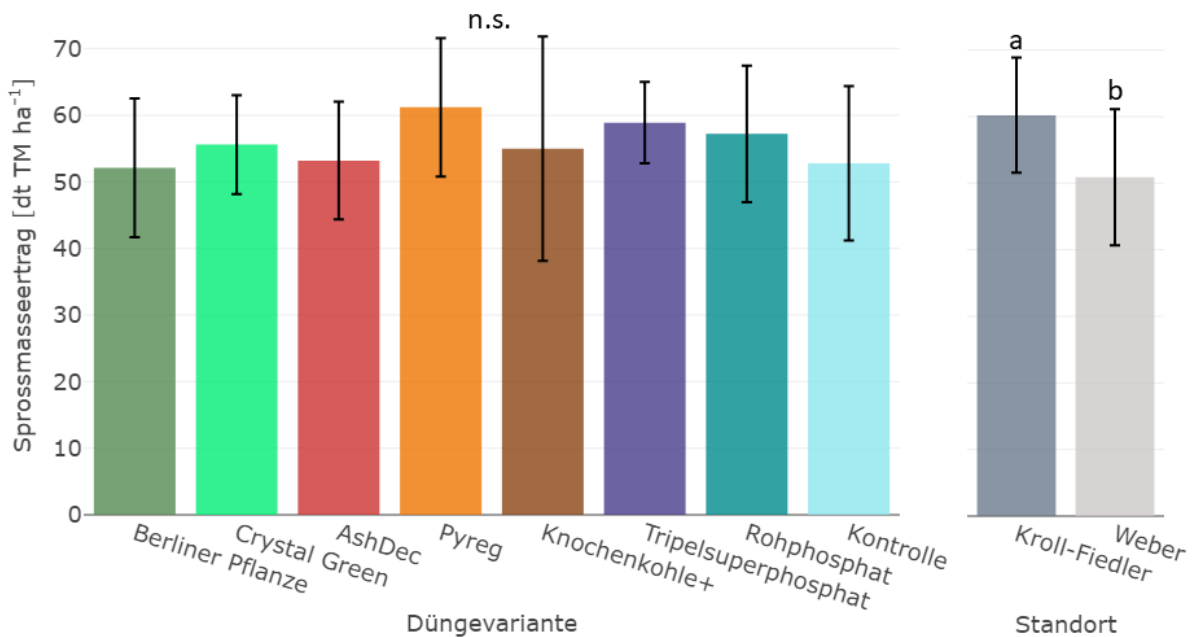
### 5.2.2 Haupternte

Zur Haupternte am 11. (W) bzw. 17.10.2021 (K) konnten signifikante Unterschiede zwischen den Erträgen in Abhängigkeit von der Düngevariante, wie sie zur Zwischenernte verzeichnet wurden, nicht mehr festgestellt werden. Die Düngung hatte weder auf den Gesamt-, noch auf den Sprossmasse- oder Kolbenertrag einen signifikanten Effekt (Abb. 14, 15, 16). Das Ertragsbild ähnelte tendenziell dem der Zwischenernte, insbesondere bei der Kolben-TM glichen sich die Düngevarianten im Vergleich zur dieser jedoch an. So fielen auch die zuvor signifikant unterschiedlichen Kolbenerträge, welche die Struvite Crystal Green und Berliner Pflanze erreichten, nahezu gleich aus (107 bzw. 103 dt TM ha<sup>-1</sup>). Der durchschnittliche Unterschied zwischen den mittleren Erträgen in Abhängigkeit von der Düngevariante war bei der Haupternte geringer als bei der Zwischenernte (6,8 bzw. 8,7 dt TM ha<sup>-1</sup>). Wie auch zur Zwischenernte erzielte Pyreg tendenziell die höchsten durchschnittlichen Gesamterträge (173 dt TM ha<sup>-1</sup>). Die geringsten wurden bei Knochenkohle+ festgestellt (153,5 dt TM ha<sup>-1</sup>).

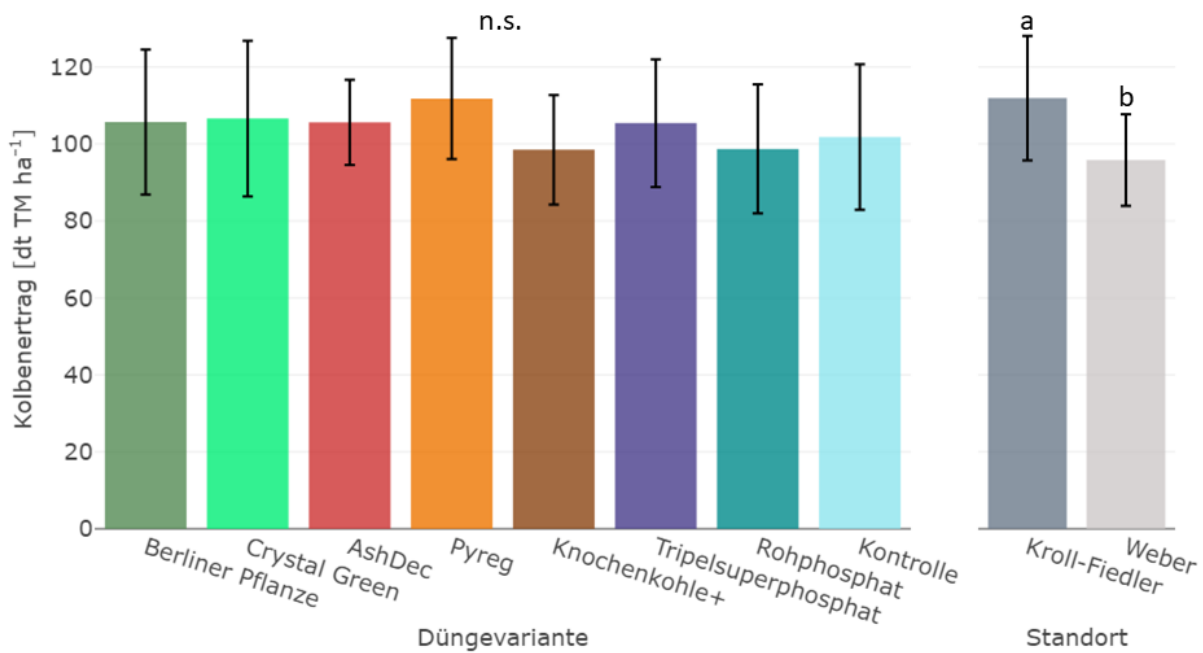
Alle drei Variablen unterschieden sich in Abhängigkeit vom Standort signifikant (Abb. 14, 15, 16). In jedem Fall war der Standort K ertragsstärker. Die Gesamternte betrug dort 172 dt TM ha<sup>-1</sup> im Vergleich zu 146 dt TM ha<sup>-1</sup> am Standort W. Auch der Kolbenertrag fiel, im Gegensatz zum Verhältnis bei der Zwischenernte, auf dem Standort K signifikant höher aus (111 bzw. 95 dt TM ha<sup>-1</sup>). Hier wurde zudem ein Blockeffekt festgestellt.



**Abb. 15: Durchschnittlicher Gesamtertrag [dt TM ha<sup>-1</sup>] zur Haupternte am 11. (W) bzw. 17.10.2021 (K) in Abhängigkeit von der Düngevariante und dem Standort; Säulen unterteilt in Kolben- (oberer Teil) und Sprossmasseertrag (unterer Teil); Säulen desselben Prüffaktors mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant (Tukey-Test,  $\alpha = 0,05$ )**



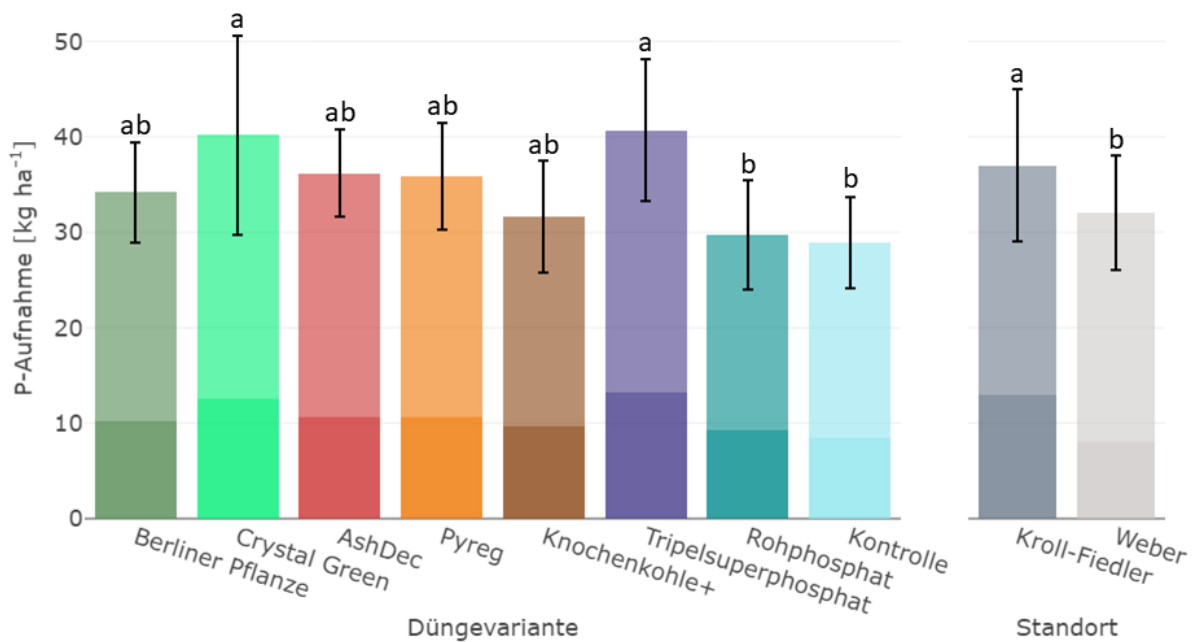
**Abb. 14: Durchschnittlicher Sprossmasseertrag [dt TM ha<sup>-1</sup>] zur Haupternte am 11. (W) bzw. 17.10.2021 (K) in Abhängigkeit von der Düngevariante und dem Standort; Säulen desselben Prüffaktors mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant (Tukey-Test,  $\alpha = 0,05$ )**



**Abb. 16: Durchschnittlicher Kolbenertrag [dt TM ha<sup>-1</sup>] zur Haupternte am 11. (W) bzw. 17.10.2021 (K) in Abhängigkeit von der Düngevariante und dem Standort; Säulen desselben Prüffaktors mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant (Tukey-Test,  $\alpha = 0,05$ )**

Im Gegensatz zum TM-Ertrag wurde die P-Aufnahme der Pflanzen signifikant durch die Düngung beeinflusst (Abb. 17, 18, 19). So hatte neben Tripelsuperphosphat auch Crystal Green als einziges der geprüften Rezyklate bis zur Haupternte signifikant höhere durchschnittliche P-Aufnahmen in der oberirdische Pflanzenbiomasse erzielt als Rohphosphat und die Kontrolle (40,7 und 40,2 bzw. 29,7 und 28,8 kg P ha<sup>-1</sup>). Pyreg hingegen, welches bei beiden Ernten tendenziell die höchsten Erträge erreichte, unterschied sich mit 36,3 kg P ha<sup>-1</sup> von keiner anderen Düngevariante signifikant. Dies traf auch auf das zweite Struvit Berliner Pflanze zu (34 kg P ha<sup>-1</sup>), welches zur Haupternte im Durchschnitt ähnliche Erträge wie Crystal Green erreichte. (Abb. 17).

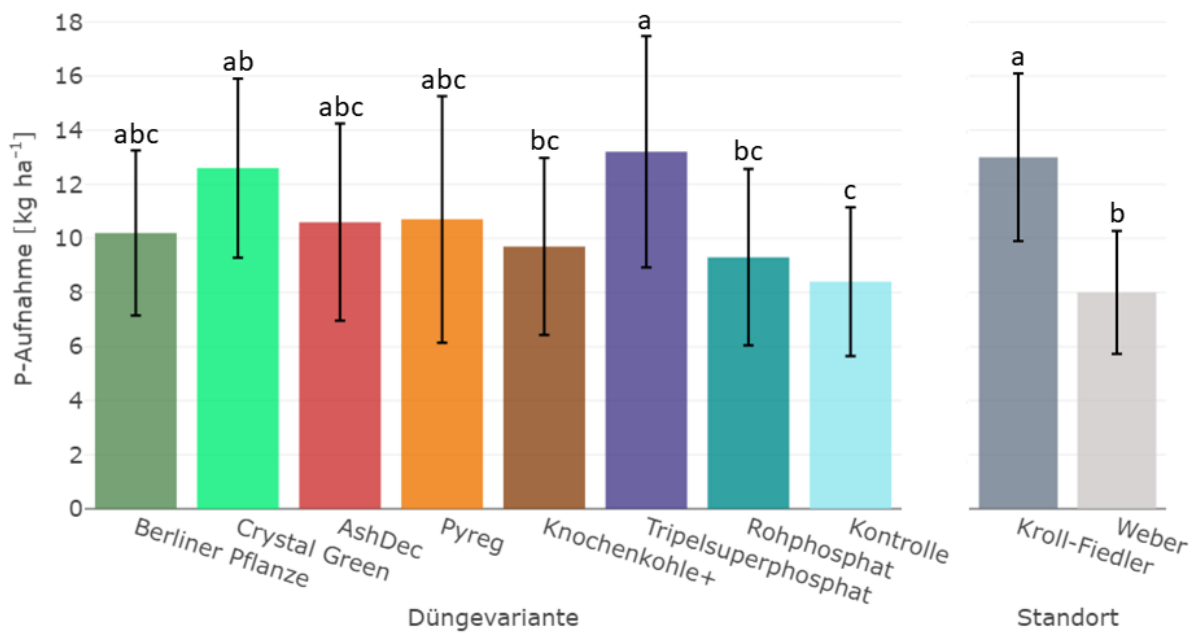
Die gesamten durchschnittlichen P-Aufnahmen waren wie auch die Erträge am Standort K signifikant höher als am Standort W (37 bzw. 32 kg P ha<sup>-1</sup>) (Abb. 17). Es wurde kein Effekt des Blocks festgestellt.



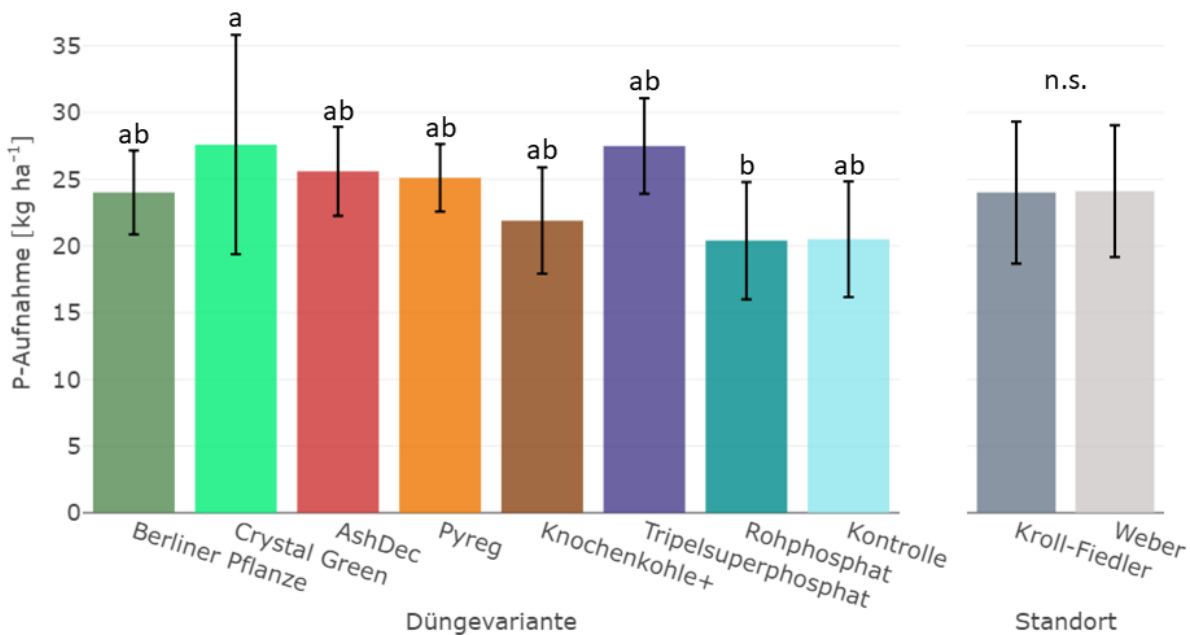
**Abb. 17: Durchschnittliche P-Aufnahme durch die oberirdische Pflanzenbiomasse [kg ha<sup>-1</sup>] zur Haupternte am 11. (W) bzw. 17.10.2021 (K) in Abhängigkeit von der Düngevariante und dem Standort; Säulen unterteilt in Aufnahme durch Kolben (oberer Teil) und Sprossmasse (unterer Teil); Säulen desselben Prüffaktors mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant (Tukey-Test,  $\alpha = 0,05$ )**

Auch bei der separaten Betrachtung der P-Aufnahme durch die Kolben konnte ein signifikanter Unterschied zwischen Crystal Green (27,6 kg P ha<sup>-1</sup>) und der Kontrolle (20,4 kg P ha<sup>-1</sup>), nicht jedoch zwischen letzterer und Tripelsuperphosphat (27,5 kg P ha<sup>-1</sup>) festgestellt werden (Abb. 19). In Bezug auf die Sprossmasse wiederum erzielten sowohl Crystal Green als auch Tripelsuperphosphat (12,6 bzw. 13,2 kg P ha<sup>-1</sup>) signifikant höhere P-Aufnahmen als die Kontrolle (8,4 kg P ha<sup>-1</sup>). Hier unterschied sich Tripelsuperphosphat darüber hinaus signifikant von Knochenkohle+ (9,7 kg P ha<sup>-1</sup>) und Rohphosphat (9,4 kg P ha<sup>-1</sup>). Verglichen mit den anderen beiden Variablen wurde für die P-Aufnahme der Sprossmasse insgesamt höhere Standardabweichungen bzw. eine stärkere Streuung der Daten festgestellt. In Bezug auf Crystal Green war jedoch das Gegenteil der Fall (Abb. 17, 18, 19).

Die durchschnittliche P-Aufnahme der Kolben war an beiden Standorten gleich (24 kg P ha<sup>-1</sup>), wohingegen die der Sprossmassen am Standort K signifikant höher war (13 bzw. 8 kg P ha<sup>-1</sup>) (Abb. 18, 19). Der Unterschied zwischen den Standorten war im Vergleich zu dem überwiegenden Teil der anderen Variablen deutlicher. Ein Blockeffekt wurde nur bezüglich der Kolben-Aufnahme festgestellt.



**Abb. 19:** Durchschnittliche P-Aufnahme durch die Sprossmasse [kg ha<sup>-1</sup>] zur Haupternte am 11. (W) bzw. 17.10.2021 (K) in Abhängigkeit von der Düngevariante und dem Standort; Säulen desselben Prüffaktors mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant (Tukey-Test,  $\alpha = 0,05$ )



**Abb. 18:** Durchschnittliche P-Aufnahme durch die Kolben [kg ha<sup>-1</sup>] zur Haupternte am 11. (W) bzw. 17.10.2021 (K) in Abhängigkeit von der Düngevariante und dem Standort; Säulen desselben Prüffaktors mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant (Tukey-Test,  $\alpha = 0,05$ )

Die Unterschiede zwischen den Düngevarianten in Bezug auf die erzielten durchschnittlichen P-Aufnahmen bei ähnlichen Ertragsniveaus zur Haupternte spiegeln sich in der P-Verwertungseffizienz wider (Tab. 9). Am höchsten war diese bei den Pflanzen der Kontrolle, wo durchschnittlich 538 kg je kg aufgenommenen Ps gebildet wurden. Dies war signifikant

mehr als bei Crystal Green und Tripelsuperphosphat sowie Berliner Pflanze und AshDec. Zudem wiesen mit Crystal Green, Tripelsuperphosphat oder AshDec gedüngte Pflanzen durchschnittlich signifikant niedrigere P-Verwertungseffizienzen als Rohphosphat (530 kg TM kg<sup>-1</sup> P<sub>aufgenommen</sub><sup>-1</sup>) vor. Knochenkohle+ war das einzige Rezyklat, welches im Durchschnitt signifikant höhere P-Verwertungseffizienzen erreichte als Tripelsuperphosphat.

Es wurden weder signifikanten Unterschiede in Abhängigkeit vom Standort, noch Blockeffekte in Bezug auf die P-Verwertungseffizienz festgestellt.

Bei der Betrachtung der durchschnittlichen P-Aufnahmeeffizienz zur Haupternte in Abhängigkeit von der Düngevariante ergab sich in Bezug auf die Unterschiede zwischen diesen ein ähnliches Bild wie bei der P-Aufnahme. Bei Rohphosphat war diese Rohphosphat am geringsten (2,9%). Neben Tripelsuperphosphat (10,9%) war Crystal Green (10,4%) das einzige Rezyklat, welches sich in diesem Punkt signifikant von Rohphosphat unterschied.

Es wurde kein Blockeffekt festgestellt. Jedoch war die durchschnittliche P-Aufnahmeeffizienz am Standort K signifikant und um ein Vielfaches höher, als am Standort W (10,9 bzw. 3,1%).

**Tab. 9: Durchschnittliche P-Verwertungs- und Aufnahmeeffizienz zur Haupternte am 11. (W) bzw. 17.10.2021 (K) in Abhängigkeit von der Düngevariante und dem Standort;** Werte desselben Prüffaktors mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant (Tukey-Test,  $\alpha = 0,05$ )

P-Effizienz	Düngevariante								Standort	
	BP	CG	AD	PY	KK	TS	RP	K0	K	W
Verwertung [kg TM kg <sup>-1</sup> P <sub>aufgenommen</sub> <sup>-1</sup> ]	457bcd	414cd	442cd	480abcd	489abc	409d	530ab	538a	477	463
Aufnahme [%]	6,1ab	10,4a	7,5ab	7,1ab	4,2ab	10,9a	2,9b	-	10,9a	3,1b

Weder die N-Aufnahme noch das C/N-Verhältnis der Kolben bzw. der gesamten oberirdischen Biomasse wurden signifikant durch die Düngung beeinflusst (Tab. 10, 11).

Die N-Aufnahme der Kolben und das C/N-Verhältnis der oberirdischen Sprossmasse waren am Standort K signifikant höher bzw. weiter (112 kg ha<sup>-1</sup> bzw. 44), als am Standort W (93 kg ha<sup>-1</sup> bzw. 35). Zudem wurde ein Blockeffekt auf die N-Aufnahme der Kolben ermittelt.

Die Düngung hatte einen signifikanten Effekt auf das N/P-Verhältnis der Kolben sowie der gesamten oberirdischen Sprossmasse (Tab. 10, 11). Bezüglich der Unterschiede zwischen den Düngemitteln ergab sich hier ein ähnliches, jedoch deutlicheres Bild als bei der P-Aufnahme und der P-Verwertungseffizienz. Die Pflanzen, welche mit Crystal Green oder Tripelsuperphosphat gedüngt wurden, wiesen in beiden Fällen durchschnittlich die engsten N/P-Verhältnisse vor (3,9 und 3,6 bzw. 4,7 und 4,6). Sie unterschieden sich diesbezüglich signifikant von den nicht oder mit Rohphosphat gedüngten Pflanzen (5,3 und 4,9 bzw. 6,6 und



6,4). Bis auf Knochenkohle+ erreichten auch alle anderen Rezyklate in beiden Fällen ein signifikant engeres NP-Verhältnis als die Kontrolle.

Die beiden Standorte unterschieden sich jeweils signifikant, wobei am Standort K die engeren durchschnittlichen N/P-Verhältnisse festgestellt wurden (3,9 und 4,8 bzw. 5,1 und 6). Blockeffekte wurden hier in keinem Fall ermittelt.

**Tab. 10: Durchschnittliche N-Aufnahmen, C/N- und N/P- Verhältnisse der Kolben zur Haupternte am 11. (W) bzw. 17.10.2021 (K) in Abhängigkeit von der Düngevariante und dem Standort; Werte desselben Prüffaktors mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant (Tukey-Test,  $\alpha = 0,05$ )**

	Düngevariante								Standort	
	BP	CG	AD	PY	KK	TS	RP	K0	K	W
N-Aufnahme [kg ha <sup>-1</sup> ]	104	106	104	107	98	98	98	106	112a	93b
C/N-Verhältnis	46	47	47	47	46	50	46	45	46	48
N/P-Verhältnis	4,4bcd	3,9cd	4,1bcd	4,3bcd	4,5abc	3,6d	4,9ab	5,3a	3,9b	4,8a

**Tab. 11: Durchschnittliche N-Aufnahmen, C/N- und N/P- Verhältnisse der gesamten oberirdischen Biomasse zur Haupternte am 11. (W) bzw. 17.10.2021 (K) in Abhängigkeit von der Düngevariante und dem Standort; Werte desselben Prüffaktors mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant (Tukey-Test,  $\alpha = 0,05$ )**

	Düngevariante								Standort	
	BP	CG	AD	PY	KK	TS	RP	K0	K	W
N-Aufnahme [kg ha <sup>-1</sup> ]	185	184	196	189	179	181	185	189	182	192
C/N-Verhältnis	39	41	38	41	39	42	39	38	44a	35b
N/P-Verhältnis	5,5bc	4,7c	5,5bc	5,4bc	5,8ab	4,6c	6,4ab	6,6a	5,1b	6a

## 6 Diskussion

Die Ergebnisse des hier behandelten Versuchs weisen darauf hin, dass die P-Aufnahme durch Maispflanzen durch den Einsatz bestimmter Klärschlamm-Rezyklate unter den Bedingungen des ökologischen Landbaus erhöht werden, und dieser diesbezüglich einer Tripelsuperphosphat-Düngung gleichen sowie eine Rohphosphat-Düngung übertreffen kann. Auf der anderen Seite wurde gezeigt, dass eine erhöhte P-Aufnahme nicht zwangsläufig mit einer Ertragssteigerung einhergeht und eine Abnahme der pflanzlichen P-Verwertungseffizienz zufolge haben kann.

Im Folgenden werden diese Ergebnisse diskutiert und in Bezug auf den aktuellen Forschungsstand des zugrunde liegenden Themenfelds eingeordnet. Zunächst werden mögliche Ursachen für die hohen Erträge sowie die diesbezüglichen Unterschiede zwischen den Standorten thematisiert. Im Anschluss werden am Beispiel von Tripelsuper- und Rohphosphat mögliche Gründe für die fehlende Ertragswirksamkeit der geprüften Düngeprodukte trotz teilweise vorhandener Effekte auf die pflanzliche P-Aufnahme evaluiert. Im letzten Abschnitt werden die Effekte der verwendeten P-Recycling-Dünger im Vergleich mit den Positiv- und Negativkontrollen diskutiert.

### 6.1 Hohe Erträge an beiden Standorten

An beiden Standorten konnten für organisch produzierten Silomais vergleichsweise hohe Erträge zur Haupternte von 172 (K) bzw. 146 (W) dt TM ha<sup>-1</sup> erzielt werden. Dies entsprach etwa 96 bzw. 81% des NRW-weiten Durchschnitts im Jahre 2021 von 180 dt TM ha<sup>-1</sup> bei einer Annahme von 35% TM (STATISTISCHES BUNDESAMT, 2022). Betrachtet man diesen angesichts des knapp 2%igen Anteils von Öko-Mais an der gesamten deutschen Maisfläche (STROTMANN, 2020) als Mittelwert der konventionell erwirtschafteten Maiserträge, so ergab sich für den Standort W eine Ertragslücke, welche in der Literatur beim Vergleich organischer und konventioneller Silomaiserträge häufig zu finden ist (SEUFERT et al., 2012). Am Standort K war diese hingegen deutlich kleiner. Angesichts der hohen Erträge, auch auf den Kontroll- und Rohphosphat-Parzellen, konnte gezeigt werden, dass mit Mitteln des Ökolandbaus theoretisch Silomaiserträge auf dem Niveau konventioneller Produktionen erreicht werden können. Einige der Bewirtschaftungsmaßnahmen wie die hohe Stickstoffdüngung und die händische Unkrautbekämpfung, welche zum hohen Ertragsniveau beitrugen, sind in der Praxis jedoch nicht wirtschaftlich.

Die Versuchsböden waren mit 42 (K) und 47 (W) Bodenpunkten von mittlerer Ertragsfähigkeit. Die Bestandesdichten waren in Folge des möglicherweise durch Vogelfraß (LWK NRW, 2021b) oder Fehler bei der Aussaat bedingt geringen Feldaufgangs sowie des Entfernens einzelner Pflanzen mit jeweils 7 Pflanzen m<sup>-2</sup> unter dem Optimum für frühreifende

Silomaisorten im Ökolandbau von 9-10 Pflanzen  $m^{-2}$  (BECKMANN und KOLBE, 2002; BMEL, 2021). Es ist davon auszugehen, dass die Erträge bei optimaler Bestandesdichte höher gewesen wären (AMBROŻY-DERĘGOWSKA und SZULC, 2021). Auf der anderen Seite waren die Wachstumsbedingungen während des Versuchs vorteilhaft, was ein Grund für die hohen Erträge gewesen sein könnte. Die optimalen Temperaturen für Mais betragen während der Vegetationsperiode weit über 20 °C (SÁNCHEZ et al., 2013). An den Standorten lagen diese im Durchschnitt darunter, jedoch überstiegen sie in den Monaten Juni bis September die dortigen Langzeitmittel sowie die Ansprüche frühreifender Silomaisorten an die mittlere Tagestemperatur von 14 bis 15 °C (DMK, 2022). Die Niederschlagsmengen im Juli und August erfüllten die hohen Wasseransprüche der Maispflanzen vom Rispschieben bis ca. zwei Wochen nach der Blüte von 100-150 mm. Eine gute Wasserversorgung während der Blüte ist für die Kolbenausbildung sowie eine ausreichende Einkörnung, und damit die Ertragsbildung ausschlaggebend (EDER und BRANDHUBER, 2014). Hoher Unkrautdruck im Jugendstadium der Maispflanzen kann, insbesondere bei geringer Bestandesdichte wie in diesem Versuch, zu Ertragseinbußen führen (BECKMANN und KOLBE, 2002; MARÍN und WEINER, 2014). Dieser wurde auf den Versuchsflächen jedoch durch maschinelles und für die Praxis unüblich gründliches, händisches Hacken, auch in den Reihen, während der Blattentwicklung niedrig gehalten.

Bei günstigen Temperaturen und Niederschlägen wie jenen an den Standorten während des Versuchs sind die Ansprüche von Mais an Bodenart und -typ gering (BECKMANN und KOLBE, 2002). Im Gegensatz dazu hat er hohe Nährstoffansprüche (EDER und BRANDHUBER, 2014), was im Falle des hier betrachteten Versuchs ein entscheidender Aspekt in Bezug auf die hohen Erträge sowie die diesbezüglich signifikanten Unterschiede zwischen den Standorten gewesen sein könnte.

Beide Standorte wiesen für ackerbaulich genutzte Böden durchschnittliche Humus- und Gesamtstickstoff-Gehalte sowie C/N-Verhältnisse vor (WESSOLEK et al., 2008). Die Stickstoffversorgung fiel jedoch sehr hoch aus. Zusätzlich zu dem Reststickstoff aus den organischen Düngungen des Vorjahres sowie der Nachlieferung aus der Klee gras-Vorfrucht wurden knapp 100 kg Stickstoff in Form von Haarmehlpellets ausgebracht, um die Stickstoffdüngung durch die Struvite auf den anderen Parzellen auszugleichen. Der Stickstoff aus den Pellets ist bei einer Freisetzungsrate von ca. 75% im Jahr der Ausbringung im Vergleich zu dem aus Wirtschaftsdüngern in höherem Maße pflanzenverfügbar, der Einsatz in der Praxis jedoch meist unwirtschaftlich (MÖLLER und SCHULTHEIB, 2014). Die Erträge im ökologischen Maisanbau hängen unter anderem im hohen Maße von der Stickstoffdüngung ab (ZADA et al., 2000), welche im organischen Landbau allgemein aufgrund der eingeschränkten Verfügbarkeit und der Regulierung des Einsatzes entsprechender Düngemittel oftmals einen ertragslimitierenden Faktor darstellt (KÖPKE, 1995; BERRY et al., 2002). In dem hier

behandelten Versuch hingegen waren die Stickstoffaufnahmen durch die Maispflanzen in Folge der Stickstoffgaben an beiden Standorten hoch (182 bzw. 192 kg ha<sup>-1</sup> an den Standorten K und W), was ein wichtiger Grund für die vergleichsweise hohen Erträge gewesen sein könnte.

Nach VDLUFA-Kategorisierung waren die Standorte W und K in anzustrebendem (Gehaltsklasse C) bzw. hohem Maße (Gehaltsklasse D) mit Magnesium versorgt (LWK NRW, 2015a). Die Kaliumversorgung hingegen war am Standort W sehr niedrig (Gehaltsklasse A), am Standort K jedoch ebenfalls in anzustrebendem Zustand (Gehaltsklasse C) (LWK NRW, 2015a). Öko-Silomais hat bei einer Ertragserwartung von 400 dt/ha mit 28% TM einen vergleichsweise hohen Kaliumbedarf von etwa 160-230 kg ha<sup>-1</sup> (MÜCKE, 2022). Eine geringe Kalium-Düngung bzw. -Aufnahme der Pflanzen kann zu Ertragseinbußen führen (MALLARINO et al., 1999; EBELHAR und VARSA, 2008). Auch, weil im Versuchsjahr an keinem der Standorte Wirtschafts- oder Kaliumdünger ausgebracht wurden, könnten die höheren Kaliumgehalte am Standort K ein Grund für die signifikant höheren Erträge im Vergleich zum Standort W gewesen sein. Kalium wird unter anderem für die Stärkeproduktion im Korn benötigt (EDER und BRANDHUBER, 2014), was erklären könnte, warum der Kolbenertrag am Standort K zur Zwischenenernte im Gegensatz zur Haupternte noch nicht signifikant höher war, als am Standort W.

Die P-Aufnahme der Pflanzen war, genau wie die Erträge, am Standort W signifikant niedriger, als am Standort K. In Bezug auf die P-Verwertungseffizienz hingegen unterschieden sich diese nicht. Darüber hinaus war die P-Aufnahmeeffizienz am Standort W signifikant und um ein Vielfaches geringer, als am Standort K. Diese Beobachtungen könnten darauf hinweisen, dass der Ertragsunterschied zwischen den Standorten unter anderem auf die Unterschiede bezüglich der P-Aufnahme der Pflanzen zurückzuführen ist. Der pH-Wert der Bodenlösung am Standort W belief sich auf 5,3, der am Standort K auf 6,3. Das Potenzial zur P-Fixierung durch Aluminium und Eisen nimmt ab einem pH-Wert von 6 bis zu einem pH-Wert von ca. 5,5 stark zu und könnte dadurch am Standort W deutlich höher gewesen sein (BARROW, 2016). Dies könnte auch die Unterschiede bezüglich der P-Aufnahmeeffizienz erklären, da der aus den Düngemitteln freigesetzte P am Standort W so zu einem größeren Anteil fixiert worden sein könnte. Während der Jugendentwicklung hat Mais den höchsten P-Bedarf. Jedoch ist das Aneignungsvermögen der Wurzel in diesem Stadium sehr gering, weshalb zu dieser Zeit eine ausreichende P-Verfügbarkeit entscheidend und Böden mit pH-Werten unter 5,5 ungünstig sind (EDER und BRANDHUBER, 2014). Für Standorte mit sauren Böden konnte gezeigt werden, dass eine Erhöhung des pH-Werts durch Kalkung zu einer Zunahme des pflanzenverfügbaren Ps und der Maiserträge führt (KOVACEVIC et al., 2006; ANDRIC et al., 2012).

Darüber hinaus hat der pH-Wert des Bodens einen Einfluss auf weitere, in diesem Versuch nicht erfasste, jedoch ackerbaulich relevante Aspekte wie die Pflanzenverfügbarkeit anderer

Makro- und Mikronährstoffe, das Bodenleben sowie verschiedene Prozesse in der Rhizosphäre (AMELUNG et al., 2018; NEINA, 2019). Auf schluffigen Lehmen mit > 4% Humus wie denen der Versuchsstandorte gilt ein pH-Wert von 6,8 als erstrebenswert (LWK NRW, 2015b). Somit könnte der niedrigere pH-Wert am Standort W aus unterschiedlichen Gründen eine ertragsmindernde Wirkung gehabt haben.

Offen bleibt, inwiefern sich weitere Standorteigenschaften, welche im Rahmen des Versuchs nicht betrachtet wurden, auf die Ertragsbildung ausgewirkt haben könnten.

## **6.2 Fehlende Ertragswirkung der geprüften Düngemittel**

In diesem Versuch konnte für keines der geprüften Düngemittel eine signifikante, ertragssteigernde Wirkung auf den Silomais festgestellt werden. Zwischenzeitliche Unterschiede in Bezug auf die Pflanzenlänge und Stängeldurchmesser waren zur Haupternte nicht mehr vorhanden. Dies schloss auch die bereits vielerorts eingesetzten P-Dünger Tripelsuper- und Rohphosphat ein, deren Wirksamkeit durch zahlreiche Studien belegt ist. Im Falle des Tripelsuperphosphats war dies aufgrund seiner guten, weitestgehend von Standortfaktoren unabhängigen Pflanzenverfügbarkeit unerwartet, während von einem eingeschränkten Effekt des Rohphosphats ausgegangen werden musste.

Die Wirksamkeit von Rohphosphat auf P-armen Böden hängt unter anderem vom pH-Wert der Bodenlösung sowie dem P-Aneignungsvermögen der Pflanzenart ab (KUMARI und PHOGAT, 2008), wobei letzteres wie bereits angesprochen bei Mais in der Hautbedarfsphase gering ist. Die Löslichkeit von Rohphosphat ist bei einem pH-Wert von über 6 eingeschränkt und unvorhersehbar und nimmt mit sinkendem pH-Wert zu (RAJAN et al., 1991; PAULSEN et al., 2016). Die Pflanzenverfügbarkeit von P kann in unterschiedlichen Bereichen niedriger pH-Werte in Folge erhöhter P-Adsorption bzw. -Fixierung wiederum sinken (BOLAN und HEDLEY, 1990; BARROW, 2016). Deshalb kann unter P-Mangel insbesondere bei pH-Werten zwischen 4 und 5 eine signifikante Ertragssteigerung von Mais durch erhöhte P-Aufnahmen in Folge der Applikation von Rohphosphat erreicht werden (z.B. LUKIWATI, 2002; KASNO und SUTRIADI, 2012; ADEMBA et al., 2015). Für Böden mit pH-Werten wie denen der Standorte des hier behandelten Versuchs (5,3 bzw. 6,3) konnte in anderen Studien gezeigt werden, dass derartige Effekte bei der Ausbringung reinen Rohphosphats, zumindest im Jahr der Applikation, aufgrund der geringeren Löslichkeit in vielen Fällen ausbleiben (z.B. AKANDE et al., 1998; AKANDE et al., 2010; YAGI et al., 2020). Dies stimmt mit den Ergebnissen dieses Versuchs überein und könnte darauf hinweisen, dass der fehlende Effekt der Rohphosphatdüngung auf den Ertrag und die P-Aufnahme auf die pH-Werte der Böden zurückzuführen ist. Da jedoch auch keine Ertragssteigerung durch Tripelsuperphosphat erreicht werden konnte, sind weitere Gründe denkbar.

Der in Tripelsuperphosphat enthaltene P ist zu etwa 93% wasserlöslich. Damit ist er gut pflanzenverfügbar, kann aber in Abhängigkeit von den Bodeneigenschaften auch schnell festgelegt werden (WENDLAND et al., 2014). Insbesondere auf Böden mit P-Mangel konnte in anderen Versuchen gezeigt werden, dass eine Düngung mit Tripelsuperphosphat die P-Aufnahme durch Mais erhöhen und ertragssteigernd wirken kann (z.B. CORRÊA et al., 2005; MANZAR-UL-ALAM et al., 2005; AMYANPOORI et al., 2015). Während eine solche Erhöhung der P-Aufnahme wie erwartet auch in diesem Versuch bestätigt werden konnte, blieb eine entsprechende Ertragswirkung aus. Die P-Aufnahmeeffizienz, also der Anteil an der gedüngten Menge P, der durch die Pflanzen aufgenommen wurde, betrug in Bezug auf Tripelsuperphosphat am Standort K 18% und am Standort W 4%. Vergleicht man diese mit den durchschnittlichen Werten für Mais (ca. 8%) und für anorganische P-Dünger allgemein (ca. 11%), so war die P-Aufnahmeeffizienz am Standort K über- und am Standort W unterdurchschnittlich (YU et al., 2021). Der Grund für den Standortunterschied könnte auch an dieser Stelle das höhere Potenzial zur P-Fixierung am Standort W gewesen sein (Kapitel 6.1). Die Tripelsuperphosphat-Düngung hatte jedoch auch bei der getrennten statistischen Betrachtung des Standortes K keinen Effekt auf den Maisertrag (Anhang-Tab. 1).

Die in diesem Versuch beobachtete Diskrepanz zwischen den Effekten auf die P-Aufnahme und den Ertrag verdeutlicht, dass die Ertragswirksamkeit einer P-Düngung neben dem Effekt auf die P-Aufnahme auch von der P-Verwertungseffizienz innerhalb der Pflanze abhängt. Dies ist in Übereinstimmung mit BAYUELO-JIMÉNEZ und OCHOA-CADAVID (2014) sowie WANG et al. (2010), welche außerdem beschrieben, dass die relative Bedeutung der P-Aufnahme durch die Pflanze auf der einen sowie deren Fähigkeit, P effizient zu verwerten auf der anderen Seite für die P-Effizienz je nach Art, Sorte und P-Status des Bodens variiert. In diesem Versuch wurden bei der P-Verwertungseffizienz im Vergleich mit den restlichen Variablen die meisten und deutlichsten signifikanten Unterschiede zwischen den Düngevarianten festgestellt. Diese war bei den Pflanzen der Kontrolle am höchsten ( $538 \text{ kg TM kg}^{-1} \text{ P}_{\text{aufgenommen}}$ ) und nahm mit zunehmender Menge aufgenommenen Ps ab. So wiesen die mit Tripelsuperphosphat gedüngten Pflanzen, welche am meisten P aufnahmen, die niedrigsten P-Verwertungseffizienzen vor ( $409 \text{ kg TM kg}^{-1} \text{ P}_{\text{aufgenommen}}$ ), wobei sich auch drei der geprüften Rezyklate (Berliner Pflanze, Crystal Green und AshDec) signifikant von der Kontrolle unterschieden. Eine solche Abnahme der P-Verwertungseffizienz mit steigender P-Düngung bzw. Aufnahme wurde in anderen Studien bei verschiedenen Arten wie Sojabohne (*Glycine max*; WIN et al., 2010), Weizen (*Triticum aestivum*; RASUL, 2016) und auch Mais (BAYUELO-JIMÉNEZ und OCHOA-CADAVID, 2014) festgestellt. Im Gegensatz zu diesen nahm die P-Verwertungseffizienz in diesem Versuch jedoch offenbar in einem Verhältnis zur P-Aufnahme ab, welches zufolge hatte, dass durch die zusätzliche P-Aufnahme kein signifikanter Ertragszuwachs zustande kam.

Eine mögliche Erklärung für diese Beobachtung könnte sein, dass die Erträge an den Standorten durch einen anderen Faktor stärker limitiert waren, als durch die P-Versorgung. Zu keinem Zeitpunkt wurden während des Versuchs in sichtbare P-Mangelsymptome wie z.B. eine eindeutige Lilafärbung der Blätter an den Pflanzen der Kontrolle oder einer der behandelten Parzellen festgestellt. Des Weiteren wurden auch auf den ungedüngten Parzellen hohe Erträge erzielt, die sich nicht signifikant von denen der anderen Parzellen unterschieden. Dies könnte darauf hindeuten, dass die P-Versorgung der Pflanzen durch den Boden an den Standorten besser war, als vor dem Versuch angenommen. Pflanzen können die P-Aufnahme durch die Wurzel nur schlecht herunterregulieren (LAMBERS, 2022), weshalb der zusätzliche P aus der Düngung trotz möglicherweise guter P-Versorgung durch den Boden aufgenommen worden sein könnte. Wenn dieser aufgrund eines anderen ertragslimitierenden Faktors jedoch nur begrenzt bei der Bildung zusätzlicher Biomasse verwertet werden konnte, könnte dadurch die P-Verwertungseffizienz deutlich abgenommen haben und Effekte der P-Düngung auf den Ertrag gering gewesen sein. Dies würde mit anderen Versuchen übereinstimmen, in denen gezeigt wurde, dass eine P-Düngung von Maisbeständen auf Böden mit hohen Gehalten an (leicht) pflanzenverfügbarem P die P-Aufnahme der Pflanzen ohne signifikante Ertragseffekte erhöhen kann (KETTERINGS et al., 2005; ROTH et al., 2006).

Zwar wurden die Böden der Versuchsstandorte im Vorfeld aufgrund ihrer Gehalte an leicht pflanzenverfügbarem P und der damit verbundenen Einordnung in die VDLUFA P-Gehaltsklassen B (K) und A (W) als P-arm eingestuft, jedoch konnte KOLBE (2019) zeigen, dass Ökoflächen bei dieser Kategorisierung unter Berücksichtigung der zu erwartenden, im Vergleich zum konventionellen Landbau geringeren Erträge in ihren P-Status oft unterschätzt werden. Daher wird als unterer Grenzwert der optimalen P-Versorgung ein  $\text{P}_2\text{O}_5$ -Gehalt von  $5,7 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1} \text{ Boden}^{-1}$  genannt, welcher dem des Standortes K entsprach, jedoch um ein Vielfaches höher als der des Standortes W war ( $2,1 \text{ mg } \text{P}_2\text{O}_5 \text{ } 100 \text{ g}^{-1} \text{ Boden}^{-1}$ ). Auch dort war die P-Versorgung nach dieser Beurteilung jedoch besser bzw. näher am Optimum. Letztlich kann auch eine zu niedrige oder zu hohe Einschätzung dieser in Folge von Fehlern und Ungenauigkeiten bei der Bodenprobenahme bzw. der P-Gehaltsbestimmung nach der CAL-Methode nicht ausgeschlossen werden. Ein Faktor, der zu einer guten P-Versorgung an den Standorten beigetragen haben könnte, war der hohe Niederschlag. Die Diffusion von P im Boden zur P-Verarmungszone der Rhizosphäre ist in hohem Maße vom Wassergehalt des Bodens abhängig (LAMBERS et al., 2006). So konnte in einem Versuch festgestellt werden, dass die P-Aufnahme durch Maiswurzeln mit abnehmendem Wassergehalt des Bodens bzw. zunehmender Saugspannung des Wassers abnimmt (OLSEN et al., 1961).

Einen weiteren, wichtigen Aspekt, der diesen Versuch von vielen anderen P-Düngeversuchen unterscheidet und einen Einfluss auf die P-Versorgung an den Standorten gehabt haben könnte, stellten die hohen Stickstoffgaben dar. Durchschnittlich wurden  $186 \text{ kg ha}^{-1}$  Stickstoff durch

die Pflanzen aufgenommen, wobei die Unterschiede zwischen den Düngevarianten nicht signifikant waren ( $179\text{-}196\text{ kg ha}^{-1}$ ). Die Interaktionen zwischen Stickstoff und P in Pflanzen sind vielseitig und Gegenstand aktueller Forschung (KROUK und KIBA, 2020). Eine hohe Stickstoffversorgung kann sich u.a. positiv auf die Fähigkeit der Pflanzen auswirken, die P-Verfügbarkeit und -Aufnahme durch veränderte Wurzelstrukturen und verstärktes Wurzelwachstum sowie vermehrte Exkretion von Wurzelexsudaten und Bildung von Mykorrhiza zu erhöhen (Grunes, 1959; Raven, 2015). In verschiedenen Feld- und Gefäßversuchen konnte festgestellt werden, dass die P-Aufnahme und/oder die Erträge in Folge erhöhter Stickstoffdüngung bei gleichbleibender P-Versorgung zunehmen können. Dies wurde unter anderem für Hafer (*Avena sativa*; MA et al., 2017), Saat-Lein (*Linum usitatissimum*; HOCKING und PINKERTON, 1992), Hundzahngras (*Cynodon dactylon*; COBLENTZ et al., 2004) und auch Mais (CHOWDHURY und ROSARIO, 1994; FOSU-MENSAH und MENSAH, 2016) gezeigt. Des Weiteren konnten PENG et al. (2018) in einer Meta-Studie zeigen, dass mit steigenden N-Inputs neben der oberirdischen Pflanzenbiomasse auch das N/P-Verhältnis dieser zunimmt bzw. weiter wird. Auch konnte für Reis und Weizen gezeigt werden, dass eine erhöhte N-Versorgung eine Zunahme der P-Verwertungseffizienz zu Folge haben kann (TAN et al., 1995; DWIVEDI et al., 2002; AULAKH und MALHI, 2005).

Die gute Stickstoffversorgung an den Standorten sowie die hohen Niederschläge könnten somit die P-Aufnahme- und Verwertungseffizienzen der Maispflanzen positiv beeinflusst haben, wodurch auch die ungedüngten Pflanzen in ihrem Wachstum nicht oder nur geringfügig durch die geringen Gehalte der Böden an leicht pflanzenverfügbarem P limitiert gewesen sein könnten. Des Weiteren könnte die P-Versorgung der Böden günstiger gewesen sein, als ursprünglich angenommen.

### 6.3 Effekte der Rezyklate

Wie erläutert gibt es Grund zu der Annahme, dass ertragswirksame Effekte der P-Düngemittel aufgrund der guten P-Versorgung der Pflanzen unabhängig von der Düngung ausgeblieben sein könnten. Durch die hohen P-Aufnahmen der unbehandelten Pflanzen könnten sich außerdem zusätzliche P-Aufnahmen in Folge der Düngemittelapplikation nicht in signifikanten Unterschieden geäußert haben, welche bei niedrigeren Aufnahmen von P aus dem Boden relativ gesehen von größerer Bedeutung gewesen wären. Deshalb soll im Folgenden vor allem im Vergleich mit Tripelsuper- und Rohphosphat die Auswirkung der Rezyklate auf die P-Aufnahme sowie die jeweilige P-Aufnahmeeffizienz beurteilt werden. Die Ertragswirkung kann auf Basis der Ergebnisse des Versuchs nicht eindeutig bewertet werden.



### 6.3.1 Effekte der Struvite Crystal Green und Berliner Pflanze

In zahlreichen Feld- und Gefäßversuchen konnten im Vergleich mit unterschiedlichen P-Mineraldüngern ähnliche bis bessere Düngewirkungen von Struviten auf verschiedene Kulturen beobachtet werden (AHMED et al., 2018; HERTZBERGER et al., 2020). In Bezug auf Mais wurde dies in diesem Versuch teilweise bestätigt. Die getesteten Struvite *Berliner Pflanze* und *Crystal Green* unterschieden sich in Bezug auf die erzielten P-Aufnahmen nicht signifikant von Tripelsuperphosphat. Dies war zu erwarten, da bereits unter anderem von MUYS et al. (2021) in einem Gefäßversuch mit Mais (lehmiger bis toniger Boden; pH = 5,8; Olsen-P = 0,9 mg 100 g<sup>-1</sup>) gezeigt werden konnte, dass der P aus Struviten wenige Tage bis Wochen nach der Applikation für Pflanzen im gleichen Maße verfügbar war, als der aus wasserlöslichen Mineraldüngern (HALL et al., 2020; MUYS et al., 2021). Die Ergebnisse des Vergleichs mit Tripelsuperphosphat stimmen außerdem mit THOMPSON (2013) überein, welcher die Düngewirkung eines Struvits auf Mais in einem Feldversuch unter ähnlichen Bedingungen (schluffiger Lehm; pH = 6; Olsen-P = 0,5 mg 100 g<sup>-1</sup>) mit der von Tripelsuperphosphat verglich. Sie decken sich auch mit denen von Mais-Gefäßversuchen wie beispielsweise von CABEZA et al. (2011; Lehm; pH = 6,6; CAL-P = 2 mg 100 g<sup>-1</sup>) oder PÉREZ et al. (2009; Lehm; pH = 5,6 / 6,8; CAL-P = 2 mg 100 g<sup>-1</sup>).

*Crystal Green* unterschied sich neben Tripelsuperphosphat als einziges der in diesem Versuch geprüften P-Rezyklate bezüglich der P-Aufnahme signifikant von der Kontrolle. Mögliche Ursachen für die scheinbar fehlende Ertragswirkung trotz erhöhter P-Aufnahme sind Kapitel 6.2 zu entnehmen. Entgegen der Erwartung erzielte Berliner Pflanze keine signifikante Erhöhung der P-Aufnahme bzw. diesbezüglich nur 85% der Wirkung des Tripelsuperphosphats, während es bei *Crystal Green* 99% waren. Im Falle des *Crystal Green* stimmt dieser Wert mit dem Ergebnis einer Auswertung von über 60 Studien überein, in welcher die Wirkung von Struviten mit denen von Ammonium- und Superphosphat verglichen wurde (HERTZBERGER et al., 2020). Der Unterschied zwischen den Struviten spiegelte sich auch in der P-Aufnahmeeffizienz wider, die sich zwar in beiden Fällen nicht signifikant von der des Tripelsuperphosphats (10,9%) unterschied, im Falle des *Crystal Greens* jedoch fast identisch ausfiel (10,4% bzw. 6,1% bei *Berliner Pflanze*). Dieses erzielte zudem eine signifikant höhere P-Aufnahme sowie P-Aufnahmeeffizienz als Rohphosphat, was ebenfalls mit den Ergebnissen von MUYS et al. (2021) übereinstimmt. Bei Vergleichen unterschiedlicher Struvite wurde allgemein und explizit bei der Betrachtung der hier verwendeten Produkte festgestellt, dass sich diese in ihrer Pflanzenverfügbarkeit und Ertragswirkung nicht unterscheiden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der P in diesen Produkten stets in der gleichen Form (MAP) vorliegt. Der Einfluss weiterer Bestandteile des Düngeprodukts auf die Löslichkeit ist in der Regel unbedeutend bzw. nicht so stark, als dass sich der hier beobachtete Unterschied zwischen den

Produkten erklären ließe (Hall et al., 2020). Möglicherweise ist dieser somit auf Versuchsfehler zurückzuführen.

Insgesamt lässt sich trotz der eingeschränkten Aussagekraft dieses Versuchs sagen, dass die Ergebnisse bezüglich der erzielten P-Aufnahme und -Verwertungseffizienz durch *Crystal Green* mit dem eindeutigen Bild aus der Literatur übereinstimmen und auf eine Düngewirkung ähnlich der von wasserlöslichen Mineraldüngern und besser als die von Rohphosphat hinweisen.

### 6.3.2 Effekte des Ascheprodukts AshDec

Bisherige Versuche zur Düngewirkung von Klärschlammaschen, die wie *AshDec* thermochemisch mit Alkali-Additiven behandelt wurden, führten zu unterschiedlichen Ergebnissen. In diesem Versuch unterschied sich *AshDec* in Bezug auf die erzielte P-Aufnahme und die P-Aufnahmeeffizienz (7,5%) von keiner der Positiv- oder Negativkontrollen signifikant. Dennoch zeigte sich, dass ein Teil des im Produkt enthaltenen Ps aufgenommen wurde, wenn gleich eine Einschätzung der Wirksamkeit alleine darauf basierend nicht gegeben werden kann. Die Ergebnisse verschiedener Versuche deuten jedoch darauf hin, dass die Wirkung von *AshDec* und ähnlichen Produkten in Abhängigkeit von Faktoren wie Kulturart und Standort variiert.

In einem Maisversuch von SEVERIN et al. (2014) hingegen, welcher in Gefäßen im Freien angelegt war (sandiger Boden; pH = 3,8; CAL-P = 1,1 mg 100<sup>-1</sup> g<sup>-1</sup>), erzielte ein vergleichbares Ascheprodukt signifikant höhere Erträge und P-Aufnahmen als die Kontrolle und unterschied sich diesbezüglich nicht signifikant von Tripelsuperphosphat. Auch in einem Zuckerrohr-Gefäßversuch mit *AshDec* (*Saccharum spp.*; sandiger Lehm; pH = 4,9; P (keine Angabe zur Methode) = 0,5 mg 100 g<sup>-1</sup>) konnte dies bestätigt werden (RANIRO et al., 2022). Im Gegensatz dazu konnten KRAUS et al. (2019b) keinen Effekt der *AshDec*-Düngung auf den Ertrag oder die P-Aufnahme von Weizen (*Triticum aestivum*) oder Ackerbohne (*Vicia faba*) in einem Gefäßversuch (Sand- und Lehmböden; laut Autoren P-Mangel) erkennen, während dies für Tripelsuperphosphat und drei getesteten Struviten der Fall war.

In einem weiteren Gefäßversuch mit Mais, im dem allerdings *AshDec*-Produkte geprüft wurden, welche ohne Alkali-Additive hergestellt und daher vergleichsweise schlechter pflanzenverfügbaren P enthielten, konnte gezeigt werden, dass der Effekt auf die P-Aufnahme in Abhängigkeit vom Standort variiert. So konnten auf drei unterschiedlichen Böden durchschnittlich 17% (lehmgiger Sand; pH = 4,4; CAL-P = 2,4 mg 100 g<sup>-1</sup>), 36% (lehmgiger Schluff; pH = 5,6; CAL-P = 1,9 mg 100 g<sup>-1</sup>) und 46% (schluffiger Lehm; pH = 6,8; CAL-P = 2 mg 100 g<sup>-1</sup>) der Wirkung von Tripelsuperphosphat erreicht werden (RÖMER, 2013). Auch in einem Gutachten des BMEL (2020) wird betont, dass Daten nicht genannter

Vegetationsversuche darauf hindeuten, dass die Wirksamkeit von mit Alkali-Additiven hergestellten *AshDec*-Produkten von den Bodenbedingungen sowie der Pflanzenart und -sorte abhängt.

Eine Ursache für die zwischen Versuchen variierende Düngewirkung könnte auch in der Herstellung des Produkts liegen. Wenn die Alkali-Additive bei der Behandlung des Klärschlammes nicht in einer ausreichenden Menge von etwa 2 mol je mol P hinzugefügt werden, so verbleibt ein größerer Teil des P in der schlecht pflanzenverfügbaren Form des Whitlockit (STEMANN et al., 2015; HERZEL et al., 2016). Letztlich bedarf es jedoch weiterer Versuche, um die Bedingungen für eine Wirksamkeit von *AshDec* auszumachen.

### 6.3.3 Effekte des Pyrolyseprodukts Pyreg

Die Produkte des *Pyreg*-Verfahrens wurden bisher in wenigen Gefäß- und Feldversuchen auf ihre Wirksamkeit getestet. Dabei wurden Karbonisate verwendet, die bei unterschiedlich hohen Pyrolyse-Temperaturen hergestellt und bei denen teilweise mit Natriumsalzen angereicherte Klärschlammaschen als Ausgangsmaterial verwendet wurden (APPEL UND FRIEDRICH, 2017). Die Addition von Natriumsalz hat das Ziel, P im Klärschlamm in eine Calcium-Natrium-Phosphat-Verbindung zu überführen, um die Bildung von Whitlockit zu verhindern (STECKENMESSER et al., 2016). Unabhängig von den durch Variationen in der Herstellung bedingten Produktunterschieden konnten bisherige Versuche jedoch wenig Aufschluss über die Wirksamkeit der *Pyreg*-Produkte geben.

In drei Weizen-Feldversuchen konnten unter ähnlichen Standortbedingungen (lehmiger Schluff bis schluffiger Lehm; pH = 7,2-7,6; CAL-P: 1,3-2,3 mg 100 g<sup>-1</sup>) unabhängig von den Modifikationen oder den Herstellungstemperaturen der Produkte keine Düngewirkungen festgestellt werden (APPEL UND FRIEDRICH, 2017). Auch in drei Mais-Feldversuchen mit unterschiedlichen Standortbedingungen (keine Angaben zur Bodenart; pH = 5,2-7,5; CAL-P = 0,9-2,7 mg 100 g<sup>-1</sup>) und Karbonisaten aus Klärschlämmen mit unterschiedlichen P-Eliminations-Mitteln wurden weder Effekte auf die Erträge noch auf die P-Aufnahme der Pflanzen festgestellt (APPEL UND FRIEDRICH, 2017). Dies stimmt mit den Ergebnissen des hier zugrundeliegenden Versuchs überein. Hinzuzufügen ist jedoch, dass bei allen genannten Feldversuchen keine Effekte der Positivkontrolle (Tripelsuperphosphat) auf die Erträge oder die P-Aufnahme festgestellt wurden. Es ergaben sich also für die *Pyreg*-Behandlungen weder signifikante Unterschiede zur Kontrolle, noch zu Tripelsuperphosphat, weshalb die Aussagekraft dieser Versuche ähnlich zu bewerten ist, wie die des hier besprochenen.

Die Ergebnisse von verschiedenen Gefäßversuchen fielen wiederum unterschiedlich aus. So konnten APPEL et al. (2017) beispielsweise zeigen, dass bei 500-700 °C hergestellte Karbonisate die Maiserträge und -P-Aufnahmen signifikant erhöhen konnten, während diese

Effekte im Vergleich mit einer Tripelsuperphosphat-Düngung signifikant schwächer waren (lehmiger Schluff; pH = 4,9; CAL-P = 0,2 mg 100 g<sup>-1</sup>). STECKENMESSER et al. (2016) konnten derartige Effekte für bei 500° C hergestelltem *Pyreg* nicht bestätigen. Die Verwendung von mit Natriumsulfat versetztem Klärschlamm als Ausgangssubstrat führte hingegen im Vergleich mit der Kontrolle bzw. Tripelsuperphosphat ebenfalls zu signifikant höheren bzw. niedrigeren Erträgen und P-Aufnahmen (keine Angaben zu Bodenart, pH-Wert oder Boden-P).

In diesem Maisversuch zeigte sich in den *Pyreg*-Parzellen eine P-Aufnahmeeffizienz von durchschnittlich 7,1%. Diese unterschied sich weder signifikant von Triplesuper- noch von Rohphosphat, war aber höher, als in zwei Gefäßversuchen mit Mais (1,5-3,3 / 0,8%; pH = 7 / 5,8) bzw. ähnlich wie in einem weiteren (7-11%; pH = 4,9) (APPEL und FRIEDRICH, 2017). Hier wurden durch *Pyreg* des Weiteren 87% der P-Aufnahme in den Tripelsuperphosphat-Parzellen erreicht, was deutlich mehr, als in den genannten Gefäßversuchen, jedoch ähnlich viel bis weniger als in den genannten Feldversuchen war.

Insgesamt lässt sich die Wirksamkeit von *Pyreg* auch nach einem Vergleich der Ergebnisse mit den wenigen vergleichbaren Versuchen nur schlecht beurteilen, da es widersprüchliche Hinweise und einen Mangel an aussagekräftigen Feldversuchen gibt.

#### **6.3.4 Effekte der Tierkohle Knochenkohle+**

Tendenziell erzielte *Knochenkohle+* von allen Rezyklaten in Bezug die meisten Variablen die schlechtesten Ergebnisse. Zwar wurde der P aus dem Produkt bei einer Aufnahmeeffizienz von 4,2% teilweise durch die Pflanzen aufgenommen, jedoch wies sie in diesem Punkt wie auch in Bezug auf die P-Aufnahme und die Erträge zur Haupt- und Zwischenernte die niedrigsten Werte vor. Ein signifikanter Unterschied wurde hingegen nur im Vergleich zu Tripelsuperphosphat in Bezug auf die P-Aufnahme durch den Spross festgestellt.

Bisherige Studie kamen zu unterschiedlichen Ergebnissen. In einem Gefäßversuch mit Italienischem Weidelgras (*Lolium multiflorum*; sandiger Schluff; pH = 5,2; CAL-P = 2,4 mg 100 g<sup>-1</sup>) nahmen mit *Knochenkohle+* behandelte Pflanzen signifikant mehr P auf, als die einer unbehandelten Kontrolle. Sie unterschieden sich diesbezüglich nicht von mit Tripelsuperphosphat behandelten Pflanzen, konnten aber genau wie diese nicht signifikant mehr Biomasse aufbauen (ZIMMER et al., 2019). In einem 5-jährigen Feldversuch (lehmiger Schluff; pH = 5,1-5,2; CAL-P = 1,1-4,7) mit einer Fruchtfolge aus Wintergerste (*Hordeum vulgare*), Winterraps (*Brassica napus*), Winterweizen, Lupine (*Lupinus angustifolius*) und Winterroggen (*Secale cereale*) konnte ebenfalls gezeigt werden, dass *Knochenkohle+* die P-Aufnahme der Pflanzen signifikant erhöhen konnte und dabei etwa 90% der Tripelsuperphosphat-Wirkung erreichte (PANTEN und LEINWEBER, 2020). Dies war mehr, als in dem hier besprochenen Versuch (71%), während die P-Aufnahmeeffizienz unter der hier

festgestellten lag (maximal 3,4%). Auf den Plots mit den geringsten CAL-P-Gehalten des Versuchs von PANTEN und LEINWEBER (2020) konnten außerdem ertragssteigernde Effekte von Knochenkohle+ im Vergleich zur Kontrolle ermittelt werden.

Insgesamt gibt es zu *Knochenkohle+* jedoch wenig Studien mit eindeutigen Versuchsergebnissen. Auch die des hier zugrunde liegenden Versuchs konnten wenig Aufschluss geben.

#### **6.4 Methodenkritik**

Einige Aspekte des Versuchsaufbaus und -verlaufs sind kritisch zu sehen und könnten sich auf die Aussagekraft der Ergebnisse ausgewirkt haben. Zum einen konnte die angestrebte Bestandesdichte von 9 Pflanzen  $\text{m}^{-2}$  nicht erreicht werden. Für die Bestimmung der TM-Erträge wurden zur Zwischenernte sechs und zur Haupternte dadurch letztlich nur ca. 40 Pflanzen je Parzelle entnommen. Somit wurde zur Haupternte von einem  $6\text{-m}^2$ -Ertrag auf den Hektarertrag geschlossen. Teilweise ergaben sich starke Streuungen der Daten, die sich in hohen Standardabweichungen äußerten. Dies könnte ein Grund für die wenig signifikanten Ergebnissen der Varianzanalysen sein. Außerdem waren die meisten Variablen von Blockeffekten geprägt. Eine weitere Schwierigkeit könnte sich wie bereits besprochen durch die hohen Stickstoffgaben von über  $100 \text{ kg N ha}^{-1}$  zum Ausgleich der Stickstoffgehalte der Struvite ergeben haben. Hinzu kam der Vorfruchteffekt des Kleeegrases, für welches eine Anrechnung von mindestens  $40 \text{ kg N ha}^{-1}$  empfohlen wird (Mücke, 2022). Die Ergebnisse lassen vermuten, dass nicht zuletzt dadurch die P-Versorgung der Pflanzen unabhängig von der P-Düngung hoch war. Somit konnten sich potenzielle Ertragswirkungen vermutlich nicht entfalten.

## 7 Fazit und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit war es, die Wirksamkeit verschiedener P-Recycling-Dünger in einem Öko-Mais-Feldversuch in Form einer randomisierten Blockanlage zu untersuchen und sie diesbezüglich mit gängigen P-Düngern aus dem konventionellen und ökologischen Landbau zu vergleichen.

Insgesamt wurden an beiden Standorten unabhängig von der Düngevariante hohe Erträge erzielt. Keines der getesteten P-Rezyklate oder der zum Vergleich untersuchten P-Düngemittel hatte in diesem Versuch einen Effekt auf den Maisertrag zur Haupternte. Die P-Aufnahme der oberirdischen Biomasse wurde lediglich durch Tripelsuperphosphat und das Struvit *Crystal Green* signifikant beeinflusst. Diese unterschieden sich außerdem in Bezug auf die P-Aufnahmeeffizienz signifikant von Rohphosphat, bei welchem die geringste festgestellt wurde. Alle anderen Rezyklate unterschieden sich in diesen Punkten weder signifikant von der Kontrolle, noch von Tripelsuper- oder Rohphosphat. Durch die Ermittlung der P-Aufnahmeeffizienzen konnte jedoch gezeigt werden, dass aus jedem Düngemittel tendenziell mehr P durch die Pflanzen aufgenommen wurde, als aus Rohphosphat. Dies könnte als Anlass gesehen werden, die Düngewirkung der Produkte in zukünftigen Studien weiter zu prüfen. Die Aussagekraft dieses Versuchs war möglicherweise durch die offenbar gute P-Versorgung an den Standorten in Folge der dortigen Bodengehalte an leicht pflanzenverfügbarem P, der hohen Niederschläge und der hohen Stickstoffgaben, bzw. die Limitierung der Erträge durch einen anderen Faktor eingeschränkt und die Versuchsfragen dementsprechend nicht eindeutig zu beantworten. In Kombination mit der herangezogenen Literatur lässt sich jedoch sagen, dass sich die hier geprüften P-Recycling-Dünger aktuell in ihren Potenzialen für den Ökolandbau aus verschiedenen Gründen unterscheiden.

Insbesondere in Bezug auf das Produkt *Crystal Green* waren Parallelen zu Ergebnissen anderer Versuche zu erkennen. Zahlreiche Studien konnten zeigen, dass Struvite in Bezug auf ihre Düngewirkungen wasserlöslichen Mineraldüngern gleichen und Rohphosphate übertreffen. Gleichzeitig sind sie in der Regel mit deutlich weniger Schadstoffen belastet und in ihrer Herstellung als vergleichsweise nachhaltig einzustufen. Somit könnten sie für den Einsatz im Ökolandbau geeignet sein. Allerdings könnte die eingeschränkte Verfügbarkeit dieser Produkte einem weitverbreiteten Einsatz im Wege stehen. Die zugrunde liegenden Verfahren können nur in Kläranlagen mit biologischer P-Elimination realisiert werden, welche in weniger als einem Drittel der deutschen Kläranlagen praktiziert wird. Außerdem sind die P-Rückgewinnungsraten der Verfahren gering, weshalb eine Integrierung in eine Kläranlage nicht bei der Erfüllung der Anforderungen der neuen Klärschlammverordnung behilflich sein wird.

*AshDec* ließ sich in Bezug auf die Düngewirkung in diesem Versuch nicht eindeutig beurteilen. Bisherige Studien zeigen, dass es Bedarf gibt, die Wirkung dieses Produkts auf unterschiedliche Kulturen unter variierenden Standortbedingungen in weiteren Studien zu prüfen. Auch die Frage, wie sich unterschiedliche Alkali-Additive auf die Wirksamkeit der Produkte auswirken, könnte Gegenstand zukünftiger Forschung sein. Das Potenzial für den Ökolandbau könnte durch die stark schwankende Schadstoffbelastung in Abhängigkeit vom Ausgangsmaterial eingeschränkt sein.

Während auch eine Einschätzung der Wirksamkeit der *Pyreg*-Karbonisate auf Basis dieses Versuchs nur schwer zu geben ist, ist auch die sonstige Datenlage nicht eindeutig. Bisher gab es zu diesen Produkten wenige aussagekräftige Studien unter praxisnahen Feldbedingungen. In einigen Gefäßversuchen konnten jedoch ertragswirksame Effekte festgestellt werden, auch wenn diese in der Regel nicht an die wasserlöslicher Mineraldünger herankamen. Hinzu kommt, dass die Schadstoffbelastung und die Pflanzenverfügbarkeit des enthaltenen Ps in Abhängigkeit vom Ausgangsmaterial variieren und somit im Einzelfall zu bewerten sind. Dies könnte einen möglichen Einsatz im Ökolandbau verkomplizieren. Bevor ein solcher in Frage kommt, gilt es allerdings die Wirksamkeit in weiteren Feldversuchen zu prüfen. Darüber hinaus könnten der Einfluss der Pyrolyse-Temperatur auf die Schadstoffbelastung und die P-Verfügbarkeit der Produkte sowie die Effekte vorhergehender Klärschlammbehandlungen wie z.B. das Hinzufügen von Natriumsalzen oder die Art der P-Elimination Gegenstand weiterer Forschung sein.

Bis auf die Pyrolyse-Produkte werden alle der hier genannten P-Rezyklate im Juli 2022 mit der Aufnahme in die EU-Düngemittelverordnung als P- bzw. Mehrnährstoffdünger in der konventionellen Landwirtschaft zugelassen, was eine Voraussetzung für eine Zulassung der Produkte im Ökolandbau ist. Des Weiteren haben sich bereits Vertreter von Ökoverbänden wie Bioland oder Demeter sowie Institutionen wie die Expertengruppe für Methoden der organischen Produktion offen gegenüber einem möglichen Einsatz von P-Recycling-Düngern im Ökolandbau gezeigt. Die Datenlage zu Struviten ist eindeutig, weshalb einer Zulassung nicht viel im Wege zu stehen scheint. In Bezug auf die restlichen hier betrachteten Produkte gilt es in zukünftigen Versuchen zu beurteilen, ob sich diese als wirksam, sicher und wirtschaftlich erweisen. Letztlich bergen Klärschlämme und Schlachtabfälle große P-Potenziale, die mit jedem zugelassenen P-Recycling-Dünger weiter erschlossen werden können.

## 8 Literaturübersicht

- ABFKLÄRV (KLÄRSCHLAMMVERORDNUNG), 2017. Zugriff: 20.01.2022, URL: [https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger\\_BGBI&jumpTo=bgbl117s3465.pdf#\\_bgbl\\_%2F%2F%5B%40attr\\_id%3D%27bgbl117s3465.pdf%27%5D\\_\\_1647623456588](https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBI&jumpTo=bgbl117s3465.pdf#_bgbl_%2F%2F%5B%40attr_id%3D%27bgbl117s3465.pdf%27%5D__1647623456588).
- ADAM, C., B. PEPLINSKI, M. MICHAELIS, G. KLEY UND F.-G. SIMON, 2009: Thermochemical treatment of sewage sludge ashes for phosphorus recovery. *Waste Management* **29**, 1122-1128.
- ADEMBE, J. S., J. K. KWACH, A. O. ESILABA UND S. M. NGARI, 2015: The effect of phosphorus fertilizers and manure on maize yields in South Western Kenya. *East Agricultural and Forestry Journal* **81**, 1-11.
- AHMED, N., S. SHIM, S. WON UND C. RA, 2018: Struvite recovered from various types of wastewaters: characteristics, soil leaching behavior, and plant growth. *Land Degradation & Development* **29**, 2864-2879.
- AKANDE, M. O., E. A. ADUAYI, A. OLAYINKA UND R. A. SOBULO, 1998: Efficiency of Sokoto rock phosphate as a fertilizer source for maize production in South Western Nigeria. *Journal of Plant Nutrition* **21**, 1339-1353.
- AKANDE, M. O., E. A. MAKINDE, F. I. OLUWATOYINBO UND M. T. ADETUNJI, 2010: Effects of phosphate rock application on dry matter yield and phosphorus recovery of maize and cowpea grown in sequence. *African Journal of Environmental Science and Technology* **D**, 293-303.
- AMBROŻY-DERĘGOWSKA, K. UND P. SZULE, 2021: Influence of different sowing density in two varieties of maize. Part I. Relation to yielding. *Biometrical Letters* **58**, 199-208.
- AMELUNG, W., H.-P. BLUME, H. FLEIGE, R. HORN, E. KANDELER, I. KÖGEL-KNABNER, R. KRETZSCHMAR, K. STAHR UND B.-M. WILKE, 2018: Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde. Springer Spektrum, Berlin.
- AMYANPOORI, S., M. OVASSI UND E. FATAHINEJAD, 2015: Effect of vermicompost and triple superphosphate on yield of corn (*Zea mays* L) in Behebahan **3**, 494-499.
- ANDRIC, L., M. RASTIJA, T. TEKLIĆ UND V. KOVACEVIĆ, 2012: Response of maize and soybeans to liming. *Turkish Journal for Agriculture and Forestry* **36**, 415-420.
- APPEL, T. UND K. FRIEDRICH, 2017: Phosphor-Recycling mit Karbonisaten aus Klärschlamm. Schriftenreihe des Hermann-Hoepke-Instituts, Band 1.
- APPEL, T., L. WALD, D. KERN UND K. FRIEDRICH, 2017: Phosphordüngewirkung von industriell hergestellten Karbonisaten aus dem Klärschlamm einer kommunalen Kläranlage. Tagungsbeitrag zu: Vortrag Jahrestagung, Titel der Tagung: „Horizonte des Bodens“. Veranstalter: Kommission IV der DBG vom 02. bis 07.09.2017 in Göttingen. Berichte der DBG (nicht begutachtete online Publikation).
- ARIA, M. M., A. LAKZIAN, G. H. HAGHINA, A. R. BERENJI, H. BESHARATI UND A. FOTOVAT, 2010: Effect of Thiobacillus, sulfur, and vermicompost on the water-soluble phosphorus of hard rock phosphate. *Bioresource Technology* **101**, 551-554.
- AULAKH, M. S. UND S. S. MALHI, 2005: Interactions of nitrogen with other nutrients and water: Effect on crop yield and quality, nutrient use efficiency, carbon sequestration and environmental pollution. *Advances in Agronomy* **86**, 341-409.
- BAM (BUNDESANSTALT FÜR MATERIALFORSCHUNG UND -PRÜFUNG), 2020: R-Rhenania - Modifiziertes Rhenania Phosphat aus Klärschlammasche für Bayern. Zugriff: 26.01.2022, URL: <https://www.bam.de/Content/DE/Projekte/laufend/R-Rhenania/r-rhenania.html>.
- BARROW, N. J., 2016: The effects of pH on phosphate uptake from the soil. *Plant and Soil* **410**, 401-410.
- BARTELS, U., J. BOLDUAN, U. JARMS, L. LÖNING, F. MILDNER, J. NEUENDORFF UND M. ROMBACH, 2021: Kennzahlen für die Kontrolle im ökologischen Landbau. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Darmstadt.



- BAYUELO-JIMÉNEZ, J. S. UND I. OCHOA-CADAVID, 2014: Phosphorus acquisition and internal utilization efficiency among maize landraces from the central Mexican highlands. *Field Crops Research* **156**, 123-134.
- BECKMANN, U. UND H. KOLBE, 2002: Maisanbau im Ökologischen Landbau: Information für Praxis und Bertatung. Zugriff: 20.03.2022, URL: <http://orgprints.org/15102/5/Mais.pdf>.
- BERRY, P. M., R. SYLVESTER-BRADLEY, L. PHILIPPS, D. J. HATCH, S. P. CUTTLE, F.W. RAYNS UND P. GOSLING, 2002: Is the productivity of organic farms restricted by the supply of available nitrogen? *Soil Use and Management* **18**, 248-255.
- BISWAS, D. R. UND G. NARAYANASAMY, 2006: Rock phosphate enriched compost: An approach to improve low-grade Indian rock phosphate. *Biosource Technology* **97**, 2243-2251.
- BMEL (BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT), 2019: Wissen, wie man düngen muss - die Bodenuntersuchung. Zugriff: 13.08.2021, URL: <https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/pflanzenbau/bodenschutz/bodenuntersuchung.html>.
- BMEL (BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT), 2020: Recyclingphosphate in der Düngung - Nutzen und Grenzen. Standpunkt des Wissenschaftlichen Beirats für Düngungsfragen.
- BMEL (BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT), 2021: Ökologischer Maisanbau. Zugriff: 20.03.2022, URL: <https://www.oekolandbau.de/landwirtschaft/pflanze/spezieller-pflanzenbau/hackfruechte/mais/>.
- BMJ (BUNDESMINISTERIUM FÜR JUSTIZ), 2017: Düngeverordnung. Zugriff: 21.11.2021, URL: [https://www.gesetze-im-internet.de/d\\_v\\_2017/D%C3%BCV.pdf](https://www.gesetze-im-internet.de/d_v_2017/D%C3%BCV.pdf).
- BMLRT (BUNDESMINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, REGIONEN UND TOURISMUS), 2022: Wie funktioniert eine Kläranlage? Zugriff: 20.01.2022, URL: <https://info.bmlrt.gv.at/themen/wasser/wasserqualitaet/abwasserreinigung/klaeranlage.html>.
- BOLAN, N. S. UND M. J. HEDLEY, 1990: Dissolution of phosphate rocks in soils. 2. Effect of pH on the dissolution and plant availability of phosphate rock in soil with pH dependent charge. *Fertilizer Research* **24**, 125-134.
- BWB (BERLINER WASSERBETRIEBE), 2022: Berliner Pflanze - Der mineralische Langzeitdünger. Zugriff: 14.01.2022, URL: [https://www.bwb.de/de/assets/downloads/BWB\\_Berliner%20Pflanze\\_ebook.pdf](https://www.bwb.de/de/assets/downloads/BWB_Berliner%20Pflanze_ebook.pdf).
- CABEZA, R., B. STEINGROBE, W. RÖMER UND N. CLAASSEN, 2011: Effectiveness of recycled P products as P fertilizers, as evaluated in pot experiments. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **91**, 173-184.
- CHOWDHURY, M. K. UND E. L. ROSARIO, 1994: Comparison of nitrogen, phosphorus and potassium utilization efficiency in maize/mungbean intercropping. *Journal of Agricultural Science* **122**, 193-199.
- COBLENTZ, W. K., M. B. DANIELS, J. L. GUNSAULIS, J. E. TURNER, D. A. SCARBROUGH, J. B. HUMPHRY, K. P. COFFEY, P. A. MOORE, K. A. TEAGUE UND J. D. SPEIGHT, 2004: Effects of nitrogen fertilization on phosphorus uptake in bermudagrass forage grown on high soil-test phosphorus site. *The Professional Animal Scientist* **20**, 146-154.
- CORDELL, D. UND S. WHITE, 2011: Peak Phosphorus: Clarifying the key issues of a vigorous debate about long-term phosphorus security. *Sustainability* **3**, 2027-2049.
- CORRÊA, R. M., DO NASCIMENTO, C. W. A., DE SÁ SOUZA, S., FREIRE, F. J. UND DA SILVA, G. B., 2005: Gafsa rock phosphate and triple superphosphate for dry matter production and p uptake by corn. *Scientia Agricola* **62**, 159-164.
- CNP CYCLES GMBH, 2020: AirPrex® - Patentiertes Verfahren zur Schlammoptimierung. Zugriff: 24.01.2022, URL: <https://cnp-cycles.de/verfahren/airprex>.
- DAKORA, F. D. UND D. A. PHILLIPS, 2001: Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments. *Plant and Soil* **245**, 35-47.
- DE102011010525 - Verfahren zur Reinigung von Biogas, Rauchgas oder Flüssigkeiten, Adsorbens dafür, Filter, sowie Verwendung des Adsorptionsmittels. Publikationsnummer DE102011010525 A1; Publikationsdatum: 09.12.2012; Erfinder: J. Burgstaler, P. Leinweber und D. Wiedow.

- DEUTSCHER BUNDESTAG, 2002: Drucksache 14/9778; Konsequenzen der BSE- und MKS-Krise für die landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlämmen und Komposten. Zugriff: 11.01.2022, URL: <https://dserver.bundestag.de/btd/14/097/1409778.pdf>.
- DOERING, H., 1956: Untersuchungen über die Ausnutzbarkeit der an Kolloiden sorbierten Phosphorsäure durch die Pflanze. Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde **73**, 235–245.
- DÖRING, T., 2018: Steckbriefe der Ackerfrüchte. In: Wachendorf, M., A. Bürkert und R. Graß: Ökologische Landwirtschaft. Eugen Ulmer KG, Stuttgart (Hohenheim).
- DML (DEUTSCHES MAISKOMITEE E.V.), 2022: Bestimmung Reifezahl. Zugriff: 21.03.2022, URL: <https://www.maiskomitee.de/Produktion/Sorten/Bestimmung-Reifezahl>.
- DPP (DEUTSCHE PHOSPHOR PLATTFORM), 2018a: Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung auf der Kläranlage - AirPrex. Zugriff: 22.01.2022, URL: <https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/document/verfahrenskennblatt-airprex/>.
- DPP (DEUTSCHE PHOSPHOR PLATTFORM), 2018b: Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung auf der Kläranlage - Pearl-Verfahren. Zugriff: 24.01.2022, URL: <https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/document/verfahrenskennblatt-ostara-pearl/>.
- DPP (DEUTSCHE PHOSPHOR PLATTFORM), 2018c: Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung - Thermische Vorbehandlung - Pyreg. Zugriff: 25.01.2022, URL: <https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/document/verfahrenskennblatt-pyreg/>.
- DPP (DEUTSCHE PHOSPHOR PLATTFORM), 2019: Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung nach der Kläranlage - AshDec. Zugriff: 25.01.2022, URL: <https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/document/verfahrenskennblatt-ashdec/>.
- DSV (DEUTSCHE SAATVEREDELUNG AG), 2021: CROSBY. Zugriff: 09.12.2021, URL: <https://www.dsv-saaten.de/sorte/1128>.
- DWD (DEUTSCHER WETTERDIENST), 2021a: Niederschlag: vieljährige Mittelwerte 1961-1990. Zugriff: 13.01.2022, URL: [https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/mittelwerte/nieder\\_6190\\_akt\\_html.html;jsessionid=B34226750F7A393C944530878EC28E63.live11044?view=na&nn=16102](https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/mittelwerte/nieder_6190_akt_html.html;jsessionid=B34226750F7A393C944530878EC28E63.live11044?view=na&nn=16102).
- DWD (DEUTSCHER WETTERDIENST), 2021b: Temperatur: vieljährige Mittelwerte 1961-1990. Zugriff: 13.01.2022, URL: [https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/mittelwerte/temp\\_6190\\_akt\\_html.html;jsessionid=B34226750F7A393C944530878EC28E63.live11044?view=na&nn=16102](https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/mittelwerte/temp_6190_akt_html.html;jsessionid=B34226750F7A393C944530878EC28E63.live11044?view=na&nn=16102).
- DWIVEDI, B.S., A. K. SHUKLA, V. K. SINGH UND R. L. YADAV, 2003: Improving nitrogen and phosphorus use efficiencies through inclusion of forage cowpea in the rice-wheat systems in the Indo-Gangetic Plains of India. Field Crops Research **80**, 167-193.
- EBELHAR, S. A. UND E. C. VARSA, 2008: Tillage and potassium placement effects on potassium utilization by corn and soybean. Communications in Soil Science and Plant Analysis **31**, 2367-2377.
- EDER, J. UND R. BRANDHUBER, 2014: Mais. In: Doleschel, P. und J. Frahm: Landwirtschaftlicher Pflanzenbau. BLV Buchverlag GmbH & Co. KG, München.
- EICHLER-LÖBERMANN, B., S. KÖHNE, B. KOWALSKI UND E. SCHNUG, 2008: Effect of catch cropping on phosphorus bioavailability in comparison to organic and inorganic fertilization. Journal of Plant Nutrition **31**, 659-676.
- ELSER, J. UND E. BENNETT, 2011: A broken biogeochemical cycle. Nature **478**, 29.
- EUR-LEX, 2009: Verordnung (EG) Nr. 1069/2009 vom 21. Oktober 2009. Zugriff: 26.01.2022, URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX%3A32009R1069>.
- EUR-LEX, 2011: Verordnung (EU) Nr. 142/2011 vom 26.2.2011. Zugriff: 26.01.2022, URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX:32011R0142>.

- EUR-LEX, 2021a: Durchführungsverordnung (EU) 2021/1165 vom 15. Juli 2021. Zugriff: 13.10.2021, URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32021R1165>.
- EUR-LEX, 2021b: Delegierte Verordnung der Kommission Ares (2021) 44211. Zugriff: 14.01.2022, URL: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=PI\\_COM%3AAres%282021%2944211#](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=PI_COM%3AAres%282021%2944211#)
- EUR-LEX, 2021c: Delegierte Verordnung der Kommission C (2021) 4743. Zugriff: 14.01.2022, URL: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=PI\\_COM%3AC%282021%294743](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=PI_COM%3AC%282021%294743)
- EUR-LEX, 2021d: Delegierte Verordnung der Kommission C (2021) 4751. Zugriff: 14.01.2022, URL: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=PI\\_COM%3AC%282021%294751](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=PI_COM%3AC%282021%294751)
- EUROPEAN FERTILIZER MANUFACTURERS' ASSOCIATION, 2000. Phosphorus: Essential Element for Food Production. Zugriff: 13.10.2021, URL: [https://sswm.info/sites/default/files/reference\\_attachments/EFMA%202000%20Phosphorus%20Essential%20for%20Food%20Production.pdf](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/EFMA%202000%20Phosphorus%20Essential%20for%20Food%20Production.pdf).
- ERNST BASLER + PARTNER AG, 2017: Beurteilung von Technologien zur Phosphor-Rückgewinnung. Zugriff: 02.02.2022, URL: <https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/wp-content/uploads/2017/03/P-Studie-Schweiz-2017.pdf>
- EWERT, W. UND A. WAGENBACH, 2014: AirPrex: MAP-Kristallisation in Verbindung mit Bio-P-Fällung. Workshop Abwasser - Phosphor - Dünger, Berlin.
- FARDEAU, J. C., 1996: Dynamics of phosphate in soils. An isotopic outlook. *Fertilizer Research* **45**, 91-100.
- FILIPPELLI, G. M., 2017: Global Phosphorus Cycle. In: Rattan, L. und B. A. Stewart: *Soil Phosphorus*. Taylor & Francis Group, LLC, Boca Raton.
- FLOSSMANN, R. UND D. RICHTER, 1982: Extraktionsmethode zur Charakterisierung der Kinetik der Freisetzung von P aus der festen Phase des Bodens in die Bodenlösung. *Archiv Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* **26**, 703-709.
- FOSU-MENSHA, B. Y. UND M. MENSAH, 2016: The effect of phosphorus and nitrogen fertilizers on grain yield, nutrient uptake and use efficiency of two maize (*Zea mays* L.) varieties under rain fed condition on Haplic Lixisol in the forest-savannah transition zone of Ghana. *Environmental Systems Research* **5**, 22.
- GILBERT, N., 2009: The disappearing nutrient. *Nature* **461**, news feature.
- GÜNTHER, S., M. GRUNERT UND S. MÜLLER, 2018: Overview of recent advances in phosphorus recovery for fertilizer production. *Engineering in Life Sciences* **18**, 434-439.
- GRUNES, D. L., 1959: Effect of nitrogen on the availability of soil and fertilizer phosphorus to plants. *Advances in Agronomy* **11**, 369-396.
- HALL, R. L., L. B. STAAL, K. A. MACINTOSH, J. W. MCGRATH, J. BAILEY, L. BLACK, U. G. NIELSEN, K. REITZEL UND P. N. WILLIAMS, 2020: Phosphorus speciation and fertiliser performance characteristics: A comparison of waste recovered struvites from global sources. *Geoderma* **362**, 114096.
- HAUBOLD-ROSAR, M., T. HEINKELE, A. RADEMACHER, J. KERN, C. DICKE, A. FUNKE, S. GERMER, Y. KARAGÖZ, G. LANZA, J. LIBRA, A. MEYER-AURICH, J. MUMME, A. THEOBALD, J. REINHOLD, Y. NEUBAUER, J. MEDICK UND I. TEICHMANN, 2016: Chancen und Risiken des Einsatzes von Biokohle und anderer „veränderter“ Biomasse als Bodenhilfsstoffe oder für die C-Sequestrierung in Böden. Umweltbundesamt, Forschungskennzahl 3712 71 222.
- HAWKESFORD, M., W. HORST, T. KICHEY, H. LAMBERS, J. SCHJOERRING, I. MØLLER UND P. WHITE, 2012: Function of Macronutrients. In: Marschner, P.: *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press, London, Waltham, San Diego.
- HERMANN, L. UND T. SCHAAF, 2019: Outotec (*AshDec*®) Process for P Fertilizers from Sludge Ash. In: Ohtake, H. und S. Tsuneda: *Phosphorus Recovery and Recycling*. Springer Nature, Singapur.
- HERTZBERGER, A. J., R. D. CUSICK UND A. J. MARGENOT, 2020: A review and meta-analysis of the agricultural potential of struvite as a phosphorus fertilizer. *Soil Science Society of America Journal* **84**, 653-671.

- HERZEL, H., O. KRÜGER, L. HERMANN UND C. ADAM, 2016: Sewage sludge ash - A promising secondary phosphorus source for fertilizer production. *Science of the Total Environment* **542**, 1136-1143.
- HERZEL, H., S. A. KUGLER, T. SCHAAF UND C. ADAM, 2018: Herstellung neuer Düngemittelausgangsstoffe durch thermochemische Behandlung von Klärschlammasche. In: Holm, O., E. Thomé-Kozmiensky, P. Quickler und S. Kopp-Assenmacher: Verwertung von Klärschlamm. Thome-Kozmiensky Verlag GmbH, Neuruppin.
- HINSINGER, P., E. BETENCOURT, L. BERNARD, A. BRAUMAN, C. PLASSARD, J. SHEN, X. TANG UND F. ZHANG, 2011: P for Two, Sharing a Scarce Resource: Soil Phosphorus Acquisition in the Rhizosphere of Intercropped Species. *Plant Physiology* **156**, 1078-1086.
- HOCKING, P. J. UND A. PINKERTON, 1992: Phosphorus nutrition of linseed (*Linum usitatissimum* L.) as affected by nitrogen supply: effects on vegetative development and yield components. *Field Crops Research* **32**, 101-114.
- HOPPENHAUS, K., 2021: Phosphormangel im Ökolandbau - können Recycling-Dünger eine Lösung sein? Zugriff: 10.01.2021, URL: <https://www.riffreporter.de/de/umwelt/phosphor-recycling-duenger-oekolandbau-struvit>.
- HUANG, S., Y. MA, D. BAO, D. GUO UND S. ZHANG, 2011: Manures behave similar to superphosphate in phosphorus accumulation in long-term field soils. *International Journal of Plant Production* **5** (2), 135-146.
- IFOAM (INTERNATIONAL FEDERATION OF ORGANIC AGRICULTURE MOVEMENTS), 2021: The four Principles – The Principle of Ecology. Zugriff: 26.10.2021. URL: <https://www.ifoam.bio/why-organic/principles-organic-agriculture/principle-ecology>.
- JEDELHAUSER, M., M. ASCHENBRENNER, L. VJESTICA, V. WIERER, S. FISCHINGER UND C. R. BINDER, 2015: Kriterien für die Akzeptanz von recyceltem Phosphatdünger aus Abwasser und Klärschlamm - Ergebnisse einer Praxisbefragung von ökologisch wirtschaftenden Landwirten. 13. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau.
- KETTERINGS, Q. M., S. N. SWINK, G. GODWIN, K. CZYMEK UND G. ALBRECHT, 2005: Maize silage yield and quality response to starter phosphorus fertilizer in high phosphorus soils in New York. *Journal of Food Agriculture and Environment* **3**, 237-242.
- JÖNSSON, H., A. R. STINTZING, B. VINNERS, UND E. SALOMON, 2004: Guidelines on the Use of Urine and Faeces in Crop Production. EcoSanRes, Stockholm Environment Institute, Stockholm.
- JÖRGENSEN, R. G., 2018: Nährstoffmanagement und Humuswirtschaft. In: Wachendorf, M., A. Bürkert und R. Graß: Ökologische Landwirtschaft. Eugen Ulmer KG, Stuttgart (Hohenheim).
- JUNGK, A. UND N. CLAASSEN, 1988: Availability in soil and acquisition by plants as the basis for phosphorus and potassium supply to plants. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* **152**, 151-157.
- KABBE, C., 2017: German sludge and P-recovery ordinance moves forward. European Sustainable Phosphorus Platform (ESPP) eNews Nr. 7, S. 2.
- KASNO, A. UND M. T. SUTRIADI, 2012: Indonesian rock-phosphate effectivity for maize crop on ultisols soils. *Agrivita* **34**, 14-21.
- KLÄRANLAGE HAMM-WINDECK-WISSEN, 2022: Die Faulung. Zugriff: 20.01.2022, URL: <https://www.klaeranlage-au.de/home/rundgang/faulung/>
- KOLBE, H., 2010: Phosphor und Kalium im ökologischen Landbau – aktuelle Probleme, Herausforderungen, Düngungsstrategien. Zugriff: 25.10.2021, URL: [https://orprints.org/id/eprint/19354/1/P\\_K\\_Oeko10.pdf](https://orprints.org/id/eprint/19354/1/P_K_Oeko10.pdf).
- KOLBE, H., 2016: Nährstoff und Humusversorgung im Ökolandbau. Der kritische Agrarbericht 2016. AgrarBündnis e.V., Konstanz.

- KOLBE, H., 2019: Einfluss mineralischer P- und K-Düngung auf die Ertragsreaktion der Fruchtarten in Abhängigkeit von der Nährstoffversorgung des Bodens unter den Anbaubedingungen des ökologischen Landbaus in Deutschland. *Journal für Kulturpflanzen* **71**, 161-181.
- KÖPKE, U., 1995: Nutrient management in organic farming systems: The case of nitrogen. *Biological Agriculture & Horticulture* **11**, 15-29.
- KOVACEVIC, V., D. BANAJ, J. KOVACEVIC, A. LALIC, Z. JURKOVIC UND M. KRIZMANIC, 2006: Influences of liming on maize, sunflower and barley. *Cereal Research Communications* **34**, 553-556.
- KRATZ, S. UND E. SCHNUG, 2005: Schwermetalle in P-Düngern. *Landbauforschung Völkenrode, Special Issue* **286**.
- KRATZ, S. UND E. SCHNUG, 2006: Vergleichende Bewertung der Nähr- und Schadstoffgehalte von Düngemitteln und Klärschlamm. In: Pinnekamp, J. und H. Friedrich: Siedlungswasser- und Siedlungsabfallwirtschaft Nordrhein-Westfalen. Klärschlamm Entsorgung - Eine Bestandsaufnahme.
- KRATZ, S., S. HANEKLAUS UND E. SCHNUG, 2010: Chemical solubility and agricultural performance of P-containing recycling fertilizers. *Landbauforschung Völkenrode* **60**, 227-240.
- KRATZ, S., J. SCHICK, R. SHWIEKH UND E. SCHNUG, 2014: Abschätzung des Potentials erneuerbarer P-haltiger Rohstoffe in Deutschland zur Substitution rohphosphathaltiger Düngemittel. *Journal für Kulturpflanzen* **66** (8), 261-275.
- KRATZ, S., J. SCHICK UND A. F. ØGAARD, 2016: P Solubility of Inorganic and Organic P Sources. In: Schnug, E. und L. J. De Kok: *Phosphorus in Agriculture: 100% Zero*. Springer Science + Business Media, Dordrecht.
- KRAUS, F. UND C. KABBE, 2017: Phosphorrückgewinnung in der Praxis - So funktioniert es in den Niederlanden. *Korrespondenz Abwasser, Abfall* **64**, Nr. 2.
- KRAUS, F., M. ZAMZOW, L. CONZELMANN, C. REMY, A. KLEYBÖCKER, W. SEIS, U. MIEHE, L. HERMANN, R. HERMANN UND C. KABBE, 2019a: Abschlussbericht - Ökobilanzieller Vergleich der P-Rückgewinnung aus dem Abwasserstrom mit der Düngemittel-Produktion aus Rohphosphaten unter Einbeziehung von Umweltfolgeschäden und deren Vermeidung. Umweltbundesamt, Forschungskennzahl 3716 31 330 0.
- KRAUS, F., M. ZAMZOW, C. HOFFMANN, A.-K. BESSAI, S. FISCHINGER, A. MUSKOLUS UND C. KABBE, 2019b: Abschlussbericht - Einsatzmöglichkeiten für Nährstoffzyklate im Ökolandbau (nurec4org). Kompetenzzentrum Wasser Berlin.
- KROLL-FIEDLER, C., 2021: Der Biolandhof Kroll-Fiedler. Zugriff: 17.01.2021, URL: <https://biolandhof-kroll-fiedler.de/der-hof/>.
- KROUK, G. UND T. KIBA, 2020: Nitrogen and phosphorus interactions in plants: From agronomic to physiological and molecular insights. *Current Opinion in Plant Biology* **57**, 104-109.
- KUMATI, K. UND V. K. PHOGAT, 2008: Rock phosphate: Its availability and solubilization in the soil – a review. *Agricultural Reviews* **29**, 108-116.
- LAMBERS, H., M. W. SHANE, M. D. CRAMER, S. J. PEARSE UND E. J. VENEKLAAS, 2006: Root structure and functioning for efficient acquisition of phosphorus: matching morphological and physiological traits. *Annals of Botany* **98**, 693-713.
- LAMBERS, H., 2022: Phosphorus acquisition and utilization in plants. *Annual Review of Plant Biology* **73**, 1.1-1.26.
- LATATI, M., A. BARGAZ, B. BELARBI, M. LAZALI, S. BENLAHRECH, S. TELLAH, G. KACI, J. J. DREVON UND S. M. OUNANE, 2016: The intercropping common bean with maize improves the rhizobial efficiency, resource use and grain yield under low phosphorus availability. *European Journal of Agronomy* **72**, 80-90.
- LEIMKÖTTER, D., 2016: Antrag BMEL - Inverkehrbringen eines neuen Düngemittels. Sepura GmbH.
- LEINWEBER, P., 2016: Pyrolyse von Schlachtknochen - ein attraktiver Ansatz im Phosphorrecycling. Vortrag vom 4.10.2016.

- LEINWEBER, P., P. HAGEMANN, L. KEBELMANN, K. KEBELMANN UND M. MORSHEDIZAD, 2019: Bone Char as a Novel Phosphorus Fertilizer. In: Ohtake, H. und S. Tsuneda: Phosphorus Recovery and Recycling. Springer Nature, Singapur.
- LFU (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT), 2015: Rückholbarkeit von Phosphor aus kommunalen Klärschlämmen - Abschlussbericht.
- LI, L., S.-M. LI, J.-H. SUN, L.-L. ZHOU, X.-G. BAO, H.-G. ZHANG UND F.-S. ZHANG, 2007: Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **104**, 1192-1196.
- LØES, A.-K. UND A. F. ØGAARD, 2001: Long-term changes in extractable soil phosphorus (P) in organic dairy farming systems. *Plant and Soil* **237**, 321–332.
- LUKIWATI, D. R., 2002: Effect of rock phosphate and superphosphate fertilizer on the productivity of maize var. Bisma. In: Adu-Gyamfi, J. J.: Food Security in Nutrient-Stressed Environments: Exploiting Plants' Genetic Capabilities. *Developments in Plant and Soil Sciences*, **95**. Springer, Dordrecht
- LWK NRW (LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN), 2015a: Düngung mit Phosphat, Kali und Magnesium. Zugriff: 20.03.2021, URL: <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/pdf/phosphat-kalium-magnesium-pdf.pdf>.
- LWK NRW (LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN), 2015b: Kalkung. Zugriff: 20.03.2021, URL: <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/duengung/basisinfos/kalkung-pdf.pdf>.
- LWK NRW (LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN), 2018: Programm Düngebedarf NPmax der Landwirtschaftskammer NRW. Zugriff: 08.01.2021, URL: <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/duengung/programme/npmax/index.htm>.
- LWK NRW (LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN) 2020: Phosphor-Rezyklierung im Ökologischen Landbau. Zugriff: 13.01.2021, URL: <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/oekolandbau/versuche/oeko-p.htm>.
- LWK NRW (LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN), 2021: Ökolandbau NRW – Adresse Weber-Berres GbR. Zugriff: 17.01.2021, URL: [https://www.oekolandbau.nrw.de/service/adressen/adresse?tt\\_address\[showUid\]=2183&cHash=36439c14dbd317f576a534c0a9cc1701](https://www.oekolandbau.nrw.de/service/adressen/adresse?tt_address[showUid]=2183&cHash=36439c14dbd317f576a534c0a9cc1701).
- LWK NRW (LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN), 2021b: Mais: Lückige Feldaufgänge und Schäden durch Vogelfraß. Zugriff: 17.03.2022, URL: <https://www.oekolandbau.nrw.de/fachinfo/pflanzenbau/ackerbau/standard-titel-3>.
- MA, B. L., Z. ZHENG, D. PAGEAU, C. VERA, J. FREGEAU-REID, A. XUE UND W. YAN, 2017: Nitrogen and phosphorus uptake, yield and agronomic traits of oat cultivars as affected by fertilizer N rates under diverse environments. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **108**, 245-265.
- MAHIMAIRAJA, S., N. S. BOLAN UND M. J. HEDLEY, 1995: Dissolution of phosphate rock during the composting of poultry manure: an incubation experiment. *Fertilizer Research* **40**, 93-104.
- MALLARINO, A. P., J. M. BORDOLI UND R. BORGES, 1999: Phosphorus and Potassium Placement Effects on Early Growth and Nutrient Uptake of No-Till Corn and Relationships with Grain Yield. *Agronomy Journal* **91**, 37-45.
- MANZAR-UL-ALAM, S., S. A. SHAH, S. ALI UND M. M. IQBAL, 2005: Yield and phosphorus-uptake by crops as influenced by chemical fertilizer and integrated use of industrial by-products. *Songklanakarin Journal of Science and Technology* **27**, 9-16.
- MARÍN, C. UND J. WEINER, 2014: Effects of density and sowing pattern on weed suppression and grain yield in three varieties of maize under high weed pressure. *European Weed Research Society* **54**, 467-474.
- MAYER, N. UND M. KALTSCHMITT, 2022: Closing the phosphorus cycle: Current P in balance and future prospects in Germany. *Journal of Cleaner Production* **347**, 131272.

- MEDINSKI T., D. FREESE UND T. REITZ, 2018: Changes in soil phosphorus balance and phosphorus-use efficiency under long-term fertilization conducted on agriculturally used Chernozem in Germany. *Canadian Journal of Soil Science* **98**, 650-662.
- METEOSTAT, 2022: Wetterstation Rüthen. Zugriff: 13.01.2022, URL: <https://meteostat.net/de/station/D4313?t=2021-01-01/2021-12-31>.
- MÖLLER, K., 2009: Inner farm nutrient flows between arable land and permanent grassland via the stable in organic cropping systems. *European Journal of Agronomy* **31**, 204-212.
- MÖLLER, K. UND U. SCHULTHEISS, 2014: Organische Handelsdüngemittel tierischer und pflanzlicher Herkunft für den ökologischen Landbau - Charakterisierung und Empfehlungen für die Praxis - Schlussbericht. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Darmstadt.
- MÖLLER, K., A. OBERSON, E. K. BÜNEMANN, J. COOPER, J. K. FRIEDEL, N. GLAESNER, S. HÖRTENHUBER, A.-K. LØES, P. MÄDER, G. MEYER, T. MÜLLER, S. SYMANCZIK, L., WEISSENGRUBER, I. WOLLMANN UND J. MAGID, 2018: Improved Phosphorus Recycling in Organic Farming: Navigating Between Constraints. *Advances in Agronomy* **147**, 159-237.
- MOTAVALLI, P. P. UND R. J. MILES, 2002: Soil phosphorus fractions after 111 years of animal manure and fertilizer applications. *Biology and Fertility of Soils* **36**, 35-42.
- MOTESHAZADEH, B., H. ETESAMI, S. BAGHERI-NOVAIR UND H. AMIRMOKRI, 2017: Fertilizer consumption trend in developing countries vs. developed countries. *Environmental Monitoring and Assessment* **189**:103.
- MÜCKE, M., 2022: Nährstoffversorgung im ökologischen Maisanbau. Landwirtschaftskammer Niedersachsen. Zugriff: 20.03.2022. URL: <https://m.lwk-niedersachsen.de/?file=34948>
- MUYS, M., R. PHUKAN, G. BRADER, A. SAMAD, M. MORETTI, B. HAIDEN, S. PLUCHON, K. ROEST, S. E. VLAEMINCK UND M. SPILLER, 2021: A systematic comparison of commercially produced struvite: Quantities, qualities and soil-maize phosphorus availability. *Science of the Total Environment* **756**, 143726.
- NEDELICIU, C.E., K.V. RAGNARSDOTTIR, P. SCHLYTER UND I. STJERNQUIST, 2020: Global phosphorus supply chain dynamics: Assessing regional impact to 2050. *Global Food Security* **26**, 100426.
- NEINA, D., 2019: The Role of Soil pH in Plant Nutrition and Soil Remediation. *Applied and Environmental Soil Science* **2019**, 5794869.
- OEHL, F., A. OBERSON, H. U. TAGMANN, J. M. BESSON, D. DUBOIS, P. MÄDER, H.-R. ROTH UND E. FROSSARD, 2002: Phosphorus budget and phosphorus availability in soils under organic and conventional farming. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **62**, 25-35.
- ØGAARD, A. F., 1996: Effect of fresh and composted cattle manure on phosphate retention in soil. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B - Soil & Plant Science* **46**, 98-105.
- OHTAKE, H. UND S. TSUNEDA, 2019: Phosphorus Recovery and Recycling. Springer Nature, Singapur.
- OLSEN, S. R., F. S. WATANABE UND R. E. DANIELSON, 1961: Phosphorus absorption by corn roots as affected by moisture and phosphorus concentration. *Soil Science Society of America Journal* **25**, 289-294.
- ORTWEIN, B., 2016: AirPrex® - Ein Verfahren zur Schlammoptimierung mit der Option der Phosphat-Rückgewinnung. Innovationsforum *Thermolyphos* 4.-5. Oktober 2016 in Halle (Saale).
- OSTARA (OSTARA NUTRIENT RECOVERY TECHNOLOGIES INC.), 2018: Ostara Nutrient Recovery Solutions. Zugriff: 27.01.2022, URL: [https://ohioweat.org/docs/180926\\_NRS\\_OhioNutrients.pdf](https://ohioweat.org/docs/180926_NRS_OhioNutrients.pdf).
- OSTARA (OSTARA NUTRIENT RECOVERY TECHNOLOGIES INC.), 2019: Ostara Crystal Green® factsheet. Zugriff: 27.01.2022, URL: [https://716990-2380570-raikfcquaxqncofqfm.stackpathdns.com/wp-content/uploads/2019/07/CG-General-Sell-Sheet\\_Web-1.pdf](https://716990-2380570-raikfcquaxqncofqfm.stackpathdns.com/wp-content/uploads/2019/07/CG-General-Sell-Sheet_Web-1.pdf).
- OSTARA (OSTARA NUTRIENT RECOVERY TECHNOLOGIES INC.), 2021: Sustainable water treatment and nutrient recovery solutions. Zugriff: 26.01.2022, URL: <https://ostara.com/nutrient-management-solutions/>.

- PAULSEN, H. M., U. KÖPKE, A. OBERSON UND G. RAHMANN, 2016: Phosphorus - The Predicament of Organic Farming. In: Schnug, E. und L. J. De Kok: Phosphorus in Agriculture: 100% Zero. Springer Science + Business Media, Dordrecht.
- PANTEN, K. UND P. LEINWEBER, 2020: Agronomic evaluation of bone char as phosphorus fertiliser after five years of consecutive application. *Journal für Kulturpflanzen* **72**, 561-576.
- PCS (POLLUTION CONTROL SERVICE GMBH), 2022: Berliner Wasserbetriebe. Zugriff: 22.01.2022, URL: <https://www.pcs-consult.de/referenzen/berliner-wasserbetriebe>.
- PÉREZ, R. C., B. STEINGROBE, W. RÖMER UND N. CLAASSEN, 2009: Plant availability of P fertilizers recycled from sewage sludge and meat-and-bone meal in field and pot experiments. International Conference on Nutrient Recovery from Wastewater Streams Vancouver. IWA publishing, 2009, S. 215.
- PENG, Y., Z. PENG, X. ZENG UND J. H. HOUX III, 2018: Effects of nitrogen-phosphorus imbalance on plant biomass production: a global perspective. *Plant and Soil* **436**, 245-252.
- PINNEKAMP, J., K. WEINFURTNER, C. SARTORIUS UND S. GÄTH, 2011: Phosphorrecycling – Ökologische und wirtschaftliche Bewertung verschiedener Verfahren und Entwicklung eines strategischen Verwertungskonzepts für Deutschland - Abschlussbericht. Bundesministerium für Bildung und Forschung.
- PYREG GMBH, 2020: Klärschlamm. Zugriff: 29.01.2022, URL: [https://pyreg.com/wp-content/uploads/2020\\_pyreg\\_brochure\\_schlamm\\_DE.pdf](https://pyreg.com/wp-content/uploads/2020_pyreg_brochure_schlamm_DE.pdf).
- RAHMANN, G. UND H. NIEBERG, 2005: New insights into organic farming in Germany – empirical results of a survey in 218 farms. *Landbauforschung Völkenrode* **55**, 193-202.
- RAJAN, S. S. S., R. L. FOX UND W. M. H. SAUNDERS, 1991: Influence of pH, time and rate of application on phosphate rock dissolution and availability to pastures. *Fertilizer Research* **28**, 95-101.
- RANIRO, H. R., T. M. SOARES, C. ADAM UND R. S. PAVINATO, 2022: Waste-derived fertilizers can increase phosphorus uptake by sugarcane and availability in a tropical soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **2022**, 1-12.
- RAVEN, J. A., 2015: Interactions between nitrogen and phosphorus metabolism. *Annual Plant Reviews* **48**, 187-214.
- RÖMER, W., 2013: Phosphor-Düngewirkung von P-Recyclingprodukten. *Korrespondenz Abwasser, Abfall* **60**, Nr. 3.
- ROSEMARIN, A., J. J. SCHRODER, L. DAGERSKOG, D. CORDELL UND A. L. SMIT, 2011: Future supply of phosphorus in agriculture and the need to maximise efficiency of use and reuse. *International Fertiliser Society Proceedings* **685**, 1-28.
- ROTH, G. W., D. B. BEEGLE, S. M. HEINBAUGH UND M. E. ANTLE, 2006: Starter fertilizers for corn on soils testing high in phosphorus in the Northeastern USA. *Agronomy Journal* **98**, 1121-1127.
- RUBIO, G., H. LIAO., X. YAN UND J. P. LYNCH, 2003: Topsoil foraging and its role in plant competitiveness for phosphorus in common bean. *Crop Science* **43**, 598-607.
- SAMPLE, E. C., R. J. SOPER UND G. J. RACZ, 1980. Reaction of phosphate fertilizers in soils. In: Khasawneh, F. E., E. C. Sample und E. J. Kamprath: The role of phosphorus in agriculture. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison.
- SÁNCHEZ, B., A. RASMUSSEN UND J. R. PORTER, 2013: Temperatures and the growth and development of maize and rice: a review. *Global Change Biology* **20**, 408-417.
- SANDAÑA, P., 2016: Phosphorus uptake and utilization efficiency in response to potato genotype and phosphorus availability. *European Journal of Agronomy* **76**, 95-106.
- SATTARI, S. Z., A. F. BOUWMAN, K. E. GILLER UND M. K. VAN ITTERSUMA, 2012: Residual soil phosphorus as the missing piece in the global phosphorus crisis puzzle. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **109**, 6348-6353.



- SERVICEGESELLSCHAFT TIERISCHE NEBENPRODUKTE MBH, 2020: Verarbeitung tierischer Nebenprodukte. Zugriff: 25.01.2022, URL: <https://www.stn-vvtn.de/index.php>.
- SEVERIN, M., J. BREUER, M. REX, J. STEMANN, CH. ADAM, H. VAN DEN WEGHE UND M. KÜCKE, 2014: Phosphate fertilizer value of heat treated sewage sludge ash. *Plant Soil Evolution* **60**, 555-561.
- SCHNUG, E. UND L. J. DE KOK, 2016: Phosphorus in Agriculture: 100% Zero. Springer Science + Business Media, Dordrecht.
- SCHNUG, E. UND S. H. HANEKLAUS, 2016: The Enigma of Fertilizer Phosphorus Utilization. In: Schnug, E. und L. J. De Kok: Phosphorus in Agriculture: 100% Zero. Springer Science + Business Media, Dordrecht.
- SCHIPPER, W., 2019: Success Factors for Implementing Phosphorus Recycling Technologies. In: Ohtake, H. und S. Tsuneda: Phosphorus Recovery and Recycling. Springer Nature, Singapur.
- SCHWERTMANN, U. UND R. M. TAYLOR, 1989: Iron oxides. In: Dixon, J. B. und S. B. Weed: Minerals in soil environments. Soil Science Society of America, Madison.
- SINAJ, S., A. BUERKERT, G. EL-HAJJ, A. BATIONO, H. TRAORE UND E. FOSSARD, 2001: Effects of fertility management strategies on phosphorus bioavailability in four West African soils. *Plant and Soil* **233**, 71–83.
- SMITH, S.E. UND D. J. READ, 2008: Mycorrhizal symbiosis, 3. Auflage. Academic Press, New York.
- STATISTISCHES BUNDESAMT, 2021a: Anbauflächen, Hektarerträge und Erntemengen ausgewählter Anbaukulturen im Zeitvergleich. Zugriff: 01.06.2021, URL: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Feldfruechte-Gruenland/Tabellen/liste-feldfruechte-zeitreihe.html>.
- STATISTISCHES BUNDESAMT, 2021b: Produzierendes Gewerbe – Düngemittelversorgung. Zugriff: 15.08.2021, URL: [https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Industrie-Verarbeitendes-Gewerbe/Publikationen/Downloads-Fachstatistiken/duengemittelversorgung-jahr-2040820217004.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Industrie-Verarbeitendes-Gewerbe/Publikationen/Downloads-Fachstatistiken/duengemittelversorgung-jahr-2040820217004.pdf?__blob=publicationFile).
- STATISTISCHES BUNDESAMT, 2021c: Klärschlamm entsorgung nach Bundesländern. Zugriff: 20.01.2022, URL: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Tabellen/liste-klaerschlamverwertungsart.html;jsessionid=B6FDF424FF1A83133C7530A5EFEAD530.live711#fus-snote-1-584696>.
- STATISTISCHES BUNDESAMT, 2022: Wachstum und Ernte - Feldfrüchte - Fachserie 3 Reihe 3.2.1 - 16/2021. Zugriff: 17.03.2022, URL: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Feldfruechte-Gruenland/Publikationen/Downloads-Feldfruechte/feldfruechte-jahr-2030321217164.html>.
- STECKENMESSER, D., C. VOGEL, A. CHRISTIAN UND D. STEFFENS, 2016: Phosphorrecycling mittels Kombination von Nieder-Temperatur-Konvertierung und thermochemischem Aufschluss von biogenen Reststoffen - Abschlussbericht. Bundesprogramm Ökologischer Landbau und andere Formen nachhaltiger Landwirtschaft.
- STECKENMESSER, D., C. VOGEL UND D. STEFFENS, 2019: Medium-scale plant experiment of sewage sludge-based phosphorus fertilizers from large-scale thermal processing. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **50**, 2469-2481.
- STEFFENS, D., R. STAMM, G. LEITHOLD UND S. SCHUBERT, 2003: Phosphat-Mobilisierung durch Haupt- und Zwischenfrüchte nach Düngung von weicherdigem Rohphosphat im ökologischen Landbau. Justus-Liebig-Universität Gießen, Institut für Pflanzenernährung. Projektbericht Bundesprogramm ökologischer Landbau.
- STEIN-BACHINGER, K., M. RECKLING UND A. GRANSTEDT, 2013: Kreislauforientierte Landwirtschaft – Ökologische Landwirtschaft. Zugriff: 5.11.2021, URL: [https://www.zalf.de/de/forschung\\_lehre/publikationen/Documents/oekolandbau/handbuecher/BERAS\\_Pflanzenbau\\_Tierhaltung.pdf](https://www.zalf.de/de/forschung_lehre/publikationen/Documents/oekolandbau/handbuecher/BERAS_Pflanzenbau_Tierhaltung.pdf).

- STEMANN, J., B. PEPLINKSI UND C. ADAM, 2015: Thermochemical treatment of sewage sludge ash with sodium salt additives for phosphorus fertilizer production – Analysis of underlying chemical reactions. *Waste Management* **45**, 385-390.
- STROTMANN, K., 2020: Maisaussaat 2021: Angebot an Öko-Saatgut steigt. Artikel in *agrarheute*. Zugriff: 17.03.2021, URL: <https://www.agrarheute.com/pflanze/mais/maisaussaat-2021-angebot-oeko-saatgut-steigt-576533>.
- TAN, P. S., T. N. ANH, N. V. LUAT UND D. W. PUCKRIDGE, 1995: Yield trends of a long-term NPK experiment for intensive rice monoculture in the Mekong River Delta of Viet Nam. *Field Crops Research* **42**, 101-109.
- TALBOYS, P. J., J. HEPPELL, T. ROOSE, J. R. HEALEY, D. L. JONES UND P. J. A. WITHERS, 2016: Struvite: a slow-release fertiliser for sustainable phosphorus management? *Plant and Soil* **401**, 109-123.
- THOMPSON, L. B., 2013: Field evaluation of the availability for corn and soybean of phosphorus recovered as struvite from corn fiber processing for bioenergy. Master thesis, Iowa State University.
- VAN KAUWENBERGH, S., 2010: World phosphate reserves and resources. International Fertilizer Development Centre (IFDC); Washington, DC, USA.
- VDLUFA (Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten), 2016: VDLUFA Methodenbuch Band I. Zugriff: 13.08.2021, URL: [https://www.vdlufa.de/Methodenbuch/index.php?option=com\\_content&view=article&id=7&Itemid=108&lang=de](https://www.vdlufa.de/Methodenbuch/index.php?option=com_content&view=article&id=7&Itemid=108&lang=de).
- VENEKLAAS, E. J., H. LAMBERS, J. BRAGG, P. M. FINNEGAN, C. E. LOVECLOCK, W. C. PLAXTON, C. A. PRICE, W.-R. SCHEIBLE, M. W. SHANE, P. J. WHITE UND J. A. RAVEN, 2012: Opportunities for improving phosphorus-use efficiency in crop plants. *New Phytologist* **195**, 306-320.
- VERBAND DEUTSCHER LANDWIRTSCHAFTLICHER UNTERSUCHUNGS- UND FORSCHUNGSANSTALTEN (VDLUFA), 2018: Mitteilungen 02/2018 – Neue Empfehlungen des VDLUFA für die P-Düngung. Zugriff: 25.10.2021, URL: [https://www.vdlufa.de/Dokumente/WirUeberUns/Mitteilungen/Mitteilungen\\_02\\_18.pdf](https://www.vdlufa.de/Dokumente/WirUeberUns/Mitteilungen/Mitteilungen_02_18.pdf). !
- VODEGEL, S. UND F. MÜLLER, 2017: DBU-Grundsatzstudie: Technologiebewertung thermos-chemischer Konversionsverfahren von Klärschlamm als Alternative zur Verbrennung unter besonderer Berücksichtigung der Potenziale zur Nährstoffrückgewinnung. Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Projektnummer 60 3547.
- WANG, X., J. SHEN UND H. LIAO, 2010: Acquisition or utilization, which is more critical for enhancing phosphorus efficiency in modern crops? *Plant Science* **179**, 302-306.
- WEBER, E. UND H. BLEIHOLDER, 1990: Erläuterungen zu den BBCH-Dezimal-Codes für die Entwicklungsstadien von Mais, Raps, Faba-Bohne, Sonnenblume und Erbse – mit Abbildungen. *Gesunde Pflanzen* **42**, 308-321.
- WEN, Z., H. LI, Q. SHEN, X. TANG, C. XIONG, H. LI, J. PANG, M. H. RYAN, H. LAMBERS UND J. SHEN, 2019: Tradeoffs among root morphology, exudation and mycorrhizal symbioses for phosphorus-acquisition strategies of 16 crop species. *New Phytologist* **223**, 882-895.
- WENDLAND, M., M. DEMMEL UND S. NESER, 2014: Pflanzenernährung und Düngung. In: Eder, J. und R. Brandhuber, 2014: Mais. In: Doleschel, P. und J. Frahm: *Landwirtschaftlicher Pflanzenbau*. BLV Buchverlag GmbH & Co. KG, München.
- WESSOLEK, G., M. KAUPENJOHANN, P. DOMINIK, K. ILG, A. SCHMITT, J. ZEITZ, F. GAHRE, E. SCHULZ, E. ELLERBROCK, J. UTERMANN, O. DÜWEL UND C. SIEBNER, 2008: Ermittlung von Optimalgehalten an organischer Substanz landwirtschaftlich genutzter Böden nach § 17 (2) Nr. 7 BBodSchG. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- WUPPERVERBAND, 2022: Funktionsweise einer Kläranlage. Zugriff: 20.01.2022, URL: <https://www.wupperverband.de/service/wissen-und-lernen/themen/funktionsweise-klaeanlage#top>.
- YAGI, R., T. C. F. QUADROS, B. H. MARTINS UND D. S. ANDRADE, 2020: Maize yields and carbon pools in response to poultry litter, rock phosphate and P-solubilizing microorganisms. *Scientia Agricola* **77**

- YU, X., C. KEITEL UND F. A. DIJKSTRA, 2021: Global analysis of phosphorus fertilizer use efficiency in cereal crops. *Global Food Security* **29**, 100545.
- ZADA, K., P. SHAH AND M. ARIF, 2000: Management of organic farming: Effectiveness of farm yard manure (FYM) and nitrogen for maize productivity. *Sarhad Journal of Agriculture* **16**, 461-465.
- ZIBILSKE, L. M. UND J. M. BRADFORD, 2003: Tillage effects on phosphorus mineralization and microbial activity. *Soil Science* **168**, 677-685.
- ZIMMER, D., J. KRUSE, N. SIEBERS, K. PANTEN, C. OELSCHLÄGER, M. WARKENTIN, Y. HU, L. ZUIN UND P. LEINWEBER, 2018: Bone char vs. S-enriched bone char: Multi-method characterization of bone chars and their transformation in soil. *Science of the Total Environment* **643**, 145-156.
- ZIMMER, D., K. PANTEN, M. FRANK, A. SPRINGER UND P. LEINWEBER, 2019: Sulfur-enriched bone char as alternative P fertilizer: Spectroscopic, wet chemical and yield response evaluation. *Agriculture* **9**, 21.



## **10 Erklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten und nicht veröffentlichten Schriften entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form oder auszugsweise im Rahmen einer anderen Prüfung noch nicht vorgelegt worden.

Bonn, den 06.04.2022

RHEINISCHE FRIEDRICH-WILHELMS-UNIVERSITÄT BONN  
Landwirtschaftliche Fakultät

**MASTERARBEIT**  
im Rahmen des Masterstudiengangs

---

Nutzpflanzenwissenschaften

zur Erlangung des Grades

**„Master of Science“**

**Einfluss von P-Recycling-Düngern auf Ertrag und P-  
Aufnahme von Klee gras im Ökologischen Landbau**

vorgelegt von:  
Charlotte Klimpel  
Matrikel-Nr. 3359247

vorgelegt am:  
01.07.2022

1. Prüfer: Dr. Daniel Neuhoff
2. Prüfer: Prof. Dr. Thomas Döring

# Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung .....	I
Abkürzungsverzeichnis.....	II
Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis.....	VI
1. Einleitung .....	1
2. Literaturübersicht.....	2
2.1 Ökologischer Kleegrasanbau in Deutschland.....	2
2.2 P-Kreislauf im Boden und in der Pflanze.....	3
2.3 P-Düngung .....	5
2.3.1 P-Düngung im Ökolandbau.....	6
2.4 P-Recycling .....	8
2.4.1 Aktueller Stand und Aussichten für den Ökolandbau .....	8
2.4.2 Herstellungsprozesse und Eigenschaften von P-Recyclingdüngern.....	9
3. Zielsetzung der Arbeit .....	17
4. Material und Methoden.....	18
4.1 Versuchsstandorte.....	18
4.1.1 Boden .....	19
4.1.2 Klima und Wetter .....	21
4.2 Versuchsaufbau.....	22
4.2.1 Auswahlkriterien und Zusammensetzung der P-Düngemittel .....	23
4.2.2 Kulturart.....	24
4.3 Versuchsdurchführung.....	24
4.3.1 Düngung und Aussaat .....	24
4.4 Datenerfassung .....	26
4.5 Statistische Auswertungsmethoden .....	29
5. Ergebnisse .....	30
5.1 Trockenmasseerträge .....	30
5.2 Nährstoffanalysen.....	34
5.2.1 Stickstoff.....	35
5.2.1.1 Stickstoffaufnahme .....	35
5.2.2 Phosphor .....	40
5.2.2.1 Phosphoraufnahme.....	40

5.2.2.2	Phosphoraufnahmeeffizienz.....	45
5.2.2.3	Phosphorverwertungseffizienz .....	50
6.	Diskussion.....	56
6.1	Einfluss der Standortfaktoren.....	56
6.2	Ertragswirkung der Kontrollen.....	58
6.3	Effekte der P-Recyclingdünger .....	62
6.3.1	Chemische Aufbereitung (Struvite) .....	62
6.3.2	Thermische Aufbereitung (Aschen und Karbonisate) .....	64
6.4	Methodenkritik .....	67
7.	Fazit und Ausblick .....	69
	Literaturverzeichnis .....	V
	Anhang.....	XVII
	Eidesstattliche Erklärung .....	XXIV



## Kurzfassung

Im Ökolandbau werden neben organischen Wirtschaftsdüngern vor allem weicherdige Rohphosphate zur Phosphordüngung eingesetzt, die jedoch oft eine geringe Pflanzenverfügbarkeit und hohe Schwermetallbelastungen aufweisen. Da Phosphor zudem nicht synthetisch hergestellt werden kann und die weltweiten Vorräte begrenzt sind, müssen Wege gefunden werden, den vorhandenen Phosphor zu recyceln. Die Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm und Schlachtabfällen bietet eine Möglichkeit, Phosphor in den Kreislauf zurückzuführen und somit natürliche Ressourcen zu schützen. Bislang ist jedoch die pflanzenbauliche Wirkung der neuen Dünger noch unklar. Dafür wurde in einem Klee gras-Feldversuch die Wirksamkeit von fünf P-Recyclingdüngern unter den Bedingungen des Ökolandbaus untersucht.

Getestet wurden zum einen chemisch gefällte Produkte wie *Crystal Green* und *Berliner Pflanze* und zum anderen thermisch behandelte Produkte wie *AshDec*, *Pyreg* und *Knochenkohle<sup>Plus</sup>*. Die Versuchsanlage erfolgte im randomisierten Blockdesign mit dem Prüffaktor Düngung auf zwei ökologischen Betrieben in Warstein. Neben den P-Recyclingdüngern wurden als Positivkontrollen das im konventionellen Anbau häufig eingesetzte wasserlösliche Triplesuperphosphat (TSP) und das für den ökologischen Anbau typische weicherdige Rohphosphat verwendet, wobei eine ungedüngte Kontrolle als Negativkontrolle diente. Untersucht wurden acht Varianten in vier Wiederholungen. Über die Vegetationsperiode wurden zwei (Standort KF) bzw. drei (Standort W) Klee grasschnitte vorgenommen. Die Proben wurden auf ihren Ertrag und die Nährstoffgehalte, insbesondere die Phosphoraufnahme, untersucht. Die erhobenen Daten wurden varianzanalytisch mit einer ANOVA und einem Tukey-Test ausgewertet.

Die Ergebnisse dieses Versuchs deuten darauf hin, dass die getesteten P-Recyclingdünger in ihrer Düngewirkung vergleichbar mit einer TSP-Düngung sind und eine Rohphosphatdüngung übertreffen können. Eine Ausnahme bildet das Struvit *Crystal Green*, welches einen signifikant höheren Ertrag und P-Aufnahme als TSP erzielen konnte. Auffällig war jedoch, dass an beiden Standorten die Erträge der ungedüngten Parzellen weitestgehend mit denen der gedüngten Parzellen vergleichbar waren, sodass keine signifikanten Unterschiede der Negativkontrolle zu *Rohphosphat* und nur in einzelnen Parametern zu TSP festgestellt werden konnte. Aufgrund der einmaligen hohen P-Gabe zu Beginn der Fruchtfolge und der vermutlich zu gering eingeschätzten pflanzenverfügbaren P-Vorräte im Boden, fielen die Düngeeffekte insgesamt nur gering aus. Auch die gute Wasserversorgung während der Vegetationsperiode sorgte möglicherweise für eine erhöhte P-Nachlieferung aus dem Boden. Es wird daher angenommen, dass Phosphor nicht der ertragslimitierende Faktor war.

Insgesamt wiesen Struvite, insbesondere *Crystal Green*, wegen ihrer guten Wirksamkeit und ihrer vergleichsweise nachhaltigen Produktion das höchste Potential für den Ökolandbau auf. Jedoch erfüllen sie nicht die Vorgaben der neuen Klärschlammverordnung und sind daher wenig rentabel. Die übrigen P-Recyclingdünger erwiesen dagegen in Feldversuchen eine noch nicht ausreichend abgesicherte Düngewirkung, die eine wichtige Voraussetzung für die Zulassung im ökologischen Landbau ist. Zukünftig werden daher weitere Versuche auf P-limitierten Böden notwendig sein, um eine Wirksamkeit auch unter Feldbedingungen zu bestätigen. Ziel ist es, für den Ökolandbau ein Produkt zu entwickeln und zu zulassen, dass sowohl die P-Rückgewinnungsraten der Verordnung erfüllt, als auch nachhaltig und wirksam ist.

## Abkürzungsverzeichnis

AbfKlärV	Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost (Klärschlammverordnung)
AD	<i>AshDec</i> (P-Recyclingdünger)
ADP	Adenosindiphosphat
AOL	Lehrstuhl für Agrarökologie und Organischer Landbau
ATP	Adenosintriphosphat
B	Bor
BP	<i>Berliner Pflanze</i> (P-Recyclingdünger)
BSE	Bovine Spongiforme Enzephalopathie
°C	Grad Celsius
CAL-Methode	Calcium-Acetat-Lactat-Methode
Cu	Kupfer
CG	<i>Crystal Green</i> (P-Recyclingdünger)
DNA	Desoxyribonukleinsäure Eng.: deoxyribonucleic acid
EU	Europäische Union
EUF-Methode	Elektro-Ultrafiltrations-Methode
ha	Hektar
H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Dihydrogenphosphat
HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Hydrogenphosphat
K	Kalium
KK/ KK <sup>Plus</sup>	<i>Knochenkohle<sup>Plus</sup></i> (P-Recyclingdünger)
K <sub>2</sub> O	Kaliumoxid
KF	Standort/ Betrieb Kroll-Fiedler
LN	landwirtschaftliche Nutzfläche
LUFA	Landwirtschaftlichen Untersuchungs- und Forschungsanstalten
LWK	Landwirtschaftskammer
m	Meter
m <sup>2</sup>	Quadratmeter
MAP	Magnesiumammoniumphosphat
Mg	Magnesium
Mn	Mangan
N	Stickstoff
N <sub>min</sub>	Gehalt an pflanzenverfügbarem mineralischem Stickstoff im Boden
NRW	Nordrhein-Westfalen
Öko	ökologisch
P	Phosphor
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Diphosphorpentoxid
PAK	polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe

---

pH	Maßzahl für die Wasserstoffionenkonzentration Lat.: potentia Hydrogenii
<i>PY</i>	<i>Pyreg</i> (P-Recyclingdünger)
<i>RP</i>	<i>Weicherdiges Rohphosphat</i>
SUSAN	Sustainable and safe re-use of municipal sewage sludge for nutrient recovery
TH	Technische Hochschule
TM	Trockenmasse
<i>TSP</i>	<i>Triple superphosphat</i>
u.a.	unter anderem
Uni	Universität
vgl.	vergleiche
W	Standort/ Betrieb Weber

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abb. 1:</b>	P-Kreislauf in naturbelassenen Böden .....	4
<b>Abb. 2:</b>	Aufbau und Ablauf einer dreistufigen Kläranlage.....	10
<b>Abb. 3:</b>	Niederschlagsmenge [mm] und Temperaturmittel [°C] des Vegetationszeitraums von März bis Oktober 2021 am Standort Warstein und die Referenzjahre 1961-1990. ....	21
<b>Abb. 4:</b>	Fruchtfolgeversuch im randomisierten Blockdesign .....	22
<b>Abb. 5:</b>	KnochenKohle <sup>Plus</sup> : Sieben zur Verbesserung der Ausbringung und homogenen Verteilung der Inhaltsstoffe.....	25
<b>Abb. 6:</b>	Festgelegtes Begehungsmuster einer Parzelle und händische Düngemittelausbringung.....	25
<b>Abb. 7:</b>	Festgelegtes Schnittmuster innerhalb einer Parzelle.....	26
<b>Abb. 8:</b>	Zerkleinerung der Proben und Befüllung in Aluminiumschalen, Trocknung im Trockenschrank und Rückwaage der getrockneten Proben .....	27
<b>Abb. 9:</b>	Trockenmasseertrag [dt TM ha <sup>-1</sup> ] der ersten Zeiternte (A) in Abhängigkeit differenzierter P-Düngung und (B) in Abhängigkeit des Standortes.....	30
<b>Abb. 10:</b>	Trockenmasseertrag [dt TM ha <sup>-1</sup> ] der zweiten Zeiternte (A) in Abhängigkeit differenzierter P-Düngung und (B) in Abhängigkeit des Standortes.....	31
<b>Abb. 11:</b>	Trockenmasseertrag [dt TM ha <sup>-1</sup> ] der dritten Zeiternte für den Standort Weber in Abhängigkeit differenzierter P-Düngung.....	32
<b>Abb. 12:</b>	Kumulierter Trockenmasseertrag [dt TM ha <sup>-1</sup> ] der ersten und zweiten Zeiternte (A) in Abhängigkeit differenzierter P-Düngung (B) in Abhängigkeit des Standortes.....	33
<b>Abb. 13:</b>	Gesamt-trockenmasseertrag [dt TM ha <sup>-1</sup> ] der ersten, zweiten und dritten Zeiternte am Standort Weber in Abhängigkeit differenzierter P-Düngung .....	34
<b>Abb. 14:</b>	Stickstoffaufnahme [kg N ha <sup>-1</sup> ] der ersten Zeiternte in Abhängigkeit differenzierter P-Düngung (A) für den Standort Weber und (B) für den Standort Kroll-Fiedler .....	36
<b>Abb. 15:</b>	Stickstoffaufnahme [kg N ha <sup>-1</sup> ] der zweiten Zeiternte in Abhängigkeit (A) differenzierter P-Düngung und (B) in Abhängigkeit des Standortes.....	37
<b>Abb. 16:</b>	Stickstoffaufnahme [kg N ha <sup>-1</sup> ] der dritten Zeiternte am Standort Weber in Abhängigkeit differenzierter P-Düngung.....	38
<b>Abb. 17:</b>	Kumulierte Stickstoffaufnahme [kg N ha <sup>-1</sup> ] der ersten und zweiten Zeiternte in Abhängigkeit (A) differenzierter P-Düngung und (B) in Abhängigkeit des Standortes .....	39
<b>Abb. 18:</b>	Gesamtstickstoffaufnahme [kg N ha <sup>-1</sup> ] der ersten, zweiten und dritten Zeiternte am Standort Weber in Abhängigkeit differenzierter P-Düngung .....	40
<b>Abb. 19:</b>	Phosphoraufnahme [kg P ha <sup>-1</sup> ] der ersten Zeiternte in Abhängigkeit differenzierter P-Düngung (A) für den Standort Weber und (B) für den Standort Kroll-Fiedler .....	41
<b>Abb. 20:</b>	Phosphoraufnahme [kg P ha <sup>-1</sup> ] der zweiten Zeiternte in Abhängigkeit differenzierter P-Düngung (A) für den Standort Weber und (B) für den Standort Kroll-Fiedler .....	42
<b>Abb. 21:</b>	Phosphoraufnahme [kg P ha <sup>-1</sup> ] der dritten Zeiternte am Standort Weber in Abhängigkeit differenzierter P-Düngung.....	43

---

<b>Abb. 22:</b> Kumulierte Phosphoraufnahme [kg P ha <sup>-1</sup> ] der ersten und zweiten Zeiternte in Abhängigkeit (A) differenzierter P-Düngung und (B) in Abhängigkeit des Standortes .....	44
<b>Abb. 23:</b> Gesamtphosphoraufnahme [kg P ha <sup>-1</sup> ] der ersten, zweiten und dritten Zeiternte am Standort Weber in Abhängigkeit differenzierter P-Düngung .....	45
<b>Abb. 24:</b> Phosphoraufnahmeeffizienz [%] der ersten Zeiternte in Abhängigkeit (A) differenzierter P-Düngung (B) in Abhängigkeit des Standortes.....	46
<b>Abb. 25:</b> Phosphoraufnahmeeffizienz [%] der zweiten Zeiternte in Abhängigkeit (A) differenzierter P-Düngung und (B) in Abhängigkeit des Standortes.....	47
<b>Abb. 26:</b> Phosphoraufnahmeeffizienz [%] der dritten Zeiternte am Standort Weber in Abhängigkeit differenzierter P-Düngung.....	48
<b>Abb. 27:</b> Gesamtphosphoraufnahmeeffizienz [%] der ersten und zweiten Zeiternte in Abhängigkeit (A) differenzierter P-Düngung und (B) in Abhängigkeit des Standortes .....	49
<b>Abb. 28:</b> Gesamtphosphoraufnahmeeffizienz [%] der ersten, zweiten und dritten Zeiternte am Standort Weber in Abhängigkeit differenzierter P-Düngung .....	50
<b>Abb. 29:</b> Phosphorverwertungseffizienz [kg TM pro kg P] der ersten Zeiternte in Abhängigkeit differenzierter P-Düngung für die Standorte (A) Weber und (B) Kroll-Fiedler .....	51
<b>Abb. 30:</b> Phosphorverwertungseffizienz [kg TM pro kg P] der zweiten Zeiternte in Abhängigkeit (A) differenzierter P-Düngung und (B) in Abhängigkeit des Standortes .....	52
<b>Abb. 31:</b> Phosphorverwertungseffizienz [kg TM pro kg P] der dritten Zeiternte für den Standort Weber in Abhängigkeit differenzierter P-Düngung .....	53
<b>Abb. 32:</b> Kumulierte Phosphorverwertungseffizienz [kg TM pro kg P] der ersten und zweiten Zeiternte in Abhängigkeit (A) differenzierter P-Düngung und (B) in Abhängigkeit des Standortes .....	54
<b>Abb. 33:</b> Gesamtphosphorverwertungseffizienz [kg TM pro kg P] der ersten, zweiten und dritten Zeiternte am Standort Weber in Abhängigkeit differenzierter P-Düngung..	55

---

## Tabellenverzeichnis

<b>Tab. 1:</b>	Richtwerte für die Gehaltsklassen nach VDLUFA-Standpunkt, 2018.....	5
<b>Tab. 2:</b>	Übersicht über die Recycling-Dünger: Ausgangsstoffe, Rückgewinnungsraten, N/P-Gehalte, Maßstab und Textur.....	16
<b>Tab. 3:</b>	Korngrößenverteilung des Bodens [mm] und dessen Zusammensetzung [%].....	19
<b>Tab. 4:</b>	Durchschnittliche Nährstoffkonzentrationen und pH-Werte der Versuchsflächen .	19
<b>Tab. 5:</b>	Blockgenaue Untersuchung des Kohlenstoff-, Stickstoff und Humusgehaltes in % der Böden der Versuchsflächen.....	20
<b>Tab. 6:</b>	Vergleich der Bodenvorsorgewerte gemäß Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) mit den Schwermetallkonzentrationen [mg kg <sup>-1</sup> ] der Versuchsflächen.....	21
<b>Tab. 7:</b>	Zusammensetzung der Varianten (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -/N-Gehalte [%]) und ihre Düngungsmenge [kg ha <sup>-1</sup> ].....	23
<b>Tab. 8:</b>	Zusammensetzung der Kleegrasmischungen [kg ha <sup>-1</sup> ].....	24
<b>Tab. 9:</b>	N- und P-Gehalte & N/P-Verhältnis der Kleegrasmischungen der drei Zeiternten .....	35

## 1. Einleitung

In vielen Bereichen ist in den letzten Jahrzehnten das Bewusstsein für die Endlichkeit von Rohstoffen und somit für die Notwendigkeit eines nachhaltigen und schonenden Einsatzes gewachsen. Dieses Umdenken findet auch in der Landwirtschaft statt, sodass sich ein langsamer Wandel vollzieht. Ein Grundgedanke des ökologischen Landbaus ist eine ressourcenschonende Wirtschaftsweise, welche durch die Etablierung von möglichst geschlossenen Nährstoffkreisläufen gefördert wird. Durch die regelmäßige Entnahme von Ernteprodukten ist der Phosphorkreislauf jedoch häufig nicht geschlossen, sodass ein Phosphorbilanzdefizit entsteht. Um dieses auszugleichen kann im Ökolandbau nur auf organische Dünger oder Rohphosphate zurückgegriffen werden. Der Einsatz von Rohphosphaten birgt jedoch einige Problematiken. Zum einen sind Phosphate ein sehr begrenzter Rohstoff, der nur noch in einigen wenigen Ländern vorkommt und durch den weltweit steigenden Verbrauch v.a. für die Düngemittelproduktion bald erschöpft sein wird. Dementsprechend muss das in Deutschland verwendete Phosphat aus dem EU-Ausland importiert werden. Durch weltweite Krisen wie der Corona-Pandemie oder dem Ukraine-Krieg ist der Fokus auf Rohstoffabhängigkeiten und wie wir diese durch lokale P-Kreisläufe überwinden können, gestiegen. Zum anderen weisen Rohphosphate häufig eine hohe Schwermetallbelastung auf und sind nur gering pflanzenverfügbar. Daher sind, auch um dem Grundgedanken des ökologischen Landbaus gerecht zu werden, Alternativen zu gängigen Düngemitteln und die Etablierung von regional geschlossenen Phosphorkreisläufen in Zukunft unverzichtbar.

Eine Möglichkeit zur Phosphorrückgewinnung sind Rezyklate aus Kläranlagen. Dazu wurden bereits einige vielversprechende Gefäßversuche durchgeführt, die auf eine hohe Wirksamkeit der Rezyklate hindeuten. Zudem wird durch die Anpassung der aktuell geltenden Klärschlammverordnung (AbfKlärV 2017) in naher Zukunft (2029 bzw. 2032) die Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm verpflichtend. Der nächste Schritt ist nun die Durchführung von realitätsnahen Feldversuchen unter den Bedingungen des ökologischen Landbaus. Im Zuge der Europäischen Innovationspartnerschaft „Produktivität und Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft“ (EIP Agrar) fördert das Land Nordrhein-Westfalen in Zusammenarbeit mit der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen das Projekt „Öko-P: Alternative Phosphordünger (P-Rezyklate) zur Ertragssteigerung von Leguminosen und Getreide im Ökologischen Landbau“. Diese Arbeit untersucht innerhalb eines Teilprojektes die Wirkung neuer phosphorhaltiger Recyclingdüngeprodukte aus Klärschlamm (P-Rezyklate) und Schlachtnebenprodukten auf Ertrag und P-Aufnahme von Klee gras im Ökolandbau.

## 2. Literaturübersicht

### 2.1 Ökologischer Kleegrasanbau in Deutschland

Allein im letzten Jahrzehnt nahm der Anteil an ökologisch bewirtschafteten Flächen in Deutschland um etwa 69% von 941.500 Hektar im Jahr 2010 auf 1,6 Millionen Hektar im Jahr 2020 zu. Das entspricht etwa einem Anteil von 10% an der gesamten landwirtschaftlich bewirtschafteten Fläche (AMI 2020; BLE 2020; DESTATIS 2021B). Ein wesentliches Werkzeug des ökologischen Landbaus ist die Fruchtfolgegestaltung, die zur Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit, zur Beikrautregulierung sowie zur Vorbeugung von Krankheits- und Schädlingsbefall beiträgt. Sie setzt sich meist aus einer bodenverbessernden, tragenden (z. B. Leguminose), einer anspruchsvollen, abtragenden (z. B. Weizen) und einer anspruchslosen, abtragenden Kultur (z. B. S.-Gerste) zusammen. Dabei nehmen Körner- und Futterleguminosen etwa 25-35% des Hauptfruchtanteils innerhalb einer Fruchtfolge ein (KOLBE 2008). In Deutschland werden auf einer Fläche von rund 238.364 ha Pflanzen zur Grünernte angebaut, wobei rund 42.239 ha auf den Anbau von Feldgras/ Grasanbau auf dem Ackerland (einschließlich Klee-gras-Mischungen mit überwiegendem Grasanteil) fallen (DESTATIS 2020).

Ein Alleinstellungsmerkmal von Leguminosen ist ihre Fähigkeit mit Hilfe von Knöllchenbakterien, den sogenannten Rhizobien, atmosphärischen Stickstoff ( $N_2$ ) zu fixieren und zu nutzen. Dafür stellen Leguminosen den in Symbiose lebenden Rhizobien Kohlenstoffassimilate als Energiequelle zur Verfügung und erhalten im Gegenzug bis zu 90% des von ihnen gebundenen  $N_2$  in Form von Ammoniak. Davon werden etwa 30% durch die Leguminosen im Boden gebunden, sodass den nachfolgenden Kulturen ausreichend N als Nährstoffquelle zur Verfügung steht (DEMONET-KLEELUZPLUS 2021). Leguminosen erzielen dadurch nicht nur einen guten Vorfruchteffekt, sondern wirken sich auch positiv auf die Bodenstruktur (Durchwurzelung des Bodens), die Unterdrückung von Beikräutern und die Humusbildung aus. Zudem können sie als Futter- oder Energiepflanze verwendet werden (SPIEGEL ET AL. 2014). Für den Feldfutterbau sind vor allem Futterleguminosen, die häufig in Gemengen angebaut werden, relevant. Die genaue Zusammensetzung der Kleegrasmischungen ist dabei abhängig von den Standortbedingungen, der Nutzungsart und des N-Bedarfs der nachfolgenden Kultur. Im Durchschnitt binden Klee- und Luzernengräser  $250 \text{ kg } N_2 \text{ ha}^{-1}$  und Jahr und erzielen damit eine höhere Fixierungsleistung als Körnerleguminosen (JACOB ET AL. 2022; SPIEGEL ET AL. 2014). Einfluss auf die Fixierungsleistung nehmen neben der Leguminosenart, auch der Gesundheits- und Entwicklungszustand der Wirtspflanze (Leguminose) und des Symbionten (Rhizobien), sowie Umweltfaktoren wie die Temperatur (Optimum 20-30°C), der Wassergehalt des Bodens (gute Feuchte, aber keine Staunässe) und die Konzentration an Sauerstoff und Kohlenstoffdioxid (effektivste  $N_2$ -Bindung bei biologisch aktiven, lockeren, gut durchlüfteten Böden). Zudem wirkt sich ein hoher Nitrat- bzw. Ammoniakgehalt negativ auf die Fixierung aus. Die Aktivität der Knöllchenbakterien nimmt ab, wodurch die Fixierungsleistung um bis zu 50% reduziert werden kann (DEMONET-KLEELUZPLUS 2021). Zur Reduktion des N-Gehaltes im Boden wird daher ein regelmäßiger Schnitt und die Abfuhr der Aufwüchse empfohlen (JACOB ET AL. 2022).

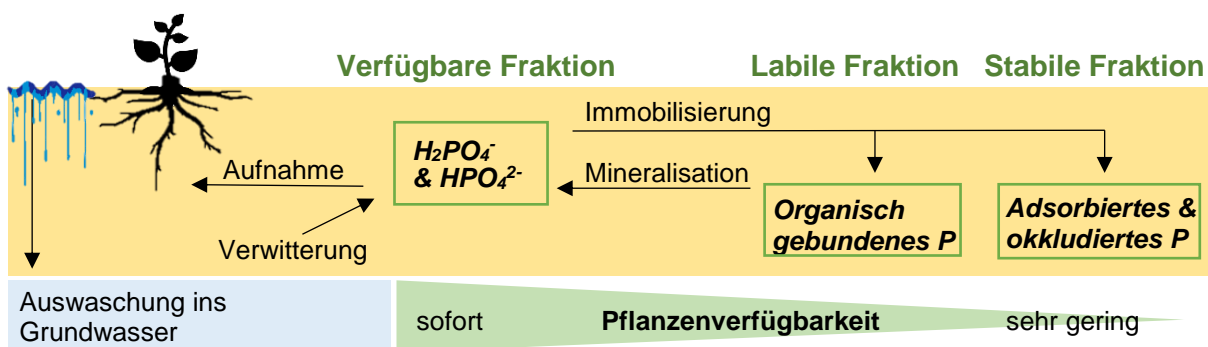


## 2.2 P-Kreislauf im Boden und in der Pflanze

Neben Sauerstoff (O), Wasserstoff (H) und Kohlenstoff (C) benötigen Pflanzen eine Reihe von weiteren Nährelementen, um organische Biomasse zu akkumulieren und sich fortzupflanzen. Ein Nährelement gilt als essentiell, wenn es für alle Pflanzen unverzichtbar ist, in der gesamten Pflanzenentwicklung benötigt wird und nicht durch ein anderes Element ersetzt werden kann (AMELUNG ET AL. 2018B; FROSSARD ET AL. 2016). Insgesamt gibt es 17 essentielle Nährelemente zu denen neben N, auch Phosphor (P) gehört. Pflanzen nehmen P vor allem in Form von  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ - und  $\text{HPO}_4^{2-}$ -Ionen über die Wurzeln aus der Bodenlösung auf (AMELUNG ET AL. 2018B; BAAB 2014; SCHNUG UND KOK 2016; YLI-HALLA 2016). Dabei wird das von der Pflanze aufgenommene P enzymatisch als Phosphatester in Biomolekülen gebunden. Als Bestandteil des DNA- und RNA-Rückgrats und der Zellmembran (Phospholipid) ist es für Zellteilungsprozesse unerlässlich. Zudem dienen die Phosphatester des Adenosintriphosphats (ATP) als universeller Energieträger und Regulator für Zellstoffwechselfvorgänge (EFMA 2000; MEYER UND STEINMETZ 2013). Kommt es zu einem P-Mangel, wird das Wachstum von Spross, Blatt und Wurzeln gehemmt. Abhängig von der Kultur führt dies zudem zur erhöhten Bildung von Anthocyanen und damit zu einer roten oder violetten Färbung der Blätter (AMELUNG ET AL. 2018B; BAAB 2014). Daher ist eine bedarfsgerechte Versorgung der Pflanzen mit allen essentiellen Nährelementen erforderlich, um eine optimale Pflanzenentwicklung gewährleisten zu können.

Den größten natürlichen P-Speicher bilden Gesteine, sodass der P-Gehalt der Böden primär durch das Ausgangsgestein bestimmt wird. Für schluffige, tonige und lehmige Böden der gemäßigten Breitengrade ergeben sich Gesamt-P-Gehalte von 200-800 mg kg<sup>-1</sup> (AMELUNG ET AL. 2018B). Dabei kommt P im Boden zu 30-50% in organischer und zu 50-70% in mineralischer Form vor (BAAB 2014). Zu den wichtigsten Vertretern zählen die primären Phosphatminerale zu meist in Form von verschiedenen Apatiten, wobei Fluorapatit der häufigste Vertreter ist (YLI-HALLA 2016). Da Pflanzen P nur in gelöster Form als Dihydrogen- ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) und als Hydrogenphosphat ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ) aufnehmen können, muss regelmäßig P aus der Festphase in die Bodenlösung nachgeliefert werden. Dies erfolgt vor allem durch die Freisetzung von sorbierendem P, die Auflösung von Ca-Phosphaten und die Mineralisierung von organischen P-haltigen Substanzen. Durch Diffusion gelangt der freigesetzte P zur Verarmungszone der Pflanzenwurzel (AMELUNG ET AL. 2018B), wo er P teilweise direkt von Pflanzen und Mikroorganismen aufgenommen und in organischer Form gebunden wird. Durch Mineralisationsprozesse werden pflanzliche und mikrobielle Rückstände zersetzt und der organisch gebundene P gelangt wieder zurück in den Boden. Dort können die gelösten  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ - und  $\text{HPO}_4^{2-}$ -Ionen zum Teil erneut aufgenommen werden, zum Teil adsorbieren sie an Oxide und Tonminerale oder werden in Mikroaggregaten festgesetzt. Bei sehr hohen pH-Werten fallen diese als sekundäre calciumgebundene Minerale aus (AMELUNG ET AL. 2018B; SCHNUG UND HANEKLAUS 2016). Wie gut die Nachlieferung von P in die Bodenlösung funktioniert, ist dabei abhängig von einer ausreichenden Wasserversorgung, günstigen Temperaturen (>14 °C) und einer lockeren, tiefgründigen Struktur des Bodens. Zudem nimmt der pH-Wert (Optimum: pH 6) einen großen Einfluss auf die Diffusionsvorgänge (BAAB 2014).

Die einzelnen P-Fractionen der mineralischen und organischen Phase im Boden weisen unterschiedliche Pflanzenverfügbarkeiten auf (Abb. 1). Das in der Bodenlösung (organisch und anorganisch) vorliegende P ist für Pflanzen nahezu unmittelbar verfügbar, macht aber nur etwa <0,1% des gesamten Boden-P-Gehaltes aus (AMELUNG ET AL. 2018B). Die labile Fraktion besteht aus P, der nur schwach an Bodenpartikel adsorbiert ist, als leichtlösliches Calciumphosphat vorliegt oder rasch aus organischen Rückständen mineralisiert werden kann. Sie bildet den Grundstock an pflanzenverfügbarem P und dient während der Vegetationsperiode als Hauptlieferant (BAAB 2014; YLI-HALLA ET AL. 2016). Zu den schwer zugänglichen Fraktionen gehören P in Apatitmineralien und P, das an Eisen- und Aluminiumoxide adsorbiert oder in Aggregaten okkludiert ist (AMELUNG ET AL. 2018B; LAL UND STEWART 2017).



**Abb. 1: P-Kreislauf in naturbelassenen Böden** (modifiziert nach AMELUNG 2018B; EFMA 2000).

In allen Ökosystemen sequestrieren mit der Zeit labile Formen zu stabilen, schwer löslichen Formen, die nicht pflanzenverfügbar sind und zur temporären P-Begrenzung führen (SCHNUG UND HANEKLAUS 2016). Durch Evolutionsprozesse erfolgt jedoch eine Anpassung der Pflanzen(-Sukzessionen) an die veränderten Bedingungen, sodass es in der Regel zu keiner dauerhaften P-Limitierung des Systems kommt. Zu diesen Anpassungsmechanismen zählen eine verstärkte Ausscheidung von Wurzelexudaten, wie Protonen oder organische Säuren, wodurch der pH-Wert abgesenkt oder P direkt aus Mineralien freigesetzt wird. Zudem können die Wurzelmorphologie oder Stoffwechselprozesse an die veränderten Bedingungen angepasst werden. Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Zusammensetzung der Mikroorganismen in der Rhizosphäre. Durch günstige Kooperationen z.B. mit Mykorrhizapilzen kann zudem der Nährstoffaufschluss verbessert werden (AMELUNG ET AL. 2018B; BAAB 2014; KOLBE 2010). Der P-Kreislauf von landwirtschaftlichen Systemen ist, im Gegensatz zu natürlichen Systemen, häufig nicht geschlossen. Zum einen ist der Nährstoffbedarf von intensiv bewirtschafteten Agrarflächen enorm hoch, da ein maximaler Ertrag pro Fläche angestrebt wird. So benötigt eine ertragsreiche Weizenernte etwa das 100fache des in der Bodenlösung vorhandenen Ps ( $0,3-0,8 \text{ mg P l}^{-1}$ ) (AMELUNG ET AL. 2018B). Zum anderen kommt es durch die regelmäßige Abfuhr von Ernteprodukten und Rückständen zum P-Entzug (KILLICHES 2013). Die hohen P-Entzüge können in landwirtschaftlichen Systemen meist nicht durch natürliche Nachlieferungsprozesse, die abhängig vom Ausgangsgestein bei bis zu  $5 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  (AMELUNG ET AL. 2018B; FILIPPELLI 2017) liegen, gedeckt werden und führen langfristig zur Verarmung der Böden.

## 2.3 P-Düngung

Um dem entgegen zu wirken, ist eine bedarfsgerechte Düngung notwendig (EFMA 2000; KILLICHES 2013). Dafür wird zu Beginn der Vegetationsperiode die Nährstoffversorgung des Bodens ermittelt. In Deutschland geschieht dies in der Regel mit Hilfe der Calcium-Acetat-Lactat-Methode (CAL-Methode), einem quantitativen Extraktionsverfahren zur Ermittlung des potentiell pflanzenverfügbaren Ps im Boden (SCHÜLLER 1969). Die daraus resultierende Düngeempfehlung wird in  $P_2O_5$ -Äquivalenten angegeben und ist in Gehaltsklassen, die die Fruchtfolge, den Verbleib der Ernterückstände und die Bodenart mit ein von der LUFsbeziehungen (LWK 2015B), gegliedert. Die Gehaltsklassen unterteilen sich in fünf Stufen von „A“ sehr niedrig mit einer starken P-Unterversorgung des Bodens bis „E“ sehr hoch mit einer starken P-Überversorgung des Bodens (Tab. 1). Im konventionellen Anbau werden Nährstoffgehalte der Versorgungsstufe C angestrebt, sodass nur eine Erhaltungsdüngung notwendig ist (LWK 2015B). Hingegen gilt im ökologischen Landbau durch die um etwa 30% geringeren Erträge die Versorgungsstufe B als ausreichend (KOLBE 2010).

**Tab. 1: Richtwerte für die Gehaltsklassen** nach VDLUFA-Standpunkt, 2018

Gehaltsklasse	Alte Richtwerte (1997) mg $P_2O_5$ 100 g <sup>-1</sup> Boden	Neue Richtwerte (2018)
A	< 4,5	<3,4
B	4,5 – 9	3,4-6,9
C	10 – 20	7,0-13,8
D	21 – 34	13,9-27,5
E	> 35	>27,5

Seit Anfang des 20. Jahrhunderts wird P primär aus phosphorhaltigen Apatitmineralen gewonnen (KILLICHES 2013). Die wirtschaftlich bedeutendsten Lagerstätten befinden sich in den USA, Marokko sowie China und stellen zwei Drittel des globalen P-Bedarfs zur Verfügung (BGR 2014). Aufgrund der Importabhängigkeit der europäischen Staaten von diesem endlichen Rohstoff, wurde P 2017 von der EU als kritischer Rohstoff eingestuft (COM(2020) 474 final; KRÄMER 2019). Dabei beschränkt sich der Einsatz von P in West-Europa zu 79% auf die Produktion von landwirtschaftlichen Düngemitteln (EFMA 2000). Allein in Deutschland wurden im Wirtschaftsjahr 2020/21 insgesamt 192.182 t phosphorhaltige ( $P_2O_5$ ) Düngemittel vertrieben, wobei den größten Teil (86,6%) Mehrfachdünger (PK-, NP- und NPK-Dünger) ausmachten. Der Absatz von Einnährstoffdüngern beschränkte sich hingegen auf etwa 26.000 t  $P_2O_5$  (13,4%). Davon fielen etwa 2% auf das im konventionellen Anbau zugelassene mineralische, leicht lösliche Superphosphat (auch Triplesuperphosphat (*TSP*)), während weicherdiges Rohphosphat (*RP*), Rohphosphat mit wasserlöslichem Anteil, teilaufgeschlossenes Rohphosphat, Thomasphosphat, Dicalciumphosphat als auch Rohphosphat mit kohlensaurem Kalk zusammen 11% des Gesamtabsatzes in Deutschland ausmachten (DESTATIS 2021A).

Obwohl der Bedarf an P-haltigen Düngemitteln weltweit sehr unterschiedlich ist, nahm der Verbrauch im Erntejahr 2021 um 7% zu, mit steigender Tendenz (USGS 2022). Während in Schwellenländern die Böden aufgrund unzureichender Düngung häufig unterversorgt sind, nimmt der Verbrauch in Industrieländern seit einer intensiven Düngungsphase Ende des 20. Jahrhunderts stetig ab (AMELUNG ET AL. 2018B; EFMA 2000; MOTESHAREZADEH ET AL. 2017; YLI-HALLA 2016). So sank in Deutschland die Aufwandmenge an Reinnährstoff ( $P_2O_5$ ) in kg je ha landwirtschaftlich genutzter Fläche von 70,9 kg ha<sup>-1</sup> im Jahr 1979/80 auf 11,6 kg ha<sup>-1</sup> im Jahr 2020/21 (DESTATIS 2021A). Da viele Böden, die in der Vergangenheit reichlich mit P gedüngt wurden, den P-Bedarf der Pflanzen für ein optimales Wachstum decken oder sogar übertreffen, reagieren Pflanzen kaum direkt auf eine P-Düngung. Obwohl P ständig Prozessen unterworfen ist, die seine Löslichkeit auch bei hohem P-Status langsam verringern, können solche Böden Pflanzen über mehrere Jahrzehnte mit ausreichenden P-Mengen versorgen, wenn die externe P-Zufuhr gleich oder geringer ist als der P-Austrag durch die Ernteerträge (EFMA 2000; YLI-HALLA 2016).

### 2.3.1 P-Düngung im Ökolandbau

Dem ökologischen Landbau liegt ein ganzheitliches Bewirtschaftungskonzept mit möglichst geschlossenen Nährstoffkreisläufen zu Grunde (IFOAM 2000), sodass weitestgehend auf externe Betriebsmittel verzichtet werden kann. Zur Aufrechterhaltung der Bodenfruchtbarkeit und der Nährstoffversorgung der Kulturen wird u.a. auf den Anbau von Leguminosen in der Fruchtfolge gesetzt (vgl. 2.1). Durch die N<sub>2</sub>-Fixierung können Leguminosen eine erhebliche Menge N für die nachfolgenden Kulturen zur Verfügung stellen, wodurch temporär hohe Erträge erzielt werden können (COOPER ET AL. 2018). Zur Fixierung benötigen Bakterien neben dem Enzym Nitrogenase, welches nur in Umgebungen mit einem Mangel an gebundenem N vorliegt, auch P, Eisen (Fe), Magnesium (Mg), Schwefel (S) und Molybdän (Mo). Dabei wird P in Form von ATP zum Aufbrechen der sehr stabilen Dreifachbindung des atmosphärischen N<sub>2</sub> benötigt. Durch den hohen ATP-Verbrauch ist der N<sub>2</sub>-Fixierungsprozess extrem energiebedürftig und damit stark P-abhängig (KANDELER 2018).

Die innerbetriebliche P-Versorgung basiert dabei hauptsächlich auf der Wiederverwertung des im Betrieb vorhandenen Ps durch die Ausbringung von Stallmist, Kompost, Gründünger und Mulch als P-Quellen (LØES UND ØGAARD 2001). Nicht nur die zur Verfügung stehenden Nährstoffmengen, sondern auch der individuelle Nährstoffbedarf einer Pflanze nehmen Einfluss auf eine optimale Nährstoffversorgung (z.B. maximaler Ertrag). So unterscheiden sich Pflanzen hinsichtlich ihres externen P-Bedarfs. FÖHSE ET AL. (1988) zeigten in einer Studie mit sieben verschiedenen Kulturarten, dass der externe P-Bedarf insbesondere durch die P-Aufnahmeeffizienz der Pflanze (und nicht durch die P-Verwertungseffizienz) bestimmt wird. Die Aufnahme wird demnach durch die Zuflussrate und das Wurzel-Spross-Verhältnis bestimmt. So wiesen Kulturarten mit einer mittleren bis hohen P-Effizienz entweder eine hohe Zuflussrate

(Raps und Spinat) oder ein weites Wurzel-Spross-Verhältnis (Weidelgras und Weizen) auf. Für Weidelgras zeigte sich, dass dies auf ein großes Wurzelsystem zurückzuführen war.

Liegen niedrige P-Konzentration in der Bodenlösung vor, kommt es im Allgemeinen zu einer Adaptation der Pflanze. Um die P-Aufnahmeeffizienz zu verbessern, nimmt die Wurzelproduktion zu (ATKINSON 1973; HAYNES UND LUDECKE 1981; POWELL 1974). Dabei können, wie Untersuchungen mit Weißklee zeigen, Modifikationen der Wurzelmorphologie auftreten, sodass anstelle einer kräftigten Pfahlwurzel mehrere feine laterale Wurzeln gebildet werden (HAYNES UND LUDECKE 1981), um die Wurzeloberfläche und damit die P-Aufnahme zu vergrößern (POWELL 1974). Auch eine Studie von HOCKING UND RANDALL (2001) an Weißen Lupinen und Straucherbsen konnte phosphatmobilisierende Effekte für P-defiziente Böden nachweisen, wovon nicht nur die Kultur selbst, sondern auch nachfolgende Kulturen mit geringem P-Aufschließungsvermögen profitieren.

Durch die regelmäßige Entnahme von Ernteprodukten, der Zunahme an viehlosen Betrieben (LEITHOLD 2003) und Verlusten durch Erosion oder Auswaschung ist der Phosphorkreislauf auch im ökologischen Anbau häufig nicht geschlossen (HÖRTENHUBER ET AL. 2013, 2013; KILLICHES 2013). Es entsteht ein P-Defizit, das durch Dünger ersetzt werden muss. Geschieht dies nicht, können Prozesse, die sich direkt auf den Ertrag auswirken wie die  $N_2$ -Fixierung, die Photosyntheseleistung, der Biomasseaufbau oder die Mineralisierung von P aus Ernterückständen gehemmt werden (COOPER ET AL. 2018). Bis heute profitieren daher insbesondere ökologisch wirtschaftende Betriebe, die nicht auf schnelllösliche Mineraldünger wie TSP zurückgreifen können, von der langen Phase konventioneller Aufdüngung. Bislang ist die Versorgungslage mit pflanzenverfügbarem P meist noch ausreichend. So liegen etwa 50-60% des Acker- und Grünlandes in den Versorgungsklassen C-E und weitere 27-28% fallen auf die Versorgungsstufe B (KOLBE 2016). Dennoch besteht Handlungsbedarf, da seit 1980 ein Rückgang der jährlichen P-Bilanzüberschüsse um fast 80% v.a. durch den reduzierten P-Dünger Aufwand zu verzeichnen ist (AMELUNG ET AL. 2018B). So schwanken die absoluten P-Salden bundesweit von  $-16$  bis  $26 \text{ kg P ha}^{-1}$  pro Jahr, wobei die Salden der Bundesländer im Mittel negativ sind und bei  $-5 \text{ kg P ha}^{-1}$  und Jahr liegen (KOLBE 2016). Auf Grund der zu geringen P-Versorgung kommt es insbesondere bei „älteren“ Ökobetrieben zu enormen Ernteaussfällen. Demnach werden gegenwärtig die P-Vorräte in Böden nicht ausreichend aufrechterhalten, sodass längerfristig mit einer Zunahme an unterversorgten Flächen zu rechnen ist (LØES UND ØGAARD 2001).

Um das P-Defizit auszugleichen kann nach den Richtlinien der EU-Öko- Verordnung (EG Nr. 848/ 2018) nur eine begrenzte Menge an Rohphosphat oder organischen Düngemitteln aus externen Quellen zugeführt werden. Dabei wird primär auf eine organische Düngung durch die Ausbringung von Wirtschaftsdüngern wie Gülle, Jauche und Mist gesetzt. Wirtschaftsdünger sind Mehrnährstoffdünger, die neben P, auch N und K beinhalten, sodass eine nur auf P ausgerichtete Düngung nicht möglich ist. Die Nährstoffzusammensetzung der organischen Dünger variiert dabei abhängig von der Tierart und Fütterung sowie weiteren Faktoren wie dem

Haltungssystem oder der Lagerung (SCHAAF 1998). Der Einsatz von mineralischen Düngern ist auf biologisch bewirtschafteten Flächen ausschließlich in Form von weicherdigem Rohphosphat, welches v.a. bei pH-Werten über 6 schwerlöslich und daher kaum pflanzenverfügbar ist (LEITHOLD 2003; STEFFENS ET AL. 2005), möglich. Allerdings weist das aus Gestein gewonnene Primärphosphat häufig hohe Schwermetallbelastungen wie Cadmium (Cd) oder Uran (U) auf, die sich im Boden anreichern, in die Nahrungskette aufgenommen oder durch Auswaschung ins Trinkwasser gelangen können (TAYLOR ET AL. 2016).

Daher ist eine Alternative zu den bisher gängigen Düngemitteln und die Etablierung von geschlossenen P-Kreisläufen unerlässlich, um eine nachhaltige und ressourcenschonende Bewirtschaftung entsprechend des Grundgedankens des ökologischen Landbaus zu betreiben.

## 2.4 P-Recycling

### 2.4.1 Aktueller Stand und Aussichten für den Ökolandbau

P-Recycling-Dünger, die auch als P-Rezyklate bezeichnet werden, stellen eine vielversprechende Alternative zu herkömmlichen Düngemitteln dar und können aus Klärschlämmen, Schlachtabfällen oder Essensresten gewonnen werden (OHTAKE UND TSUNEDA 2019). Die meisten Verfahren befinden sich noch in der Entwicklungsphase und unterscheiden sich hinsichtlich ihres Etablierungspotentials (SCHIPPER 2019). Jährlich fallen etwa 432.000-667.000 t P durch Wirtschaftsdünger, Klärschlämme und Fleischknochenmehle an, sodass der Bedarf von 326.000-458.000 t P theoretisch gedeckt werden könnte. So wurden im Jahr 2010 bereits 33.000 t P in Form von Schlachtnebenprodukten und 12.000 t P in Form von Klärschlamm gedüngt (KRATZ ET AL. 2014). In Deutschland ist die direkte Klärschlammausbringung auf Grund von erhöhten organischen und anorganischen Schadstoffen wie Xenobiotika im Ökolandbau verboten (EUR-LEX 2021D) und nur unter bestimmten Voraussetzungen in der konventionellen Landwirtschaft erlaubt (ADAM UND KRÜGER 2013; MEYER UND STEINMETZ 2013; SCHNUG UND HANEKLAUS 2016). Hingegen sind Knochenmehle nach EU-ÖKO-Verordnung grundsätzlich zugelassen, werden jedoch durch die meisten deutschen Bio-Anbauverbände (z.B. Demeter, Bioland) ausgeschlossen (STEIN-BACHINGER ET AL. 2013). Die Ausbringung von Pflanzenkohle zur Bodenverbesserung ist wegen möglichen Belastungen mit polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) nur in geringen Mengen möglich (EUR-LEX 2021D).

Auf Grund der neuen Klärschlammverordnung liegt der Fokus in Deutschland vor allem auf der P-Rückgewinnung aus Klärschlamm (GÜNTHER ET AL. 2018). Die neue Verordnung sieht vor, dass ab dem Jahr 2032 bzw. 2029 und 50.000 bzw. 100.000 Einwohnerwerten die P-Konzentration des entwässerten Klärschlammes auf mindestens 20 g P je kg TM oder um 50% reduziert werden muss. Bei Unterschreitung der Grenzwerte, müssen zudem aus der Klärschlammmasche 80% des P zurückgewonnen werden (AbfKlärV 2017). Von der neuen Verordnung sind etwa 500 der 9.300 Anlagen in Deutschland betroffen, die fast 70% des Abwassers aufbereiten (HOPPENHAUS 2021; KABBE 2017). Zudem werden ab Juli 2022 erstmals Phosphatsalze (auch Struvit genannt) sowie thermisch oxidierte und pyrolysierte Materialien, die aus

Klärschlamm und anderen Ausgangsubstraten wie tierischen Nebenprodukten hergestellt werden, in die EU-Düngemittelverordnung aufgenommen (EUR-LEX 2021A, 2021B, 2021C) Damit steht der Verwendung von P-Recyclingdüngern im konventionellen Anbau nichts mehr entgegen, was eine wichtige Voraussetzung für die Etablierung im ökologischen Landbau ist. Dabei kommt es nicht nur auf die gesetzliche Zulassung, sondern auch auf die Akzeptanz innerhalb der Landwirtschaft an. Untersuchungen zeigen, dass einige Bio-Verbände wie Bioland, Naturland e.V. und Biopark e.V. prinzipiell offen gegenüber alternativen P-Rezyklaten sind, wobei sie neben der Wirksamkeit einen besonderen Wert auf eine geringe Schwermetallbelastung und einen niedrigen Energieeinsatz während der Herstellung legen (KRAUS ET AL. 2019A; KRAUS ET AL. 2019B).

## 2.4.2 Herstellungsprozesse und Eigenschaften von P-Recyclingdüngern

Nachfolgend werden ausgewählte P- Recyclingdünger und ihre P-Rückgewinnungsverfahren vorgestellt. Zudem wird auf ihren aktuellen Umsetzungsmaßstab, die P-Schöpfungsquellen und soweit bekannt auf wirtschaftliche Aspekte der Verfahren eingegangen. Da bis auf eine Ausnahme alle Produkte aus der Abwasseraufbereitung stammen, wird zum besseren Verständnis der Aufbau und der Ablauf einer dreistufigen Kläranlage beschrieben und in Abb. 2 dargestellt. Anschließend werden die dort gekennzeichneten Ansatzpunkte der einzelnen Verfahren zur P-Rückgewinnung genauer erläutert.

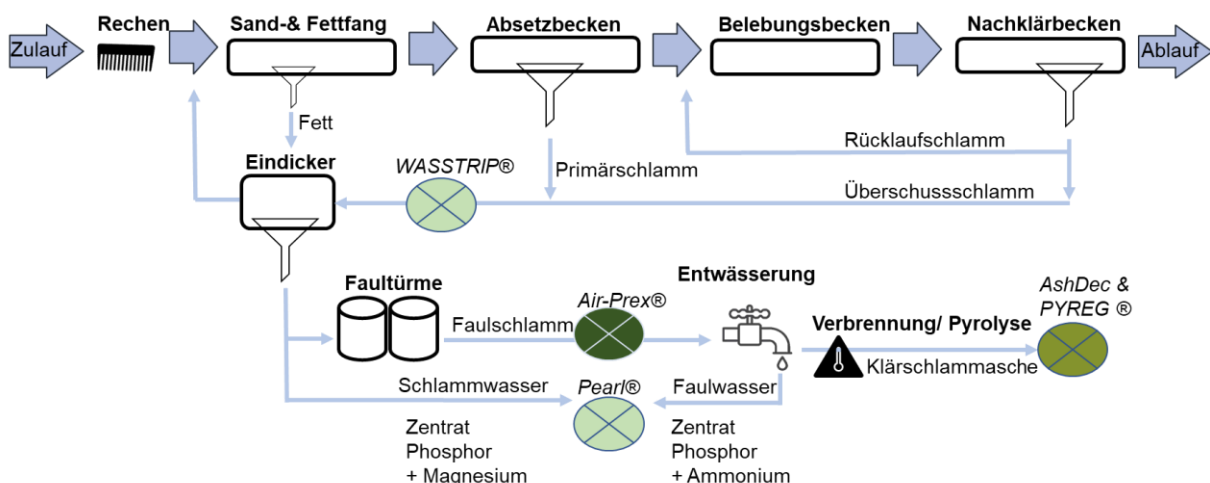
Eine Kläranlage besteht aus mehreren Abwasserreinigungsstufen. Dazu gehören in der Regel eine mechanische, eine biologische und eine chemische Reinigung der Abwässer. Ausnahmen bilden biologische Kläranlagen, die auf Grund einer Bio-P Entfernung keine chemische Reinigungsstufe benötigen. Neben der Reinigung des Abwassers in der Wasserlinie, erfolgt eine Aufarbeitung der festen Rückstände in der Schlammlinie. Für die (Rück-) Gewinnung von P spielt vor allem die Schlammlinie eine entscheidende Rolle.

Bei der mechanischen Reinigung werden alle Fest- und Schwimmstoffe entfernt. Dafür werden in der Rechenanlage zunächst Grobstoffe über Rechen abgetrennt. Im Sand- und Fettfang setzen sich größere mineralische Stoffe wie Sand am Boden ab, während sich leichtere Schwimmstoffe wie Fette auf der Oberfläche sammeln und entfernt werden können. Im Absetzbecken wird die Strömungsgeschwindigkeit herabgesetzt, sodass nun auch leichtere Partikel am Boden sedimentieren. Die festen, abgesetzten Stoffe werden auch als Primärschlamm bezeichnet und der Schlammlinie zugeführt (ANDERS ET AL. 2021; NOWAK 1993).

Nach der mechanischen Reinigung erfolgt im Belebungsbecken mit Hilfe des Belebtschlammverfahrens die biologische Abwasserreinigung. Dabei werden organische Verbindungen v.a. N-Verbindungen von Bakterien und anderen Mikroorganismen abgebaut, sodass sie als Feststoff oder Gas aus dem Abwasser entfernt werden können (MATSCHÉ 1973; NOWAK 1993; WUHRMANN 1964). In biologischen Kläranlagen findet parallel zur N-Entfernung auch eine

Bio-P Eliminierung statt, wobei gelöste Orthophosphate bei Wechsel von aeroben und anaeroben Bedingungen von speziellen Mikroorganismen als Polyphosphate in ihre Zellen eingebaut werden und den Belebtschlamm bilden. In Deutschland findet zur P-Entfernung in den meisten Kläranlagen stattdessen eine chemische Abwasserreinigung (Chem-P) durch die Zugabe von Fällungsmitteln statt. Die im Fällungsmittel enthaltenen Metallionen gehen mit den P-Ionen eine wasserunlösliche Verbindung ein und fällen aus. Bei beiden Verfahren (Chem- und Bio-P) entsteht ein p-haltiges Schlammwassergemisch, das in die Nachklärbecken geleitet wird und sich dort als Schlamm am Boden absetzt (ANDERS ET AL. 2021; UBA 2007). Dieser wird zum einen als Rücklaufschlamm dem Belebungsbecken zugeführt und zum anderen als Überschussschlamm abgeschieden und der Schlammlinie zugeführt. Das überschüssige Wasser ist nun gereinigt und gelangt über einen Ablauf in den Vorfluter.

Der Schlamm aus dem Reinigungsprozess (Primär- und Überschussschlamm) und das Fett aus dem Fettfang werden der Schlammlinie zugeführt (ANDERS ET AL. 2021). Im Eindicker wird das überschüssige Wasser abgezogen und das Volumen des Schlammes weiter reduziert. Von dort gelangt der Schlamm zur anaeroben Schlammfäulung in die Faultürme. Bei etwa 35-40 °C durchläuft der Schlamm nun zwei Prozesse (MIESKE 2018; NOWAK 1993). Im ersten Prozess, der sauren Gärung, werden hochmolekulare Stoffe wie Fette, Kohlenhydrate und Proteine zu einfachen organischen Verbindungen wie Alkohol und Kohlensäure aufgespalten. Im zweiten Prozess, der Methangärung, werden diese Verbindungen durch Bakterien zu Methan und Kohlenstoffdioxid umgewandelt. Die Kohlensäure aus der sauren Phase und das Methan aus der Methanphase sind gasförmig und bilden das Faulgas, welches als Biogas thermisch oder elektrisch genutzt werden kann (ANDERS ET AL. 2021; MIESKE 2018; NOWAK 1993). Nach der Fäulung wird der Klärschlamm entwässert und kann nun entsorgt werden. Das gewonnene Faulwasser, welches einen hohen Ammoniumgehalt besitzt, wird wieder der Abwasserlinie zugeführt (MIESKE 2018).



**Abb. 2: Aufbau und Ablauf einer dreistufigen Kläranlage.** Der Abwasserreinigungsprozess ist unterteilt in eine Wasser- (dicke blaue Pfeile) und eine Schlammlinie (dünne blaue Pfeile). Die P-Schöpfungsquellen innerhalb dieses Prozesses sind durch Kreise markiert und nach ihren Herstellungsverfahren unterteilt: WASSTRIP®- und Pearl®-Verfahren (hellgrün; für Crystal Green), AshDec- und PYREG®-Verfahren (mittelgrün) und Air-Prex®-Verfahren (dunkelgrün, für Berliner Pflanze).



## Chemische P-Aufbereitung (Struvite)

### *Berliner Pflanze®*

Zur Gewinnung des recycelten P-Düngemittels Berliner Pflanze® (*BP*) wird das patentierte Air-Prex®-Verfahren angewendet. Dieses setzt im Abwasserreinigungsprozess bereits nach der Schlammfäulung im Faulturm (vor der Entwässerung) an (Abb. 2) und kann daher unkompliziert in den bestehenden Ablauf der Kläranlage integriert werden. Voraussetzung für die Anwendung dieses Verfahrens ist eine biologische Phosphoreliminierung des Schlammes. Durch die anaerobe Fäulung wird der Phosphor von Mikroorganismen im Klärschlamm gebunden (DPP 2019A). Der gewonnene Faulschlamm gelangt von dort in einen Reaktor, wo er kontrolliert belüftet (CO<sub>2</sub>-Strippung) wird. Die Entweichung von CO<sub>2</sub> führt zu einer enormen Erhöhung des pH-Wertes auf pH 7,8 – 8,2 (ORTWEIN 2016). Die Zugabe von Fällungsmitteln wie MgCl<sub>2</sub> bewirkt eine Auskristallisation und anschließende Sedimentation von Struvit-Kristallen (Magnesiumammoniumphosphaten, MAPs) am Reaktorboden. Diese können abgetrennt, gereinigt und als Düngemittel weiter verarbeitet werden (DPP 2019A; ORTWEIN 2016). Die so gewonnene Berliner Pflanze® ist seit 2008 als hochwertiger mineralischer Langzeitdünger nach EU-Düngemittelverordnung (VO 2003/2003) zugelassen (BWB 2021). Der Gehalt an P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> im Düngemittel beträgt 23% (BWB 2013) bei einer Rückgewinnungsrate von etwa 5-12% bezogen auf die P-Fracht im Zulauf (ERNST BASLER + PARTNER AG 2017; HEINZMANN UND LENGEMANN 2021). Das Air-Prex®-Verfahren wurde großtechnisch in den Wasserwerken Berlin Waßmannsdorf erprobt. Insgesamt existieren acht Anlagen in Europa, davon alleine sechs in Deutschland (ORTWEIN 2016). *BP* wird im Kundenzentrum der Berliner Wasserwerke für etwa 2 Euro pro Kilo für die Landwirtschaft, den Gartenbau und zur privaten Nutzung vertrieben (BWB 2021).

### *Crystal Green®*

Zur Gewinnung von Crystal Green® (*CG*) wird das Pearl® -Verfahren, häufig in Kombination mit dem WASSTRIP<sup>1</sup>-Verfahren, von Ostara angewendet. Dabei ist die Verfahrenstechnik vergleichbar mit dem Air-Prex®-Verfahren zur Herstellung von Berliner Pflanze®. So ist ebenfalls eine biologische P-Eliminierung Voraussetzung (ERNST BASLER + PARTNER AG 2017), allerdings wird als Ausgangssubstanz Schlammwasser (Zentrat) und Faulwasser (Zentrat) anstelle von Faulschlamm genutzt (Abb. 2). Vor der anaeroben Fäulung kann das WASSTRIP-Verfahren zur Erhöhung der Rückgewinnungsrate integriert werden. Dieses verwendet Überschussschlamm und ca. 20% des Primärschlammes zur beschleunigten P-Rücklösung (UBA 2019). Der Primärschlamm beinhaltet dabei einen hohen Gehalt an leicht verfügbaren Kohlenstoffen, die Mikroorganismen - neben einem sauren Milieu - zur Abgabe der Nährstoffe (Mg

---

<sup>1</sup> Waste Activated Sludge Stripping to Remove Internal Phosphorus

und v.a. P) in die wässrige Phase benötigen. Anschließend wird der Überschussschlamm eingedickt, sodass ein wässriges (ortho-) phosphatreiches Zentrat entsteht und dem Pearl-Reaktor® zugeführt werden kann (KRAUS ET AL. 2016). Der eingedickte Überschussschlamm gelangt in einen Faulurm für die anaerobe Faulung. Nach der Faulung erfolgt eine weitere Entwässerung, wodurch ein ammoniumreiches Zentrat entsteht (KRAUS ET AL. 2016). Dieses Zentrat wird ebenfalls dem Pearl-Reaktor zugeführt und mit dem phosphatreichen Zentrat vermischt (ADAM 2018; HOLM ET AL. 2018; UBA 2019). Im Reaktor wird zu dem Zentrat-Gemisch Natronlauge (NaOH) zur pH-Regulierung und Magnesiumchlorid ( $MgCl_2$ ) zur Struvit-Fällung (DPP 2018) hinzugegeben. Es bilden sich granulatformige Kristalle, die in ihrem Durchmesser durch Rezirkulation bis zu einer erforderlichen Standardgröße heranwachsen. Diese sinken auf den Reaktorboden ab, wo sie geerntet und anschließend getrocknet werden (DPP 2018). Auf der größten Anlage (4,5 Mio Einwohnerwerte) fallen etwa 19 t Struvit (=2.413 kg P) am Tag an. Das erhaltene Struvit wird als bereits marktfähiges Produkt CrystalGreen® in vier verschiedenen Granulatgrößen vertrieben. Es entspricht der EU-Düngemittelverordnung (VO 2003/2003) und enthält 28%  $P_2O_5$  (12,6% P), sowie 5% N und 10% Mg (OSTARA 2016). Die Rückgewinnungsrate des Verfahrens liegt bei 10-15% (ERNST BASLER + PARTNER AG 2017).

Sowohl das Air-Prex®- als auch das Pearl®-Verfahren sind chemische Verfahren zur Gewinnung von Struvit-Produkten, die in bestehende Bio-P Anlagen integriert werden können. Im Gegensatz zu anderen Produkten sind Struvite nicht wasserlöslich, sondern werden durch Pflanzenexsudate aktiviert. Nährstoffe werden nur dann freigesetzt, wenn die Pflanze diese benötigt, wodurch Auswaschungen und Oberflächenabfluss verringert werden können (OSTARA O.J.). Weitere Vorteile sind die Vermeidung von Struvit- Ablagerung in den Faulräumen von bis zu 90% (EWERT UND WAGENBACH 2014; HEINZMANN UND LENGEMANN 2021; OSTARA O.J.), wodurch die Betriebs- und Instandhaltungskosten gesenkt werden können. Zudem wird die Entwässerungsfähigkeit des Klärschlammes um bis zu 4% verbessert, sodass die Gesamtmenge an Klärschlamm um 10 bis 20% reduziert werden kann (ADAM 2018; OSTARA O.J.) und Kosten für die Klärschlammensorgung eingespart werden können (ORTWEIN 2016). Der entwässerte Klärschlamm kann anschließend zur energetischen Nutzung weiterverwendet werden. Zudem wird die Belastung mit organischen Schadstoffen und Schwermetallen als gering eingestuft (KRAUS ET AL. 2019B).

## Thermische P-Aufbereitung (Aschen und Karbonisate)

### *AshDec*

Das AshDec-Verfahren (AD) wurde von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) 2003 vorgestellt und mit der AshDec GmbH und weiteren Kooperationspartnern im EU-Projekt SUSAN (Sustainable and safe re-use of municipal sewage sludge for nutrient recovery) weiter entwickelt (ADAM 2017). Es ist ein thermochemisches Verfahren zur Rückgewinnung

und zum Recycling von P aus Klärschlammasche (Abb. 2) und anderen phosphatreichen Biomasseaschen, wie z.B. Gülle, Hühnerstreu, Reste aus der anaeroben Faulung oder Schlachthofabfällen (DPP 2019B).

Nach einer Monoverbrennung weisen diese Aschen zwar einen hohen P-Gehalt von 8-13 % auf (BAM 2021A), enthalten jedoch auch Schadstoffe (v.a. Schwermetalle) und sind zudem schlecht pflanzenverfügbar. Deshalb erfolgt im Rahmen des AshDec-Verfahrens eine Nachbehandlung der Aschen, um die Pflanzenverfügbarkeit zu erhöhen und die Schwermetallgehalte zu reduzieren. In einem Drehrohrenreaktor wird die Asche bei Temperaturen von 850-950 °C erhitzt und mit Additiven wie Magnesium- oder Calciumchloriden versetzt. Dabei gehen einige Schadstoffe wie Arsen, Cadmium und Blei als Schwermetallchloride in die Gasphase über und können vom Feststoff abgetrennt und anschließend über ein Abgasreinigungssystem entfernt werden. Parallel dazu bilden sich neue P-Verbindungen wie Magnesium-Calcium- und Magnesiumphosphate, die für die Pflanze besser verfügbar sind als die in der Ausgangssubstanz enthaltenen Aluminium- und Calciumphosphate (ADAM UND KRÜGER 2013).

Die an der Entwicklung beteiligte Firma Outotec GmbH (ehemals AshDecUmwelt AG, Wien) hat eine Modifikation des ursprünglichen AshDec-Verfahrens vorgenommen. Als Additive werden anstelle von Magnesium- und Calcium-Chloriden nun Kalium- oder Natriumsalze (z.B. Natriumsulfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )) hinzugegeben. Durch Hitze werden diese alkalischen Verbindungen zersetzt, sodass Kalium- und Natriumionen freigesetzt werden. Diese ersetzen die Calciumionen in den Phosphaten und es entsteht die neue Verbindung Calcium-Natrium-Phosphat ( $\text{CaNaPO}_4$ ), die auch als Rhenaniaphosphat bezeichnet wird. Die freien Ca-Ionen reagieren mit den in der Asche enthaltenen Siliziumoxiden zu Calciumsilikaten. Im Gegensatz zum ursprünglichen AshDec-Verfahren werden hier Schwermetalle nicht mit Hilfe von Schwermetallchloriden, sondern unter reduzierenden Bedingungen über die Festphase abgeschieden (HERMANN UND SCHAAF 2019).

Eine Rückgewinnungsrate von bis zu 95% kann durch dieses Verfahren erzielt werden (DPP 2019B). Dabei liegt der P-Gehalt im Endprodukt je nach Ausgangsmaterial bei 15-25% (HERMANN UND SCHAAF 2019). Bisher ist dieses Verfahren im Labor- und Semiindustriellenmaßstab (Pilotanlage in Leoben, Österreich) umgesetzt worden. Eine großtechnische Demonstrationsanlage in Altenstadt in Bayern ist im Rahmen des R-Rhenania-Projektes (2020-2025) mit einem Volumen von 30.000 t Klärschlammasche pro Jahr geplant (BAM 2021B).

### **PYREG®**

Das PYREG®-Verfahren (PY) ist ein thermischer Aufschluss von Klärschlammasche (Abb. 2), kann aber auch für andere Ausgangsprodukte wie Tier- und Knochenmehle eingesetzt werden (ERNST BASLER + PARTNER AG 2017). Der Klärschlamm muss zunächst auf 80% Trockensubstanzgehalt getrocknet und entwässert werden, bevor er weiterverarbeitet werden kann

(PYREG GMBH 2019). Der vorgetrocknete Klärschlamm wird anschließend in einer Monokarbonisierung unter Sauerstoffausschluss bei 500-700 °C im PYREG®-Reaktor verkohlt (langsame vollständige Pyrolyse). Dieser Prozess läuft autotherm ab d.h. nur eine geringe initiale Energie ist notwendig. Nachfolgend wird der Energiebedarf für das Verfahren vollständig durch die im Klärschlamm enthaltene Energie gedeckt (PYREG GMBH 2019). Es wird eine phosphatreiche und nach Angaben des Herstellers eine gut pflanzenverfügbare Asche gewonnen. Die durch die Karbonisierung entstehenden Brenngase werden in eine Brennkammer abgeleitet. Dort werden sie bei 1000 °C thermisch nach dem Flox-Verfahren flammenlos oxidiert bevor sie abkühlen können, sodass keine Schadstoffe wie Teere oder Öle entstehen (KRÄMER 2019; PYREG GMBH 2019). Das Gas wird zudem über ein Abgasreinigungssystem gewaschen und flüchtige Stoffe über einen Aktivkohlefilter gebunden. Die dabei entstehende Abwärme beträgt bis zu 150 KW<sub>th</sub> pro Anlagemodul und kann als Energiequelle für die vorgeschaltete Trocknung von Klärschlamm eingesetzt werden (KRÄMER 2019; PYREG GMBH 2019).

Die durch das PYREG®-Verfahren erhaltene schwarze Biokohle hat einen Trockensubstanzgehalt von 98% und kann ohne chemischen Aufschluss direkt als Düngemittel verwendet werden (APPEL UND FRIEDRICH 2017). Sie hat je nach Ausgangsmaterial einen P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Gehalt von 10-20%. Mit einer Rückgewinnungsrate von über 90% können pro PYREG-Modul im Jahr bis zu 1.400 t Klärschlamm verwertet und daraus 500 t phosphathaltiges Karbonisat (zurück-)gewonnen werden (ERNST BASLER + PARTNER AG 2017; KRÄMER 2019). Durch den Einsatz dieses Verfahrens kann die Klärschlammmenge um bis zu 90% reduziert werden. Bisher existieren sechs PYREG®-Anlagen für Klärschlammverwertung im industriellen Maßstab in Deutschland (u.a. in Dörth und Linz-Unkel bei Bonn) und Europa. Zudem sind 24 weitere Anlagen für unterschiedliche Biomassen als Ausgangsstoff in Betrieb (APPEL UND FRIEDRICH 2017; PYREG GMBH 2019).



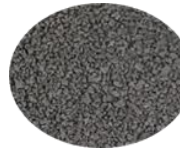


### *Knochenkohle<sup>Plus</sup>*

Der Einsatz von Knochen und Knochenmehl ist aufgrund seiner hohen Konzentrationen an P, Ca und Mg (PANTEN UND LEINWEBER 2020) seit Ende des 18. Jahrhunderts ein bewährtes Mittel zur Düngung von Pflanzen (ULLMANN 1894). Nach der europaweiten bovinen spongiformen Enzephalopathie (BSE)-Krise wurde die Verfütterung von Fleisch- und Knochenmehlen im Jahr 1994 in der EU untersagt (SPIEGEL 2000). Im Gegensatz dazu ist unter bestimmten Bedingungen die Verwendung als Düngemittel nach EG-Öko-Verordnung (EWG Nr. 2092/91 und EG Nr.834/2007 Artikel 16 Absatz 3) weiterhin erlaubt (MULNV 2013), wird aber auf Grund der BSE-Problematik von den ökologischen Anbauverbänden i.d.R. ausgeschlossen (SCHEHKAHN UND JOSTES 2010). Die Universität zu Rostock hat in Zusammenarbeit mit weiteren Firmen eine kontaminationsfreie Alternative zu herkömmlichen Fleischknochenmehlen entwickelt. Dafür werden ausschließlich entfettete Tierknochen aus Schlachtabfällen, d.h. Knochen ohne die Fleischkomponente, auf der sich humane Pathogene gut entwickeln können, verwendet (PANTEN UND LEINWEBER 2020). Diese werden von der Firma Sonac (Vuren, Niederlande) zu

Knochenchips vermahlen und unter Sauerstoffausschluss pyrolysiert. Die Pyrolyse wird von den Firmen MEE GmbH (DE, Schwerin) und PYREG GmbH (Dörth) durchgeführt. Durch die hohen Temperaturen von 400-500 °C wird das Knochenmaterial hygienisiert (HAUBOLD-ROSAR ET AL. 2016) und es entsteht Knochenkohle. Eine Studie von WARREN ET AL. 2009 über die Lösung von P aus Tierknochenkohle in 12 Böden zeigte, dass die Freisetzung von P stark vom Boden-pH abhängig ist und eine P-Mobilisierung nur unter sauren Bedingungen stattfindet. Zur Verbesserung der P-Löslichkeit wird die Knochenkohle daher nach der Pyrolyse als Filtermaterial in eine Biogasanlage eingesetzt. Dort nimmt sie gasförmige Schwefelverbindungen aus dem Biogas auf. Das entsprechende Verfahren wurde durch BURGSTALER ET AL. als Patent DE102011010525 angemeldet. Die dadurch entstehenden reduzierten S-Verbindungen werden im Boden zu Sulfat oxidiert und entfalten eine Säurewirkung, wodurch Calciumphosphate besser aus dem Knochenmaterial extrahiert werden können (PANTEN UND LEINWEBER 2020; ZIMMER ET AL. 2019). Das „Plus“ im Namen steht demnach für die Aufnahme von S-Verbindungen. Die Herstellung von Knochenkohle<sup>Plus</sup> (KK) erfolgt bislang nur in einer Pilotanlage, sodass es bisher weder Kostenaufstellungen, noch standardisierte und homogene Zusammensetzungen oder Rückgewinnungsraten gibt. Die von der Uni Rostock zur Verfügung gestellte Charge für das hier vorgestellte Projekt enthielt 18,33% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Nachfolgend sind die einzelnen Produkttypen der fünf zu testenden Produkte (Crystal Green®, Berliner Pflanze®, PYREG®, AshDec und Knochenkohle<sup>Plus</sup>), ihre Verfahrenstechnik und soweit vorhanden die Rückgewinnungsraten, die N- und die P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Gehalte der Endprodukte aufgeführt. Zudem wurden der aktuelle Produktionsmaßstab und die Textur betrachtet (Tab. 2).

**Tab. 2: Übersicht über die Recycling-Dünger:** Ausgangsstoffe, Rückgewinnungsraten, N/P-Gehalte, Maßstab und Textur

Produkttyp	Struvite		Aschen & Karbonisate		
<b>Name</b>	<b>Crystal Green®</b>	<b>Berliner Pflanze®</b>	<b>PYREG®</b>	<b>AshDec</b>	<b>Knochenkohle<sup>Plus</sup></b>
<b>Ausgangsstoff</b>	Klärschlammwasser	Klärschlamm	Getrockneter Klärschlamm	Klärschlamm- asche	Knochenchips
<b>Verfahrenstechnik</b>	Chemische P-Aufbereitung		Thermische P-Aufbereitung		
<b>Rückgewinnungsrate</b>	10-15%	5-12%	<90%	95%	-
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Gehalt</b>	25-28%	23%	10-20%	15-25%	18,33%
<b>N-Gehalt</b>	5%	5%	-	-	-
<b>Maßstab</b>	14 Anlagen (4 in Europa)	8 Anlagen (6 in DE)	6 Anlagen (Klärschlamm)	Anlage in Planung	Pilotanlage
<b>Textur</b>					

### 3. Zielsetzung der Arbeit

Das Projekt „Öko-P: Alternative Phosphordünger (P-Rezyklate) zur Ertragssteigerung von Leguminosen und Getreide im Ökologischen Landbau“ wurde durch die Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen in Kooperation mit dem Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz (INRES) - Abteilung für Agrarökologie und organischer Landbau (AOL) der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn und der Technischen Hochschule Bingen durchgeführt. Die vorliegende Arbeit untersucht im Rahmen des Projektes den Effekt neuer phosphorhaltiger Recyclingdüngeprodukte (P-Rezyklate) aus Klärschlamm und aus Schlachtabfällen (Knochenmehl) auf die Nährstoffgehalte und Ertragsentwicklung von praxisüblichen Kleegrasmischungen im Ökolandbau.

Dabei stand die Beantwortung der nachfolgenden Fragen im Fokus:

- Wie unterscheiden sich die einzelnen P- Recyclingdünger in Bezug auf Herstellungsverfahren, Zusammensetzung, Wirksamkeit und Zulassung?
- Welchen Einfluss haben die verschiedenen P-Recyclingdünger auf den Ertrag und die Nährstoffaufnahme, insbesondere die P-Aufnahme, von Klee gras?
- Wie unterscheiden sich die P-Recyclingdünger in ihrer Wirkung von Triplesuperphosphat und Rohphosphat?

## 4. Material und Methoden

Die Versuchsanlage erfolgte zur Klärung der Versuchsfragen im Jahr 2021 an zwei ausgewählten ökologisch-wirtschaftenden Pilotbetrieben mit Phosphormangelböden in NRW. Diese Arbeit fokussiert sich auf Klee gras als Teilversuch des Projektes.

### 4.1 Versuchsstandorte

#### *Biolandhof Kroll-Fiedler (KF)*

Am Südhang des Haarstrangs, zwischen der Soester Börde und dem Sauerland, liegt auf 303 m über NN (MAPCOORDINATES 2021) der Biolandhof Kroll-Fiedler (KF) (51°30'11.1"N 8°19'60.0"E). Im Jahr 1989 wurde der Betrieb nach den Biolandrichtlinien auf den ökologischen Landbau umgestellt (KROLL-FIEDLER 2021). Der familiengeführte Betrieb ist seit etwa 60 Jahren auf die Milchviehhaltung spezialisiert. Dabei setzt er auf die Doppelnutzungsrassen Schwarzbuntes und Rotbuntes Niederungs rind, die sowohl für die Milchproduktion und als auch zur Fleischerzeugung genutzt werden. Die Herdenstärke beläuft sich auf etwa 80 Kühen und ihren Jungtieren (KROLL-FIEDLER 2021). Auf einer Fläche von 85 ha erfolgt neben der Viehhaltung auch der Anbau von Futterpflanzen für die Tierhaltung als auch der Anbau von Marktfrüchten wie Dinkel, Weizen und Lupinen. Der Versuch wurde auf dem auf einer Kuppe gelegenen Feldstück „Am Haar“ angelegt. Der Boden ist ein schluffiger Lehm (Lu) mit 42 Bodenpunkten, auf dem zuvor Klee gras stand, welches im Herbst des Vorjahres (November) umgebrochen wurde. Im Vorjahr wurde die Fläche beweidet, anschließend erfolgte eine Düngung mit 2 kg m<sup>-2</sup> Gärresten.

#### *Biolandhof Weber-Berres GbR (W)*

Der Familienbetrieb Weber-Berres GbR (W) ist mit 350 m über NN (MAPCOORDINATES 2021) etwas höher gelegen als der Standort KF und befindet sich in Warstein im Stadtteil Suttrop (51°26'49.4"N 8°21'56.0"E). Im Jahr 2001 erfolgte die Umstellung auf den ökologischen Landbau mit Bioland-Zertifizierung. Auf schluffigem Lehm (Lu) mit 47 Bodenpunkten wird auf einer Fläche von 125 ha zu gleichen Teilen Milchvieh- und Ackerbau betrieben (LWK 2021). Zu den Kernaufgaben gehören Futterbau, Grünland, Getreidebau, Hülsenfrüchtebau, Silomais und die Rinderaufzucht mit einer Herdenstärke von etwa 90 rotbunten Niederungs rindern (KROLL-FIEDLER ET AL. 2018). Der Versuch wurde auf dem flachen Feldstück „An der Lusen burg“ angelegt. Auf der Versuchsfläche von 1620 m<sup>2</sup> standen zuvor aufeinanderfolgend Roggen, Erbsen und Klee gras. Im Vorjahr erfolgte eine Düngung mit betriebsinterner Gülle, die sich aus 38,89 kg ha<sup>-1</sup> N, davon 18,9 kg ha<sup>-1</sup> NH<sub>4</sub> und 15,6 kg ha<sup>-1</sup> P zusammensetzte.



### 4.1.1 Boden

Auf den potentiellen Versuchsfeldern wurden im Winter 2020/2021 mit einem Erdbohrstock nach Pürckhauer Bodenproben aus einer Tiefe von 30 cm genommen. Diese dienten der Bodentyp-, Nährstoff- und Schwermetallbestimmung der Flächen. Zusätzlich wurden im Frühjahr 2021 für die NMin-Bestimmung Proben in den Tiefenstufen 0-60 und 0-90 cm genommen, um eine ausreichende Nährstoffversorgung des Bestandes während der Vegetationsperiode gewährleisten zu können. Der Nmin-Wert für den Standort KF lag bei 131 kg ha<sup>-1</sup> und für den Standort W bei 58 kg ha<sup>-1</sup>. Die Laboruntersuchungen wurden alle von der Landwirtschaftlichen Untersuchungs- und Forschungsanstalt (LUFA) NRW durchgeführt.

Für die Bodentypbestimmung wurden die einzelnen Bestandteile der Bodenproben nach ihrer Korngröße in mm eingeteilt (Tab. 3). Die Korngröße ist maßgeblich für die Einteilung der Probe in ihre Ton-, Schluff- und Sandbestandteile. Die Analyse der Korngrößenverteilung der beiden Standorte ergab für beide Standorte den Bodentyp schluffiger Lehm (Lu).

**Tab. 3: Korngrößenverteilung des Bodens [mm] und dessen Zusammensetzung [%]**

Korngrößenverteilung	Zusammensetzung [%]	
	Kroll-Fiedler	Weber
%Ton (<0,002 mm)	27,1	25,8
%Schluff (0,002 - 0,063 mm)	59,0	50,3
%Sand (0,063 - 2,0 mm)	10,0	24,0

Die Böden der beiden Flächen wurden auf ihren pH-Wert und ihre Nährstoffzusammensetzung parzellengenau untersucht (Anhang I.I, I.II) und die Mittelwerte der einzelnen Wiederholungen (Tab. 4) bestimmt. Der pH-Wert lag am Standort KF im Durchschnitt bei 6,5 und am Standort W bei 5,3. Zu den Untersuchungsparametern zählte zudem die Konzentrationsbestimmung von Kaliumoxid (K<sub>2</sub>O), Magnesium (Mg), Kupfer (Cu), Zink (Zn), Mangan (Mn), Bor (B) und Diphosphorpentoxid (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>).

**Tab. 4: Durchschnittliche Nährstoffkonzentrationen und pH-Werte der Versuchsfeldern**

	pH-Wert	K <sub>2</sub> O (mg 100 g <sup>-1</sup> Boden)	Mg (mg 100 g <sup>-1</sup> Boden)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg 100 g <sup>-1</sup> Boden)	P-Nachlieferungs- potential
<b>Kroll-Fiedler</b>					
FF1A	6,5	18,0	7,6	5,0	niedrig
FF1B	6,4	17,6	7,6	4,8	niedrig
FF1C	6,5	14,9	7,8	4,8	niedrig
FF1D	6,5	16,3	7,8	5,1	niedrig
Ø FF1	<b>6,5</b>	<b>16,7</b>	<b>7,7</b>	<b>4,9</b>	-
<b>Weber</b>					
FF1A	5,3	3,9	5,6	2,0	mittel
FF1B	5,2	3,6	5,4	2,0	mittel
FF1C	5,4	3,6	5,6	2,0	mittel
FF1D	5,4	4,1	5,8	2,0	hoch
Ø FF1	<b>5,3</b>	<b>3,8</b>	<b>5,6</b>	<b>2,0</b>	-

Dabei wurde der  $P_2O_5$ -Gehalt mit der CAL-Methode nach SCHÜLLER (1969) bestimmt. Voraussetzung für die Aufnahme in das Öko-P Projekt waren P-defiziente Böden, sodass für das Projekt ein Grenzwert von  $P \leq 5 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$  Boden festgelegt wurde, den beide Standorte erfüllten (Tab. 4). Die bei der Bodenuntersuchung ermittelten P-Gehalte wurden zudem anhand von Gehaltsklassen hinsichtlich des P-Düngebedarfes bewertet. Der Standort KF wurde in die Gehaltsklasse B (niedriger P-Gehalt) und der Standort W in die Gehaltsklasse A (sehr niedriger P-Gehalt) eingeordnet, sodass ein Zuschlag zur Erhaltungsdüngung empfohlen wird (LWK 2015B). Da für die P-Versorgung der Pflanzen nicht nur der P-Gehalt des Bodens, sondern auch das Nachlieferungspotential relevant ist, wurde dies mit der Methode nach FLOßMANN UND RICHTER (1982) untersucht. Es zeigte sich, dass der Standort W einen nur etwa halb so hohen  $P_2O_5$ -Gehalt wie der Standort KF aufwies, aber dennoch ein höheres Nachlieferungspotential besaß (Tab. 4).

Des Weiteren wurden die Böden auf ihren Kohlenstoff- und Stickstoffgehalt, sowie deren Verhältnis zueinander bestimmt. Das C/N-Verhältnis lag für den Standort KF im Durchschnitt bei 10 und für den Standort W bei 9 (Tab. 5). Es erfolgte zudem eine Untersuchung des Humusgehaltes des Bodens, der für beide Standorte im Durchschnitt bei 3,4% lag.

**Tab. 5: Blockgenaue Untersuchung des Kohlenstoff-, Stickstoff und Humusgehaltes in % der Böden der Versuchsfelder**

	<b>%Corg (gesamt)</b>	<b>%N (gesamt)</b>	<b>C/N- Verhältnis</b>	<b>%Humus</b>
<b>Kroll-Fiedler</b>				
A	2,0	0,2	10	3,4
B	1,9	0,2	10	3,3
C	2,0	0,2	10	3,4
D	2,1	0,2	10	3,6
Ø	<b>2,0</b>	<b>0,2</b>	<b>10</b>	<b>3,4</b>
<b>Weber</b>				
A	1,8	0,2	9	3,1
B	2,0	0,2	9	3,4
C	2,1	0,2	9	3,6
D	2,0	0,2	9	3,4
Ø	<b>2,0</b>	<b>0,2</b>	<b>9</b>	<b>3,4</b>

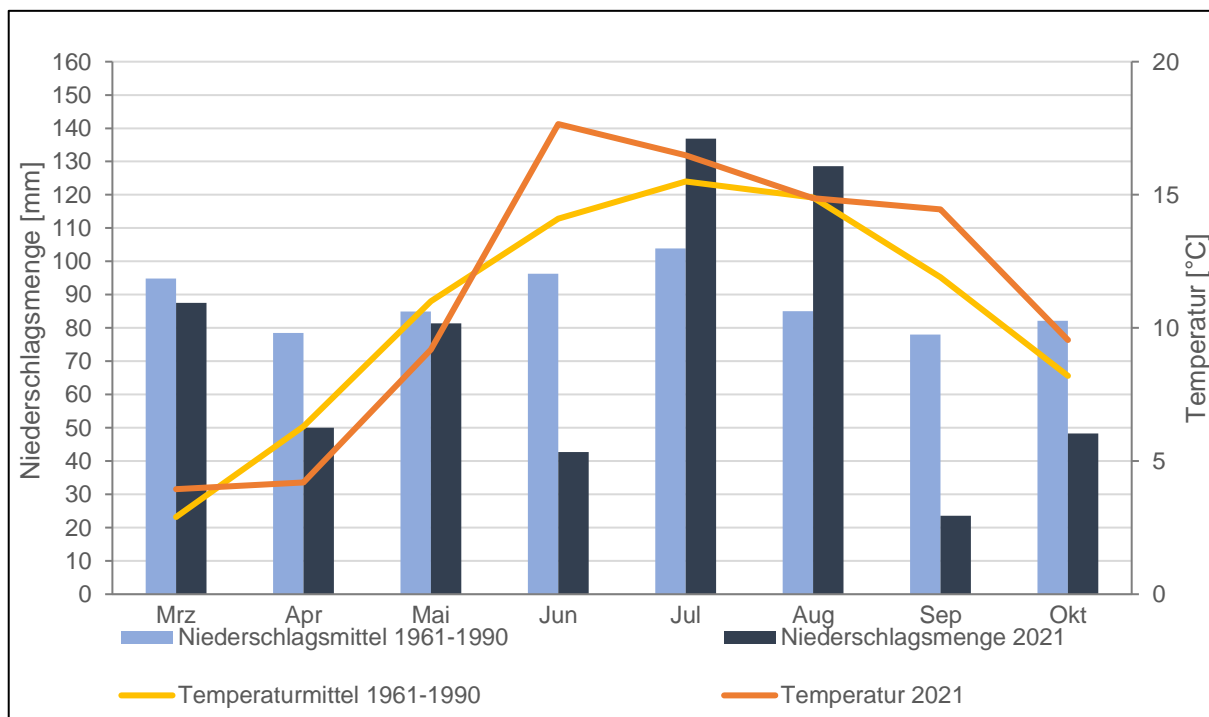
Zudem wurden die Böden der Versuchsfelder auf Schwermetalle gemäß der Grenzwerte der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV 1999; LUFA 2019) untersucht, um eine weitere Anreicherung von Schadstoffen durch die Rezyklat-Ausbringung auszuschließen (Tab. 6). Dabei wurde zwischen Vorsorge-, Prüf- und Maßnahmenwerten unterschieden. Der Abgleich der Schwermetallkonzentrationen der Versuchsfelder mit den Vorsorgewerten für lehmige, schluffige Böden mit  $pH \geq 6$  zeigte, dass die Werte bis auf eine Ausnahme eingehalten wurden. Nur die Versuchsfeldfläche des Betriebes W überschreitet die maximale Konzentration von Kupfer um  $1 \text{ mg kg}^{-1}$  TM (Tab. 6, dunkelrot).

**Tab. 6: Vergleich der Bodenvorsorgewerte gemäß Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) mit den Schwermetallkonzentrationen [mg kg<sup>-1</sup>] der Versuchsflächen.**

Schwermetalle	Vorsorgewert BBodSchV (Lehm/ Schluff; pH ≥ 6) [mg kg <sup>-1</sup> TM]	Schwermetallkonzentrationen der Fläche [mg kg <sup>-1</sup> TM]	
		Kroll-Fiedler	Weber
Kupfer	40	9,0	41,0
Zink	150	76,0	150,0
Blei	70	33,0	68,0
Cadmium	1	0,5	0,8
Chrom	60	24,0	39,0
Nickel	50	16,0	50,0
Quecksilber	0,5	0,1	0,1

#### 4.1.2 Klima und Wetter

Die beiden hier behandelten Betriebe befinden sich im Umland von Warstein und verfügen über keine eigenen Wetterstationen. Zur Ermittlung der Wetterdaten für das Anbaujahr 2021 wurden daher die Werte von vier Wetterstation in der näheren Umgebung (METEOSTAT 2021) herangezogen. Als Referenz wurde das langjährige Mittel der Jahre 1961 bis 1990 des Standortes Eslohe (DWD 2021A, 2021B) verwendet (Abb. 3).



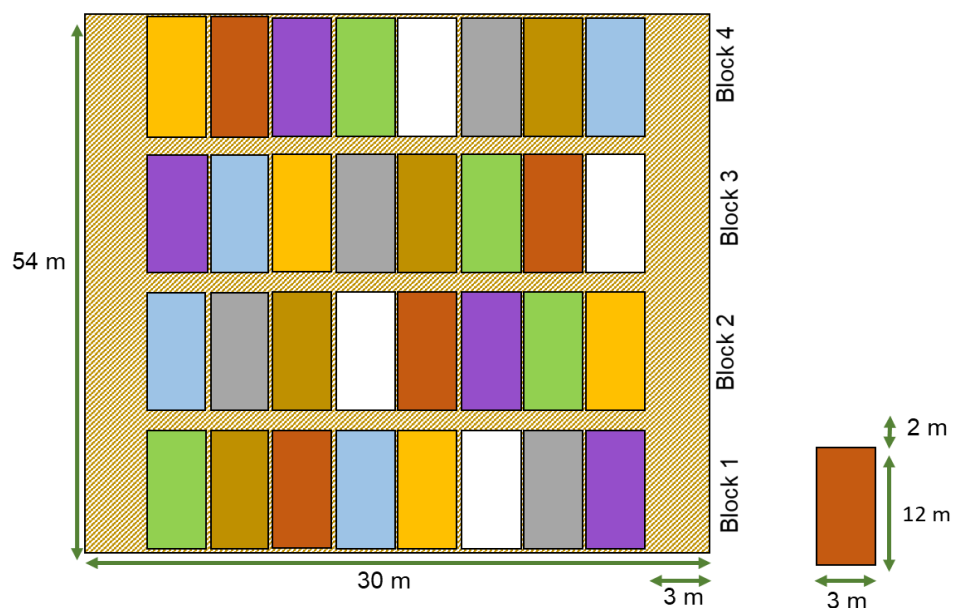
**Abb. 3: Niederschlagsmenge [mm] und Temperaturmittel [°C] des Vegetationszeitraums von März bis Oktober 2021 am Standort Warstein (Meteostat) und die Referenzjahre 1961-1990 (Wetterstation Eslohe DWD 2021a, 2021b).**

Die Jahresdurchschnittstemperatur für das Versuchsjahr 2021 lag bei 8,3 °C (METEOSTAT 2021). Es ließen sich Temperaturunterschiede zwischen dem Anbaujahr und dem langjährigen Mittel feststellen. Im Jahr 2021 war es im Durchschnitt um 0,7 °C wärmer als in der Referenzperiode. Besonders deutlich zeigte sich dies in den Monaten Juni und September. Hier konnte ein Temperaturanstieg von 3,6 bzw. 2,5 °C verzeichnet werden. Die Monate April und Mai waren hingegen um 2,1 bzw. 1,8 °C kühler als das langjährige Mittel (Abb. 3).

Im Vergleich zum langjährigen Mittel (1961-1990) zeigte sich im Anbaujahr mit einer Niederschlagsmenge von 923 mm (METEOSTAT 2021) ein Niederschlagsdefizit von 206 mm (-18,2%). Kennzeichnend für diese Vegetationsperiode war der Starkregen im Juli und August, der in Teilen von Deutschland zu enormen Überflutungen führte. Die Monate Juli und August bildeten jedoch eine Ausnahme. Hier nahm die Niederschlagsmenge für Juli um 24,1% (+33 mm) und für August sogar um 33,9% (+43,6 mm) im Vergleich zum langjährigen Mittel zu (Abb. 3).

## 4.2 Versuchsaufbau

Der Versuch wurde als Fruchtfolgeversuch über zwei Jahre im randomisierten Blockdesign mit acht Varianten in vier räumlichen Wiederholungen angelegt (Abb. 4). Die genaue Verteilung der Düngemittel befindet sich für die beiden Standorte im Anhang (II.I und II.II). Die Versuchsfläche wurde in 32 Parzellen mit 1152 m<sup>2</sup> (ohne Ränder) aufgeteilt. Die einzelnen Parzellen waren jeweils 36 m<sup>2</sup> groß mit einer Breite von 3 m und einer Länge von 12 m. Der Abstand zwischen den Blöcken betrug 2 m und der Randstreifen rechts und links neben den Randparzellen jeweils 3 m.



**Abb. 4:** Fruchtfolgeversuch im randomisierten Blockdesign mit vier Blöcken und acht Varianten (bunte Rechtecke als exemplarische Verteilung der Düngemittel)

#### 4.2.1 Auswahlkriterien und Zusammensetzung der P-Düngemittel

In jedem Block wurden acht verschiedene Varianten getestet. Dazu gehörten die fünf zu untersuchenden P-Rezyklate Crystal Green<sup>®</sup>, Berliner Pflanze<sup>®</sup>, AshDec, Pyreg<sup>®</sup> und KnochenKohle<sup>Plus</sup> (Tab. 7). Für die Auswahl der P-Recyclingdünger wurden vorab Informationen zu verschiedenen Herstellungsverfahren, der Sicherheit und der Wirksamkeit eingeholt (vgl. 2.4). Voraussetzung für die Aufnahme in das Öko-P Projekt war zudem die Einhaltung der Grenzwerte der Klärschlammverordnung (AbfKlärV 2017) und der Düngemittelverordnung (DüMV 2012), um Klärschlamm als Kontaminationsquelle von organischen und anorganischen Schadstoffen auszuschließen. Zudem mussten die Vorgaben zur Ausbringung von Düngemitteln, die in der Düngeverordnung (DüV 2017) festgehalten sind, eingehalten werden.

Die P-Recyclingdünger wurden mit einer Negativkontrolle ohne P-Düngung und zwei Positivkontrollen verglichen. Für die Positivkontrollen wurde das für den konventionellen Anbau häufig eingesetzte wasserlösliche P-Düngemittel Triplesuperphosphat (*TSP*) von Triferto eingesetzt. Als Referenz für den ökologischen Anbau wurde das weicherdige Rohphosphat „Hyperphosphat mehlfine P29“ von TIMAC AGRO Deutschland GmbH verwendet.

**Tab. 7: Zusammensetzung der Varianten (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-/N-Gehalte [%]) und ihre Düngungsmenge [kg ha<sup>-1</sup>]**

Variante	Akronym	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -Gehalt [%]	N-Gehalt [%]	Düngungsmenge* [kg ha <sup>-1</sup> ]	
				KF	W
Crystal Green	CG	25	5	1993,2	2154
Berliner Pflanze	BF	25	5	1469,3	1587,8
AshDec	AD	17	-	1803,7	1949,2
Pyreg	PY	14	-	2876,4	3108,4
KnochenKohlePlus	KK	25	-	1285,1	1388,7
Triplesuperphosphat	TS	39	-	871,6	941,9
Rohphosphat	RP	22	-	1421	1535,6
Ohne Phosphor	OP	-	-	-	-

\*entspricht in allen Varianten 135,3 kg P ha<sup>-1</sup> (KF) bzw. 146,2 kg P ha<sup>-1</sup> (W)

Die Ermittlung des P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Bedarfs der Versuchsfelder erfolgte mit dem Tool NPM<sub>ax</sub> der LWK unter Einbezug der Bodenart, des P-Gehaltes (Boden) und den angebauten Kulturen. Hierfür wurde eine dreigliedrige Fruchtfolge aus Klee gras, Silomais TS 33 und Winterroggen gewählt. Für KF ergab sich ein Bedarf von 310 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> (135,3 kg P ha<sup>-1</sup>) und für W eine Zufuhr von 335 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> (146,2 kg P ha<sup>-1</sup>). Anhand des P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Bedarfs und der Düngemittelzusammensetzung konnte die Ausbringungsmenge der Düngemittel pro Parzelle berechnet werden (Anhang II.III.). Die Düngungsmengen der einzelnen Rezyklate in kg pro Hektar sind in Tab. 7 dargestellt. Die Düngung für den gesamten Versuchszeitraum von zwei Jahren erfolgte einmalig im Frühjahr 2021.

## 4.2.2 Kulturart

Als Kulturart wurden Kleegrasmischungen gewählt, da sie im ökologischen Landbau als Hauptfrucht-Leguminosenanteil etwa ein Drittel der Fruchtfolge einnehmen sollten (LFULG 2008) und zudem gegenüber ihren Reinkulturen einen Mehrertrag liefern (HUGUENIN-ELIE ET AL. 2009). Diese Mischungen werden für den Feldfutterbau zur Viehversorgung, zur Gründüngung, für Biogasanlagen oder als wesentliches Fruchtfolgeglied für die Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit durch N-Fixierung eingesetzt. Für den Versuch wurden „betriebsübliche“ Kleegrasmischungen gewählt, die bereits durch die Landwirte etabliert wurden. Diese sind an den jeweiligen Standort angepasst und unterscheiden sich in ihren Zusammensetzungen nur geringfügig. Beide Mischungen wiesen Rotklee, Weißklee, Luzerne, Lieschgras, und Deutsches Weidelgras auf. (Tab. 8). Den mit Abstand höchsten Anteil nahm jedoch bei beiden Betrieben das Deutsche Weidelgras mit 20 kg ha<sup>-1</sup> (KF) und 15,4 kg ha<sup>-1</sup> (W) ein.

**Tab. 8: Zusammensetzung der Kleegrasmischungen [kg ha<sup>-1</sup>]**

Kleegrasmischung	Kroll-Fiedler	Weber
Deutsches Weidelgras	20 kg ha <sup>-1</sup>	15,4 kg ha <sup>-1</sup>
Rotklee	6-7 kg ha <sup>-1</sup>	4,6 kg ha <sup>-1</sup>
Weißklee	1-2 kg ha <sup>-1</sup>	3,0 kg ha <sup>-1</sup>
Luzerne	6 kg ha <sup>-1</sup>	3,5 kg ha <sup>-1</sup>
Lieschgras	4 kg ha <sup>-1</sup>	3,5 kg ha <sup>-1</sup>
Wiesenschwingel	4 kg ha <sup>-1</sup>	-
Σ	42 kg ha <sup>-1</sup>	30 kg ha <sup>-1</sup>

## 4.3 Versuchsdurchführung

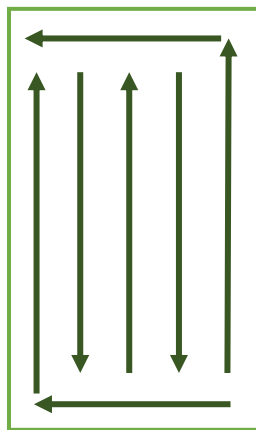
### 4.3.1 Düngung und Aussaat

Einige der verwendeten P-Dünger wurden bislang nur im Pilotmaßstab hergestellt, sodass die Produkte teilweise inhomogen und nicht granuliert waren. Zur Versuchsvorbereitung wurde daher eine Mischprobe aus den einzelnen Gebinden der Phosphordünger erstellt und homogenisiert. Besonders schwierig erwies sich die Aufbereitung der *KK*, da sie zum einen besonders leichte Aschepartikel und zum anderen bis zu daumengroße Knochenfragmente enthielt. Um eine bessere Ausbringung und homogene Verteilung der Inhaltsstoffe zu gewährleisten, wurde die Kohle gesiebt (Abb. 5).



**Abb. 5: KnochenKohle<sup>Plus</sup>: vor dem Sieben (links oben), Sieben zur Verbesserung der Ausbringung und homogenen Verteilung der Inhaltsstoffe (rechts) und nach dem Sieben (Mitte unten).**

Die P-Dünger wurden gemäß des P-Bedarfs abgewogen (Anhang II.III) und zur besseren Handhabung in vier Tüten pro Parzelle abgefüllt. Nach einer Rückverfestigung des Bodens erfolgte die Ausbringung händisch am 31.03.2021 (KF) und am 30.04.2021 (W) nach einem festgelegten Begehungsmuster (Abb. 6). Die Witterung während der Ausbringung am Standort Weber war recht kühl und feucht.



**Abb. 6: Festgelegtes Begehungsmuster einer Parzelle (links) und händische Düngemittelausbringung (rechts)**

Am folgenden Tag wurden die Dünger mit einem Federzinkengrubber eingearbeitet und die jeweiligen Klee-grasmischungen entsprechend der betriebsüblichen Aufwandmengen (Tab. 8) mit einer pneumatischen Sämaschine und einer Kreiselegge ausgesät. Die Einarbeitung der Dünger am Standort Weber erfolgte in einen stehenden Klee-grasbestand, wobei ein Teil des Bestandes wieder angewachsen ist. Hingegen erfolgte am Standort KF eine Blanksaat, da der

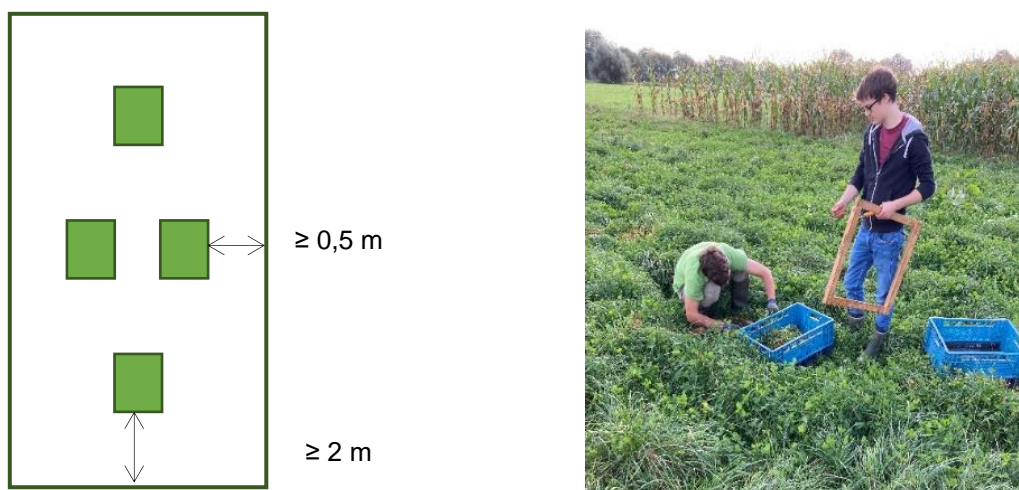


Bestand im Herbst des Vorjahres (2020) komplett gepflügt und umgebrochen wurde. Der Boden wurde anschließend angewalzt.

Am 15.06.2021 erfolgte eine Nachsaat des Klee-grases am Standort KF, da die Variante acht (rechter Streifen; Block 1-4 Parzelle 8) nicht bis zum Rand gesät wurde (ca. 1m fehlte). Dafür wurde der Boden mit einer Harke aufgelockert und per Hand etwa auf einer Breite von 3 m bis zur Mitte des Randes nachgesät.

#### 4.4 Datenerfassung

Im Zeitraum von 10.06.2021 bis 25.10.2021 wurden für den Standort Kroll-Fiedler zwei und für den Standort Weber drei Klee-grasschnitte durchgeführt (Anhang III.I). Auf Grund eines Versehens wurde der Bestand zu früh abgemäht, sodass keine Dokumentation des dritten Schnittes erfolgen konnte. Die Probenahme folgte innerhalb einer Parzelle nach einem festen Schema (Abb. 7).



**Abb. 7:** Festgelegtes Schnittmuster innerhalb einer Parzelle mit einer Probenfläche von  $0,25 \text{ m}^2$  pro Schnitt (links, grüne Quadrate) und Klee-grasernte mit Schätzrahmen (rechts)

Es wurde ein quadratischer Schätzrahmen mit einer Kantenlänge von 0,5 m verwendet ( $0,25 \text{ m}^2$ ). Der Schnitt wurde unmittelbar über der Erdoberfläche angesetzt, um Erdverunreinigungen der Proben zu meiden. Pro Parzelle wurden insgesamt vier Schnitte durchgeführt, sodass eine Fläche von  $1 \text{ m}^2$  pro Parzelle beerntet wurde. Um Randeffekte zu vermeiden, wurden alle Proben mit 0,5 bzw. 2 m Entfernung zum Parzellenrand entnommen (Abb. 7).

Die vier Proben wurden direkt am Feldrand mit einer Waage gewogen und die Frischmasse (FM) dokumentiert. Es wurde eine repräsentative Mischprobe von ca. 100 g FM (aus den vier Proben) entnommen und zur Bestimmung des Trockenmassegehaltes (TM-Gehalt) in einer Kühlbox zum Standort der LWK NRW in Auweiler transportiert. Nach der Probenahme wurden die Flächen durch die Landwirte gemäht.



### *Bestimmung der Trockenmasse*

Am Tag der Probennahme wurden die Mischproben mit einem Messer zerkleinert und in Aluminiumschalen gefüllt. Nach der Einwaage (FM) wurden die Schalen zur Vortrocknung für 24 h in einen Trockenschrank bei 60 °C gestellt. Anschließend wurde die Temperatur auf 105 °C erhöht und die Proben für weitere 24 h bis zur Erreichung der Gewichtskonstante getrocknet. In einzelnen Fällen wie z.B. beim ersten Kleegrasschnitt des Standortes Weber, kam es über Nacht zu einem Ausfall des Trocknungsgerätes, sodass der Vorgang für 10 h wiederholt werden musste. Für die Rückwaage (TM) wurden die Proben für 12 h erneut auf 105 °C erwärmt und direkt eingewogen (Abb. 8). Aus dem Verhältnis des FM- und des TM-Gewichtes konnte der TM-Gehalt der Proben berechnet werden. Die getrockneten Proben wurden in Tüten verpackt und für die Nährstoffanalysen an die Uni Bonn übermittelt.



**Abb. 8:** Zerkleinerung der Proben und Befüllung in Aluminiumschalen (links), Trocknung im Trockenschrank (Mitte) und Rückwaage der getrockneten Proben (rechts)

### *Nährstoffanalysen*

Für die Nährstoffanalysen wurden die vorgetrockneten Pflanzenproben mittels einer Ultraschallmühle auf eine Korngröße von  $< 0,25$  mm vermahlen. Anschließend wurde das zerkleinerte Probenmaterial erneut für 12 Stunden bei 105 °C über Nacht getrocknet.

Die C- und N-Bestimmung wurde in Doppelbestimmung mit Hilfe der Verbrennungsmethode nach Dumas in einem Elementaranalyser (EA 3000; Eurovector, Pavia, Italien) durchgeführt (VDLUFA 2013). Als Standardsubstanz wurde Acetanilid (Firma IVA: IVA0367994201) verwendet. Mit einer Feinwaage wurden 3-4 mg des Probenmaterials in Zinnbecher eingewogen. Über den automatischen Probengeber gelangten die Becher in das Verbrennungsrohr. Es erfolgte eine vollständige Verbrennung der Proben unter Sauerstoffzugabe bei etwa 1000 °C. Die bei der Verbrennung entstehenden Gase (v.a. CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> und H<sub>2</sub>O) wurden in das Reduktionsrohr, welches eine kupferhaltige Trennschicht besaß, weitergeleitet. Dort erfolgte eine Reduktion der stickstoffhaltigen Verbrennungsgase zu elementarem Stickstoff (N<sub>2</sub>) bei einer

Reaktionstemperatur von 650 °C. Aufgrund der unterschiedlichen Ladungseigenschaften von CO<sub>2</sub> und N<sub>2</sub> konnte anschließend eine gaschromatographische Auftrennung durchgeführt werden. Die Erfassung der Verbrennungsgase erfolgte durch einen Wärmeleitfähigkeitsdetektor.

Zur Bestimmung der P-Gehalte wurde das Pflanzenmaterial erneut bei 105 °C bis zur Gewichtskonstante getrocknet. Anschließend wurde eine Probe von 0,2 g für die Analyse entnommen. Die Probe wurde mit 6 ml konzentrierter Salpetersäure (HNO<sub>3</sub>) und 4 ml konzentriertem Wasserstoffperoxid (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) versetzt und im Mikrowellenofen (MARSPress Firma CEM, Kamp-Lintfort) aufgeschlossen. Die erhaltene Aufschlusslösung wurde mit Aqua bidest aufgefüllt, filtriert und anschließend zur P-Bestimmung verwendet. Zur Ermittlung der P-Gehalte wurde das Molybdänblau-Nachweisverfahren angewendet (VDLUFA 1997). Unter sauren Bedingungen reagieren Orthophosphat-Ionen mit Molybdat und Ascorbinsäure zu Molybdänblau. Dieser Komplex kann mit dem Continuous Flow Analyser (QuAAtro 39 Firma: Seal Analytical, Southampton, England) photometrisch bei 880 nm bestimmt werden.

### *Bestimmung der P-Aufnahme- und -Verwertungseffizienz*

Zur Ermittlung der Wirksamkeit der P-Recycling-Dünger im Vergleich zur Kontrollvariante ohne Düngung wurde die P-Aufnahmeeffizienz und die P-Verwertungseffizienz bestimmt. Die P-Aufnahmeeffizienz PUpE (P Uptake efficiency) gibt die prozentuale Aufnahme des gedüngten Phosphors in die Pflanze an und ist folgendermaßen definiert (YU ET AL. 2021):

$$PUpE[\%] = \frac{U_p [kg P ha^{-1}] - U_o [kg P ha^{-1}]}{\Delta F_p [kg P ha^{-1}]} * 100$$

Die P-Verwertungseffizienz PUTE (P Utilization efficiency) gibt die Ertragssteigerung im Verhältnis zur aufgenommenen Phosphormenge bzw. zum Phosphorgehalt in der Pflanze an und ist definiert als (DOBERMANN 2007; HAMMOND ET AL. 2009; SANDAÑA 2016):

$$PUtE \left[ \frac{[kg]}{[kg P]} \right] = \frac{Y_p [kg ha^{-1}]}{U_p [kg P ha^{-1}]}$$

<b>U<sub>p</sub></b>	<i>pflanzliche P-Aufnahme der oberirdischen Biomasse in einer Parzelle mit P-Düngung</i>
<b>U<sub>o</sub></b>	<i>P-Aufnahme der oberirdischen Biomasse in einer Parzelle ohne die Zugabe von P-Dünger</i>
<b>ΔF<sub>p</sub></b>	<i>Düngungsmenge in kg Reinnährstoff (P) in der Düngungsvariante verglichen mit der Kontrolle</i>
<b>Y<sub>p</sub></b>	<i>pflanzliche Trockenmasseertrag mit P-Düngung</i>
<b>Y<sub>o</sub></b>	<i>pflanzliche Trockenmasseertrag ohne P-Düngung</i>

## 4.5 Statistische Auswertungsmethoden

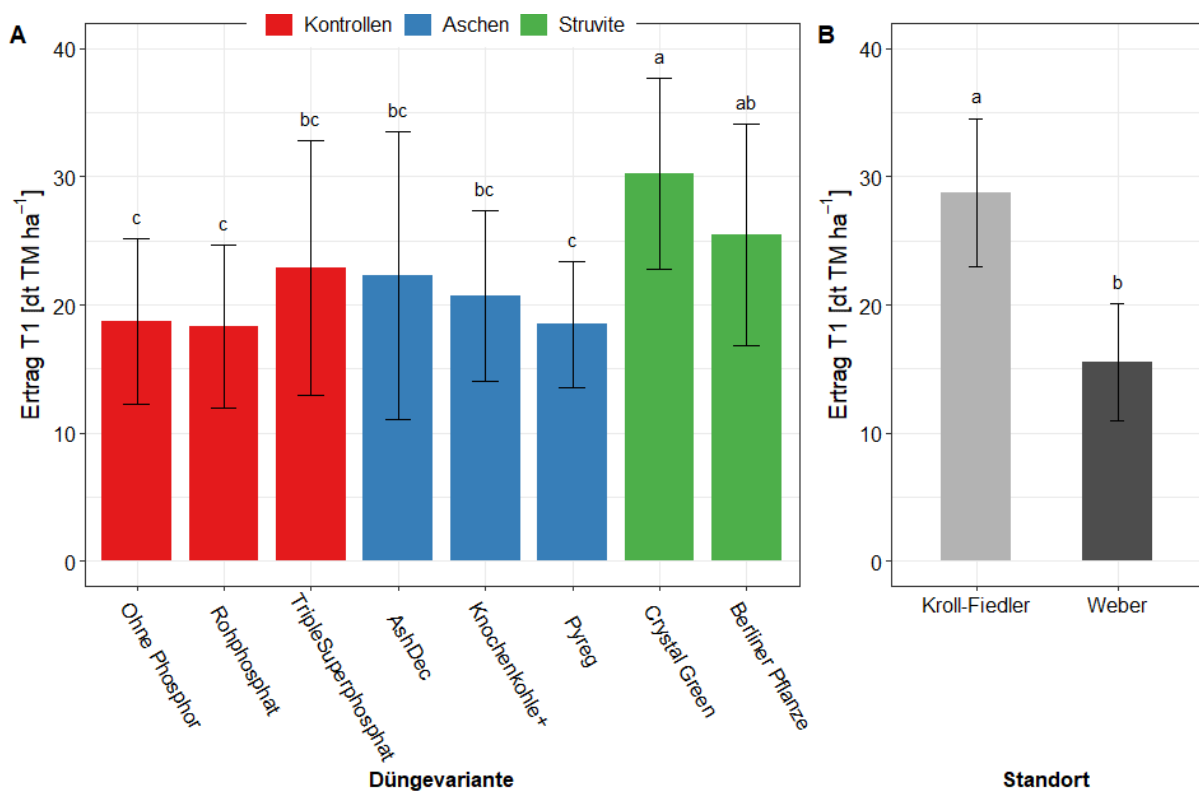
Für die statistische Auswertung wurde das Programm R-Studio 4.1.2 verwendet. Zur Überprüfung der Voraussetzungen wurden Normalverteilung (Shapiro-Test) und Varianzhomogenität (Levene-Test) bestimmt. Es wurde eine zweifaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit den Faktoren Standort und Düngevariante mit einem Signifikanzniveau von  $\alpha=0,05$  durchgeführt. Bei einer Wechselwirkung der Faktoren wurden die beiden Standorte getrennt voneinander ausgewertet. Anschließend wurde der Post-hoc-Test Tukey HSD zur Darstellung des multiplen Mittelwertvergleichs durchgeführt. Die weitere Datenverarbeitung erfolgte mit den Microsoft Office® Programmen Excel und Word 2016. Die graphische Darstellung der Ergebnisse wurde mit R-Studio 4.1.2 durchgeführt.

## 5. Ergebnisse

### 5.1 Trockenmasseerträge

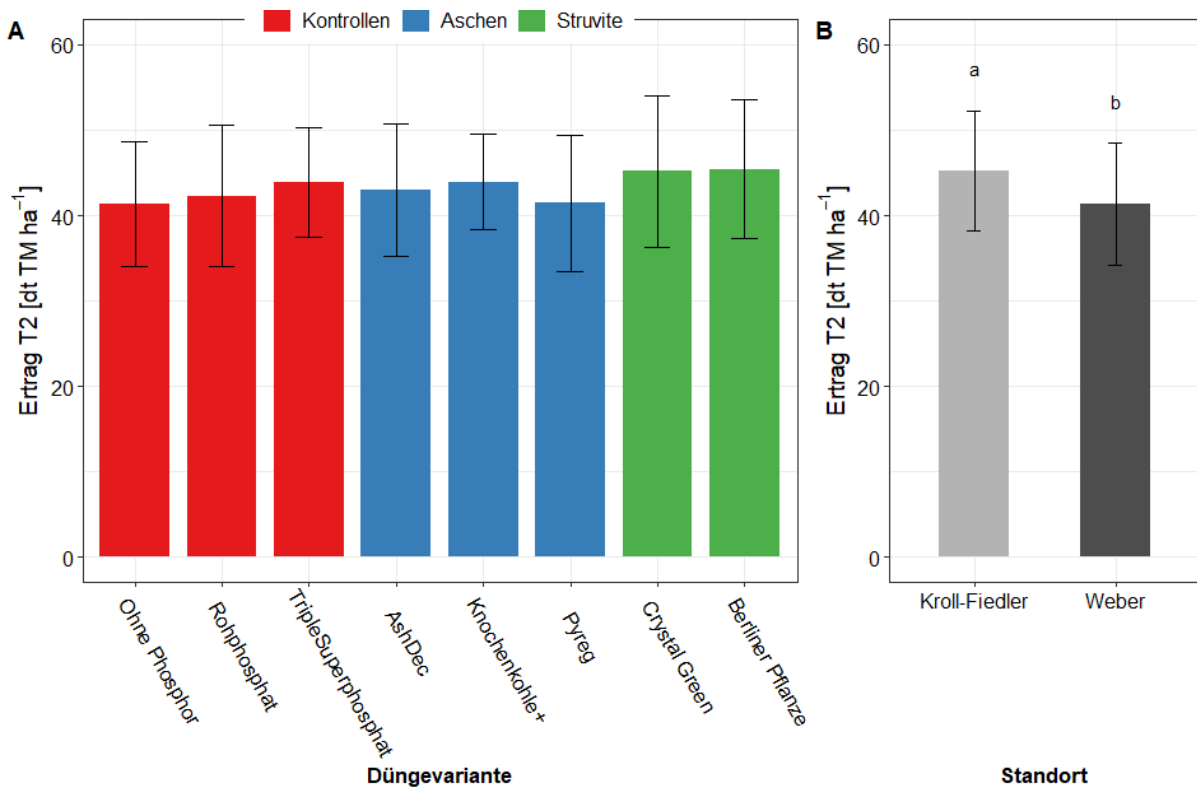
#### Zeiternten

Zum Zeitpunkt der ersten Zeiternte (T1) im Juni 2021 wurde der Trockenmasseertrag (dt TM ha<sup>-1</sup>) in Abhängigkeit von der Düngevariante und des Standortes ermittelt. Es zeigte sich, dass der Ertrag signifikant durch die Düngevariante (Abb. 9A) beeinflusst wurde. Den mit Abstand höchsten Ertrag erzielte CG (30,2 dt ha<sup>-1</sup>) mit einem um 38% höheren Ertrag verglichen mit der ungedüngten Kontrolle (18,8 dt ha<sup>-1</sup>). Zudem wies CG signifikante Unterschiede zu allen Düngevarianten außer BP (25,5 dt ha<sup>-1</sup>) auf. Die signifikant niedrigsten Erträge erzielten die Kontrollvarianten ohne P-Düngung und RP (18,3 dt ha<sup>-1</sup>) sowie das Ascheprodukt PY (18,5 dt ha<sup>-1</sup>). Tendenziell konnte ein höherer Ertrag für Struvitprodukte als für Ascheprodukte oder die Kontrollvarianten festgestellt werden. Auch zwischen den beiden Standorten (Abb. 9B) konnten signifikante Unterschiede ermittelt werden. So erzielte der Standort KF einen um 46% höheren Ertrag (28,8 dt ha<sup>-1</sup>) als der Standort W (15,5 dt ha<sup>-1</sup>).



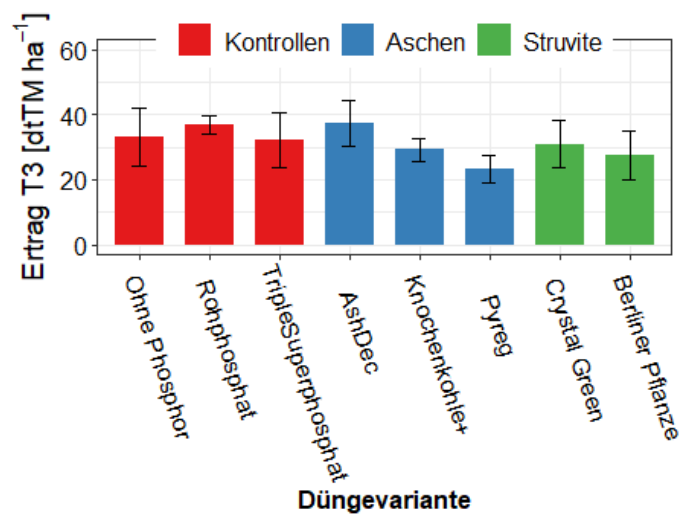
**Abb. 9: Trockenmasseertrag [dt TM ha<sup>-1</sup>] der ersten Zeiternte (A) in Abhängigkeit differenzierter P-Düngung:** unterteilt in die Gruppen Kontrollen (rot), Asche- (blau) und Struvitprodukte (grün) und **(B) in Abhängigkeit des Standortes:** Kroll-Fiedler (30.06.2021) und Weber (10.06.2021). Säulen mit verschiedenen Buchstaben innerhalb eines Graphens unterscheiden sich signifikant: Tukey-Test,  $\alpha=0,05$

Kongruent zur ersten Zeiternte wurde der Ertrag (dt TM ha<sup>-1</sup>) der zweiten Zeiternte (T2) in Abhängigkeit von der Düngevariante (Abb. 10A) und des Standortes (Abb. 10B) ermittelt. Für die Düngevarianten konnten keine Signifikanzen festgestellt werden. Die Struvitprodukte (grün: CG 45,2 dt ha<sup>-1</sup> und BP 45,5 dt ha<sup>-1</sup>) erzielten vergleichsweise einen höheren Ertrag als alle anderen Düngevarianten. Auch bei der zweiten Zeiternte konnte der Standort KF einen signifikant höheren Ertrag (8,7%; 45,3 dt ha<sup>-1</sup>) erzielen als der Standort W (41,3 dt ha<sup>-1</sup>).



**Abb. 10: Trockenmasseertrag [dt TM ha<sup>-1</sup>] der zweiten Zeiternte (A) in Abhängigkeit differenzierter P-Düngung:** unterteilt in die Gruppen Kontrollen (rot), Asche- (blau) und Struvitprodukte (grün) und **(B) in Abhängigkeit des Standortes:** Kroll-Fiedler (20.08.2021) und Weber (28.07.2021). Säulen mit verschiedenen Buchstaben innerhalb eines Graphens unterscheiden sich signifikant: Tukey-Test,  $\alpha=0,05$

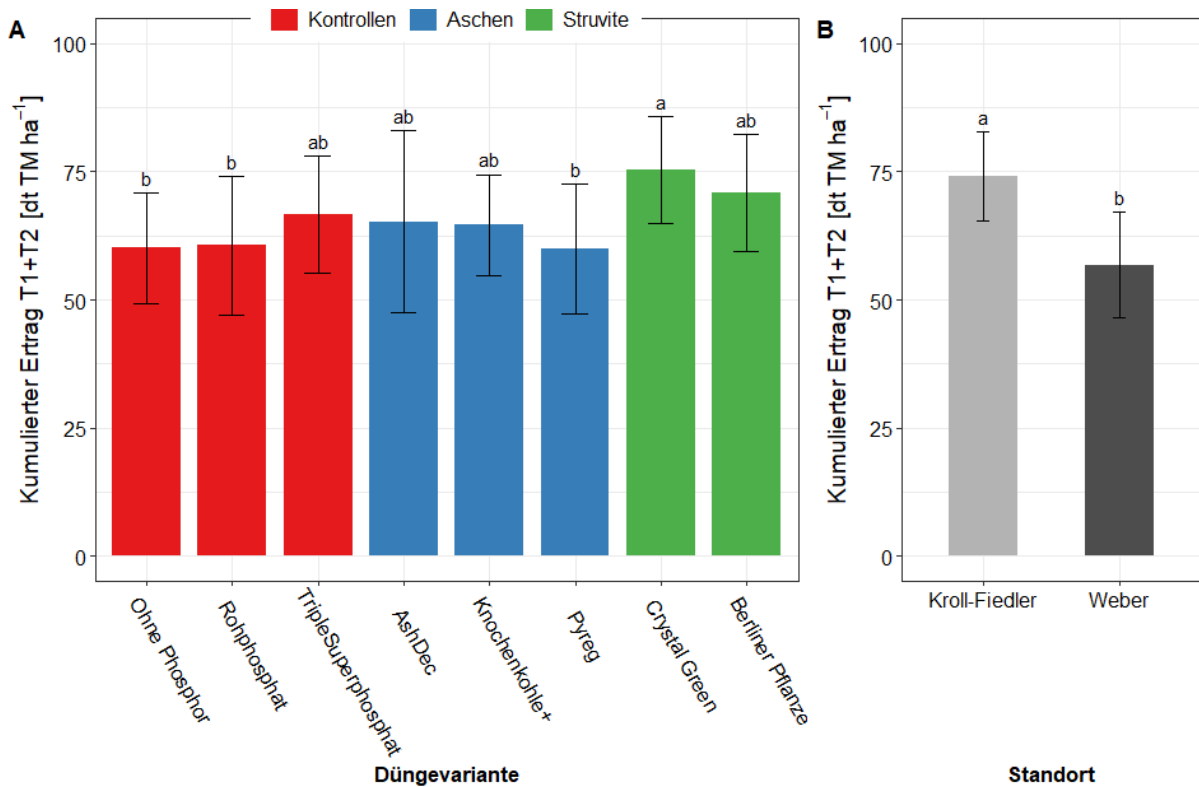
Bei der dritten Zeiternte (T3) traten analog zur zweiten Zeiternte keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Düngevarianten auf (Abb. 11). Zu beachten ist, dass der dritte Kleegrasschnitt nur am Standort Weber (25.10.2021) durchgeführt wurde. Den tendenziell höchsten Ertrag erzielten AD mit 37,4 dt ha<sup>-1</sup> und RP mit 37 dt ha<sup>-1</sup>. Wohingegen PY den niedrigsten Ertrag mit 23,1 dt ha<sup>-1</sup> aufwies.



**Abb. 11: Trockenmasseertrag [dt TM ha<sup>-1</sup>] der dritten Zeiternte (T3, 25.10.2021) für den Standort Weber in Abhängigkeit differenzierter P-Düngung:** unterteilt in die Gruppen Kontrollen (rot), Asche- (blau) und Struvitprodukte (grün).

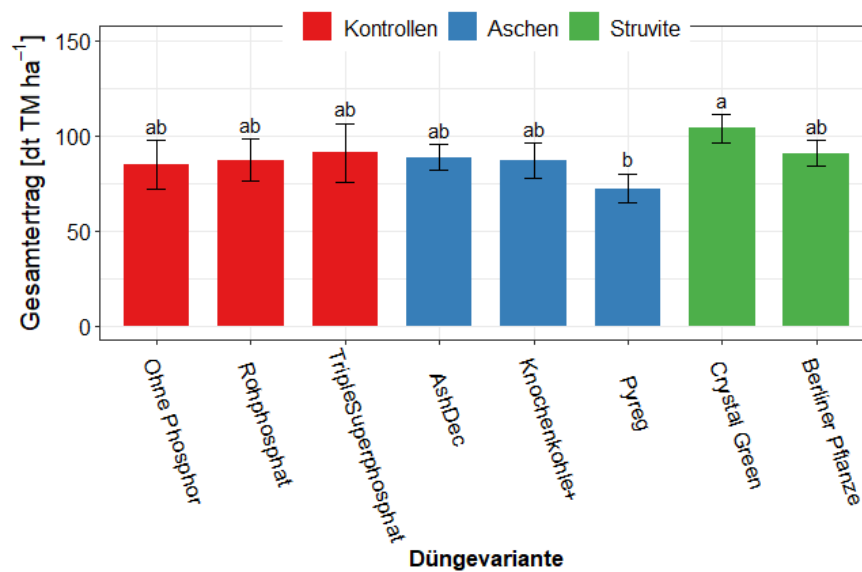
### Kumulierter Ertrag

Der kumulierte Trockenmasseertrag der ersten beiden Zeiternten wurde in Abhängigkeit von der Düngevariante (Abb. 12A) und des Standortes (Abb. 12B) erfasst. CG (75,4 dt ha<sup>-1</sup>) wies den signifikant höchsten Ertrag mit einer Ertragssteigerung um 20% verglichen mit der ungedüngten Kontrolle (60,1 dt ha<sup>-1</sup>) auf. Neben der ungedüngten Kontrolle unterschied sich CG (75,4 dt ha<sup>-1</sup>) signifikant von RP (60,6 dt ha<sup>-1</sup>) und PY (59,9 dt ha<sup>-1</sup>). Keine signifikanten Unterschiede zeigten hingegen TSP, AD, KK und BP. Tendenziell wiesen jedoch die Struvitprodukte höhere Erträge als die übrigen Düngevarianten auf. Es wurden zudem signifikante Unterschiede zwischen den Standorten erfasst. So war der Gesamtertrag am Standort KF mit 74 dt ha<sup>-1</sup> um 23,2% höher als am Standort W (56,8 dt ha<sup>-1</sup>).



**Abb. 12: Kumulierter Trockenmasseertrag [dt TM ha<sup>-1</sup>] der ersten und zweiten Zeiternte (A) in Abhängigkeit differenzierter P-Düngung:** unterteilt in die Gruppen Kontrollen (rot), Asche- (blau) und Struvitprodukte (grün) und **(B) in Abhängigkeit des Standortes:** Kroll-Fiedler und Weber. Säulen mit verschiedenen Buchstaben innerhalb eines Graphens unterscheiden sich signifikant: Tukey-Test,  $\alpha = 0,05$

Für den Standort Weber wurde analog der Gesamttrockenmasseertrag über die drei Zeiternten ermittelt (Abb. 13). Hierbei wiesen lediglich die Varianten CG mit 103,7 dt ha<sup>-1</sup> und PY mit 72,2 dt ha<sup>-1</sup> signifikante Unterschiede in ihren Erträgen auf. CG konnte eine Ertragssteigerung von 18,2% im Vergleich zur ungedüngten Variante erzielen, während PY (72,2 dt ha<sup>-1</sup>) ein Ertragsdefizit von -17,5% verzeichnete. Für die übrigen Düngemittelvarianten (RP, TSP, KK und BP) waren keine Tendenzen zu erkennen.



**Abb. 13: Gesamttrockenmasseertrag [dt TM ha<sup>-1</sup>] der ersten, zweiten und dritten Zeiternte am Standort Weber in Abhängigkeit differenzierter P-Düngung:** unterteilt in die Gruppen Kontrollen (rot), Asche- (blau) und Struvitprodukte (grün). Säulen mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant: Tukey-Test,  $\alpha = 0,05$

## 5.2 Nährstoffanalysen

Neben der Trockenmasse wurden für die einzelnen Zeiternten auch der N- und P-Gehalt (%) sowie das N/P-Verhältnis bestimmt (Tab. 9). Für die erste Zeiternte (T1) konnten keine signifikanten Unterschiede im N-Gehalt ermittelt werden. Tendenziell erzielten *BP* (3,1%), *AD* (3,0%) und *CG* (3,0%) die höchsten Werte. Zum Zeitpunkt der zweiten Zeiternte (T2) wichen *RP* (3,0%) und *AD* (3,1%) signifikant von *BP* (2,6%) ab. Für die dritte Ernte konnten signifikante Unterschiede im N-Gehalt zwischen *KK* (2,5%), *PY* (2,5%), *RP* (2,5%) und *CG*, dem niedrigsten Wert mit 2,1%, ermittelt werden.

Es zeigte sich, dass die Düngevarianten bei den drei Zeiternten einen signifikanten Einfluss auf den P-Gehalt der Klee grasproben nahmen. So lag der P-Gehalt für die erste Ernte (T1) für *CG*, *BP* und *TSP* signifikant höher als für *OP* (0,40%), *RP* (0,41%), *KK* (0,44%) und *PY* (0,41%). Dabei erzielte *CG* mit 0,51% den höchsten Wert. Auch bei der zweiten Zeiternte erreichte *CG* den höchsten P-Gehalt mit ebenfalls 0,52%. Damit unterschied *CG* sich von allen Düngevarianten außer *TSP* und *BP*. Der niedrigste P-Gehalt wurde für *OP*, *RP* und *PY* jeweils mit 0,4% ermittelt. Auch für die dritte Zeiternte (T3) wurden signifikante Unterschiede zwischen *CG* (0,48%), *BP* (0,46%), *TSP* (0,45%), *AD* (0,44%) und *PY* (0,38%) sowie *OP* (0,35%) gefunden.

Für die erste Zeiternte erzielten *OP* (7,1) und *RP* (7,0) ein signifikant höheres Ergebnis als *TSP* (5,8) und *CG* (5,8). Die zweite Zeiternte lieferte ähnliche Signifikanzen. Auch hier war das NP-Verhältnis für *RP* mit 7,6 signifikant höher als für *TSP* (6,16) und *CG* (5,42). Bei der dritten



Zeiternte wurden ebenfalls signifikante Unterschiede zwischen *OP*, *PY* und *TSP*, *CG* sowie *BP* gefunden. Dabei erzielte *OP* mit 6,77 den höchsten und *CG* mit 4,35 den niedrigsten Wert.

**Tab. 9: N- und P-Gehalte & N/P-Verhältnis der Kleegrasmischungen der drei Zeiternten**

Variante	N-Gehalt [%]			P-Gehalt [%]			N/P-Verhältnis		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ohne Phosphor	2,8	2,8 <b>ab</b>	2,4 <b>ab</b>	0,40 <b>d</b>	0,41 <b>de</b>	0,35 <b>d</b>	7,1 <b>a</b>	6,9 <b>ab</b>	6,8 <b>a</b>
Rohphosphat	2,9	3,1 <b>a</b>	2,5 <b>a</b>	0,41 <b>d</b>	0,40 <b>e</b>	0,39 <b>bcd</b>	7,0 <b>a</b>	7,6 <b>a</b>	6,4 <b>ab</b>
Triple-Superphosphat	2,9	2,8 <b>ab</b>	2,4 <b>ab</b>	0,50 <b>ab</b>	0,46 <b>abc</b>	0,45 <b>a</b>	5,8 <b>b</b>	6,2 <b>bc</b>	5,3 <b>cd</b>
AshDec	3	3,1 <b>a</b>	2,4 <b>ab</b>	0,46 <b>bc</b>	0,46 <b>bcd</b>	0,44 <b>ab</b>	6,6 <b>ab</b>	6,8 <b>ab</b>	5,4 <b>bcd</b>
Knochenkohle <sup>Plus</sup>	2,8	3,0 <b>ab</b>	2,5 <b>a</b>	0,44 <b>cd</b>	0,43 <b>bcde</b>	0,42 <b>abc</b>	6,4 <b>ab</b>	7,0 <b>ab</b>	5,9 <b>abc</b>
<i>PYREG</i>	2,8	2,9 <b>ab</b>	2,5 <b>a</b>	0,41 <b>d</b>	0,41 <b>cde</b>	0,38 <b>cd</b>	6,8 <b>ab</b>	7,0 <b>ab</b>	6,6 <b>a</b>
Crystal Green	3	2,8 <b>ab</b>	2,1 <b>b</b>	0,51 <b>a</b>	0,52 <b>a</b>	0,48 <b>a</b>	5,8 <b>b</b>	5,4 <b>c</b>	4,4 <b>cd</b>
Berliner Pflanze	3,1	2,6 <b>b</b>	2,2 <b>ab</b>	0,50 <b>ab</b>	0,48 <b>ab</b>	0,46 <b>a</b>	6,2 <b>ab</b>	5,5 <b>c</b>	4,8 <b>cd</b>

Werte mit verschiedenen Buchstaben innerhalb einer Spalte unterscheiden sich signifikant: Tukey-Test,  $\alpha = 0,05$

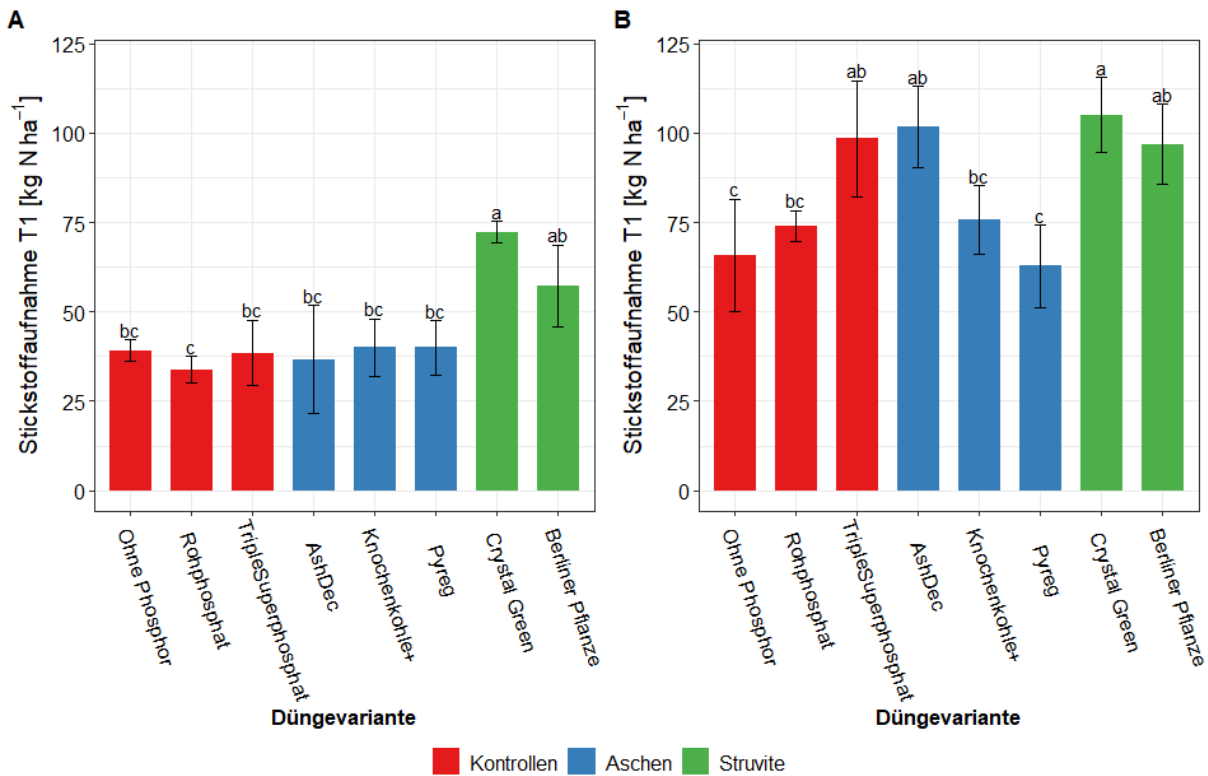
## 5.2.1 Stickstoff

### 5.2.1.1 Stickstoffaufnahme

#### *Zeiternte*

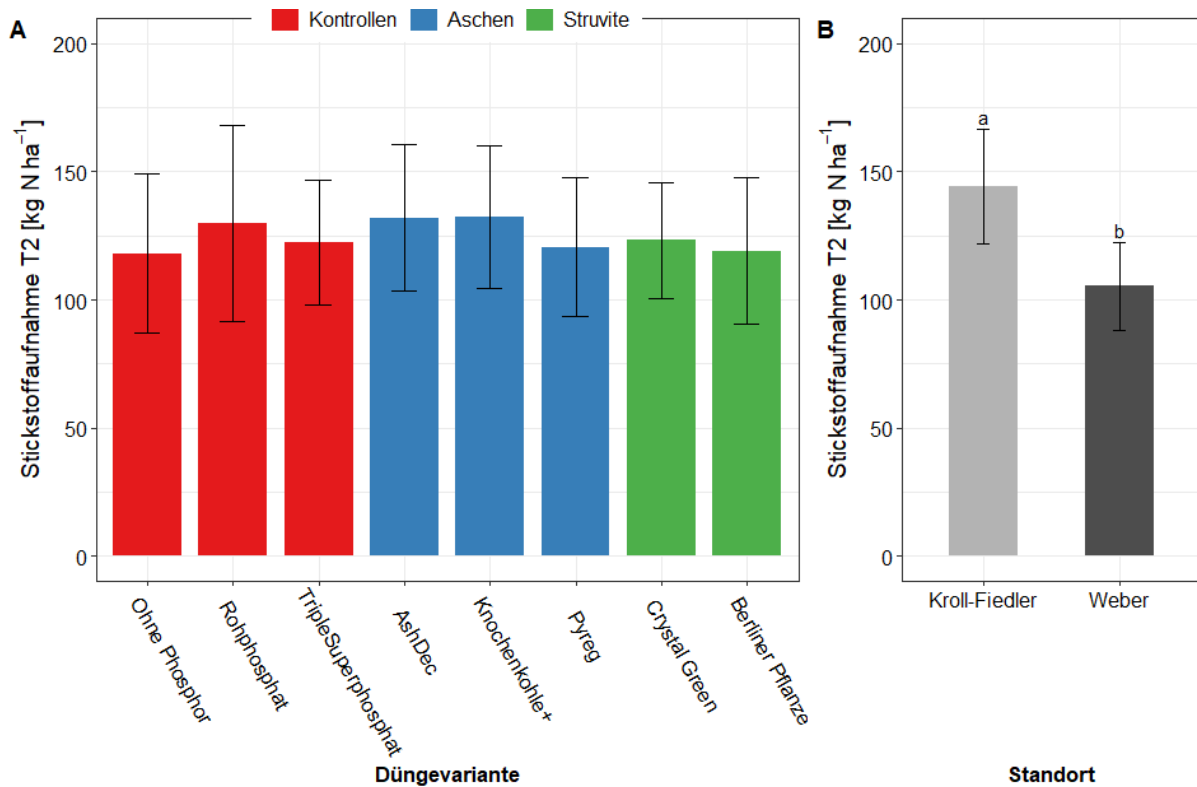
Die Stickstoffaufnahme der ersten Zeiternte (T1) wurde für den Standort Weber (Abb. 14A) und für den Standort Kroll-Fiedler (Abb. 14B) auf Grund von Wechselwirkungen getrennt ausgewertet. Bei beiden Standorten erzielte *CG* den signifikant höchsten Wert (W: 72,2 kg N ha<sup>-1</sup>; KF: 105,1 kg N ha<sup>-1</sup>), wobei die N-Aufnahme des Standortes KF um 31,3% höher war. Am Standort W wurde eine signifikant geringe Aufnahme für *OP*, *RP*, *TSP*, *PY*, *AD* und *KK* im Vergleich zu *CG* erzielt. Dabei erreichte *RP* mit 33,8 kg N ha<sup>-1</sup> den niedrigsten Wert und war damit neben *CG* (72,2 kg N ha<sup>-1</sup>) auch zu *BP* (57,2 kg N ha<sup>-1</sup>) signifikant.

Für den Standort KF wurde im Durchschnitt eine um 47,4% höhere Aufnahme als für den Standort W erzielt. Signifikante Unterschiede konnten zwischen *GC* (105,1 kg N ha<sup>-1</sup>) und *KK* (75,6 kg N ha<sup>-1</sup>), *RP* (74,1 kg N ha<sup>-1</sup>), *OP* (65,8 kg N ha<sup>-1</sup>) und *PY* (62,8 kg N ha<sup>-1</sup>) festgestellt werden, wobei sich die letzten beiden Düngevarianten auch signifikant von *BP* (96,9 kg N ha<sup>-1</sup>), *AD* (101,7 kg N ha<sup>-1</sup>) und *TSP* (98,4 kg N ha<sup>-1</sup>) unterschieden.



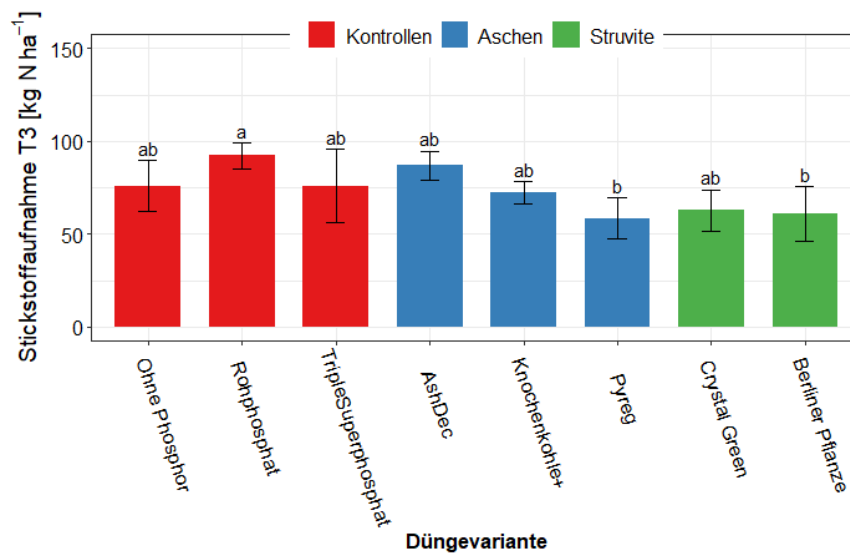
**Abb. 14: Stickstoffaufnahme [kg N ha<sup>-1</sup>] der ersten Zeiternte (T1) in Abhängigkeit differenzierter P-Düngung (A) für den Standort Weber (10.06.2021) (B) für den Standort Kroll-Fiedler (30.06.2021) unterteilt in die Gruppen Kontrollen (rot), Asche- (blau) und Struvitprodukte (grün). Säulen mit verschiedenen Buchstaben innerhalb eines Graphens unterscheiden sich signifikant: Tukey-Test,  $\alpha = 0,05$**

Die Auswertung der N-Aufnahme der zweiten Zeiternte (T2) in Abhängigkeit von der Düngevariante erfolgte für beide Standorte gemeinsam (Abb. 15A). Es zeigten sich keine signifikanten Unterschiede in der Düngung. Dabei variierte die N-Aufnahme zwischen 118 kg N ha<sup>-1</sup> für OP und 132 kg N ha<sup>-1</sup> für AD. Tendenziell erzielten RP, AD und KK eine höhere Aufnahme als OP, TSP, PY, CG und BP. Zwischen den beiden Standorten konnten jedoch signifikante Unterschiede festgestellt werden (Abb. 15B). So erzielte der Standort KF (144,2 kg N ha<sup>-1</sup>) eine um 27% höhere N-Aufnahme als der Standort W (105,3 kg N ha<sup>-1</sup>).



**Abb. 15: Stickstoffaufnahme [kg N ha<sup>-1</sup>] der zweiten Zeiternte (T2) in Abhängigkeit (A) differenzierter P-Düngung:** unterteilt in die Gruppen Kontrollen (rot), Asche- (blau) und Struvitprodukte (grün) und **(B) in Abhängigkeit des Standortes:** Kroll-Fiedler (20.08.2021) und Weber (28.07.2021). Säulen mit verschiedenen Buchstaben innerhalb eines Graphens unterscheiden sich signifikant: Tukey-Test,  $\alpha = 0,05$

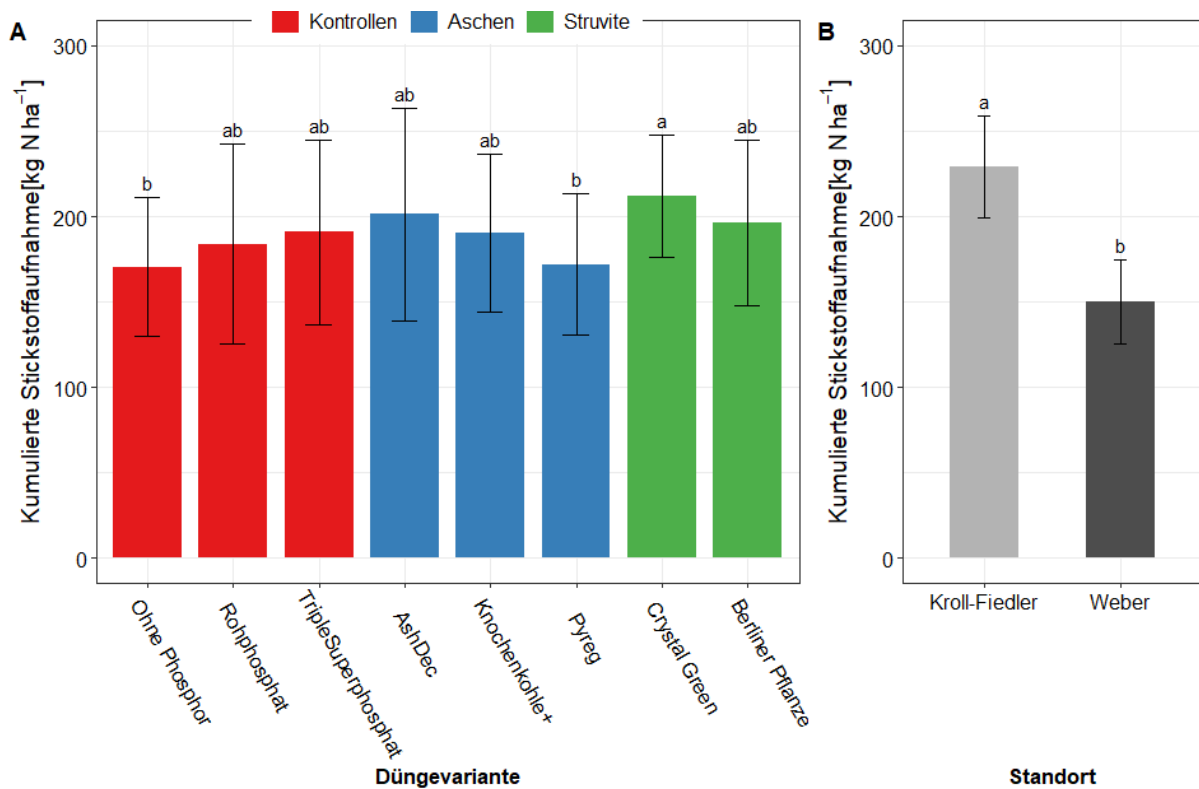
Die dritte Zeiternte (T3; 25.10.2021) wurde nur für den Standort W durchgeführt (Abb. 16). Dabei erzielte *RP* mit 92,2 kg N ha<sup>-1</sup> den höchsten Wert und wich signifikant von *PY* (58,5 kg N ha<sup>-1</sup>) und *BP* (60,8 kg N ha<sup>-1</sup>) ab. Es ergaben sich keine signifikanten Unterschiede für die N-Aufnahme zwischen *RP*, *PY*, *BP* und den verbleibenden Düngevarianten (*OP*, *TSP*, *AD*, *KK* und *CG*).



**Abb. 16: Stickstoffaufnahme [kg N ha<sup>-1</sup>] der dritten Zeiternte (T3; 25.10.2021) am Standort Weber in Abhängigkeit differenzierter P-Düngung:** unterteilt in die Gruppen Kontrollen (rot), Asche- (blau) und Struvitprodukte (grün) Säulen mit verschiedenen Buchstaben innerhalb eines Graphens unterscheiden sich signifikant: Tukey-Test,  $\alpha = 0,05$

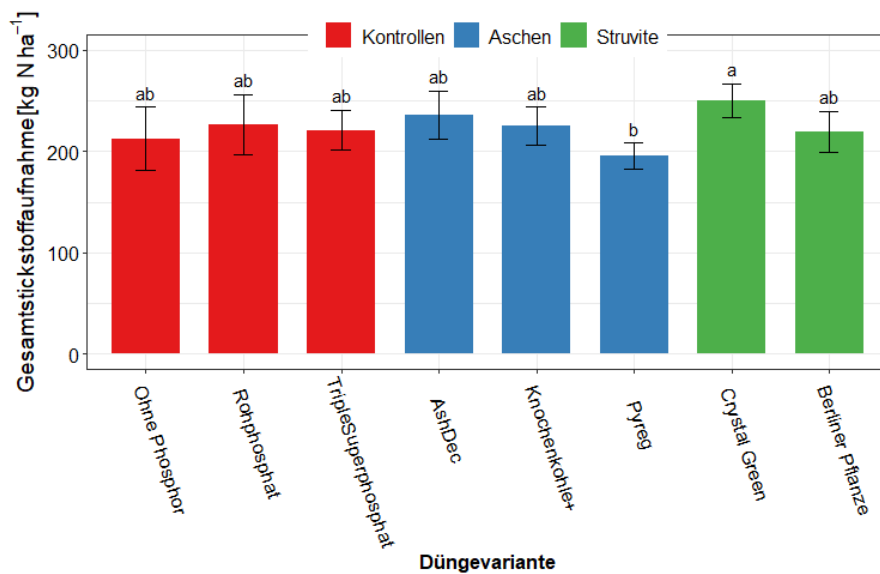
### Kumulierte N-Aufnahme

Die kumulierte Stickstoffaufnahme der ersten beiden Zeiternten wurde in Abhängigkeit von der Düngevariante (Abb. 17A) und des Standortes (Abb. 17B) erfasst. Dabei erwies CG (211,9 kg N ha<sup>-1</sup>) über die beiden Zeiternten eine signifikant höhere N-Aufnahme im Vergleich zu OP (170,5 kg N ha<sup>-1</sup>) und PY (171,8 kg N ha<sup>-1</sup>). Die N-Aufnahme lag damit um 19,5% höher verglichen mit der ungedüngten Variante und um 18,9% höher verglichen mit PY. Die übrigen Düngevarianten zeigten keine signifikanten Unterschiede. Tendenziell erzielten AD (201,2 kg N ha<sup>-1</sup>) und BP (196,2 kg N ha<sup>-1</sup>) eine bessere Aufnahme als RP (183,9 kg N ha<sup>-1</sup>), TSP (190,9 kg N ha<sup>-1</sup>) und KK (190,2 kg N ha<sup>-1</sup>). Auch die Standorte wiesen signifikante Unterschiede auf (Abb. 17B). So erreichte der Standort KF eine um 34,6% höhere Stickstoffaufnahme.



**Abb. 17: Kumulierte Stickstoffaufnahme [kg N ha<sup>-1</sup>] der ersten und zweiten Zeiternte in Abhängigkeit (A) differenzierter P-Düngung: unterteilt in die Gruppen Kontrollen (rot), Asche- (blau) und Struvitprodukte (grün) und (B) in Abhängigkeit des Standortes.** Säulen mit verschiedenen Buchstaben innerhalb eines Graphens unterscheiden sich signifikant: Tukey-Test,  $\alpha = 0,05$

Für den Standort Weber wurde analog die Gesamtstickstoffaufnahme über die drei Zeiternten ermittelt (Abb. 18). Der höchste Wert wurde von CG mit 249,9 kg N ha<sup>-1</sup> erzielt und lag damit um 15% höher vergleich mit OP (212,5 kg N ha<sup>-1</sup>). Signifikante Unterschiede konnten nur zwischen CG und PY (195,5 kg N ha<sup>-1</sup>) festgestellt werden.



**Abb. 18: Gesamtstickstoffaufnahme [kg N ha<sup>-1</sup>] der ersten, zweiten und dritten Zeiternte am Standort Weber in Abhängigkeit differenzierter P-Düngung:** unterteilt in die Gruppen Kontrollen (rot), Asche- (blau) und Struvitprodukte (grün). Säulen mit verschiedenen Buchstaben innerhalb eines Graphens unterscheiden sich signifikant: Tukey-Test,  $\alpha = 0,05$

## 5.2.2 Phosphor

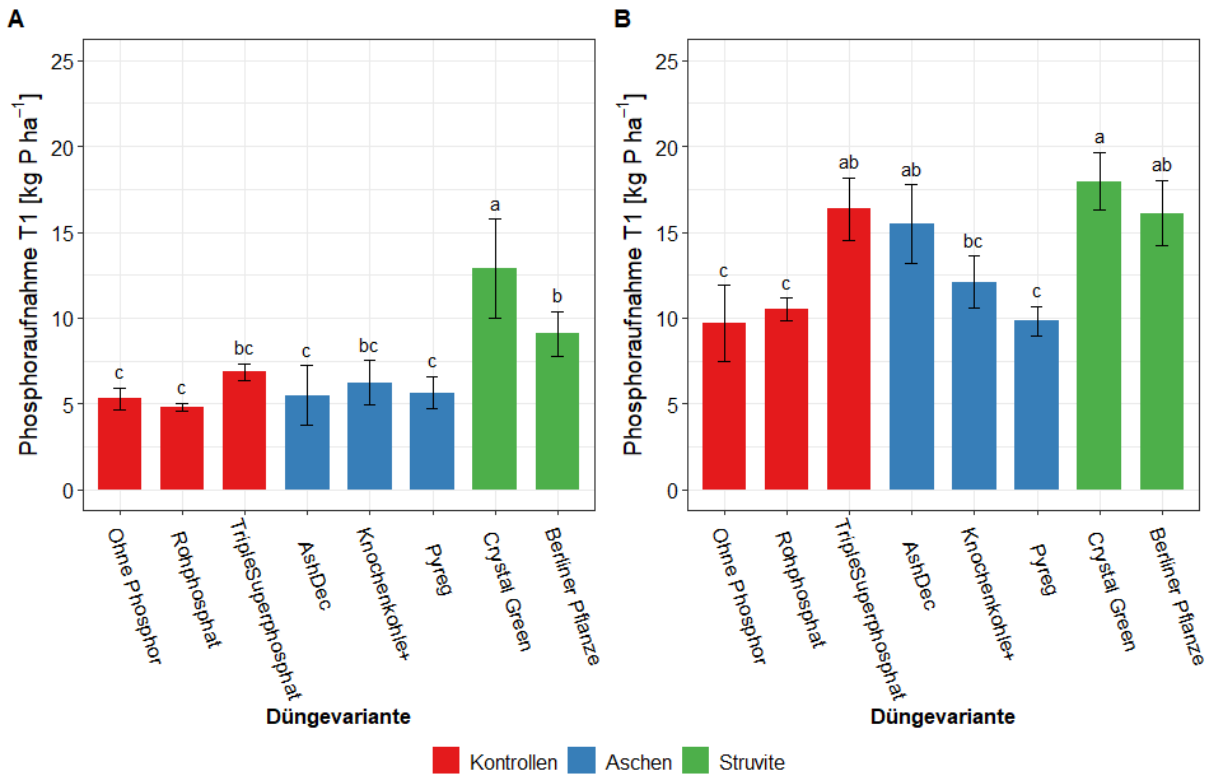
### 5.2.2.1 Phosphoraufnahme

#### Zeiternte

Die Phosphoraufnahme der ersten Zeiternte (T1) wurde für den Standort Weber (Abb. 19A) und für den Standort Kroll-Fiedler (Abb. 19B) getrennt ausgewertet. Bei beiden Standorten konnte die signifikant höchste Phosphoraufnahme durch CG mit 12,9 kg P ha<sup>-1</sup> (W) bzw. mit 18 kg P ha<sup>-1</sup> (KF) erzielt werden. Dabei war die Aufnahme um 59% (W) bzw. 46,2% (KF) erhöht verglichen mit der ungedüngten Kontrolle.

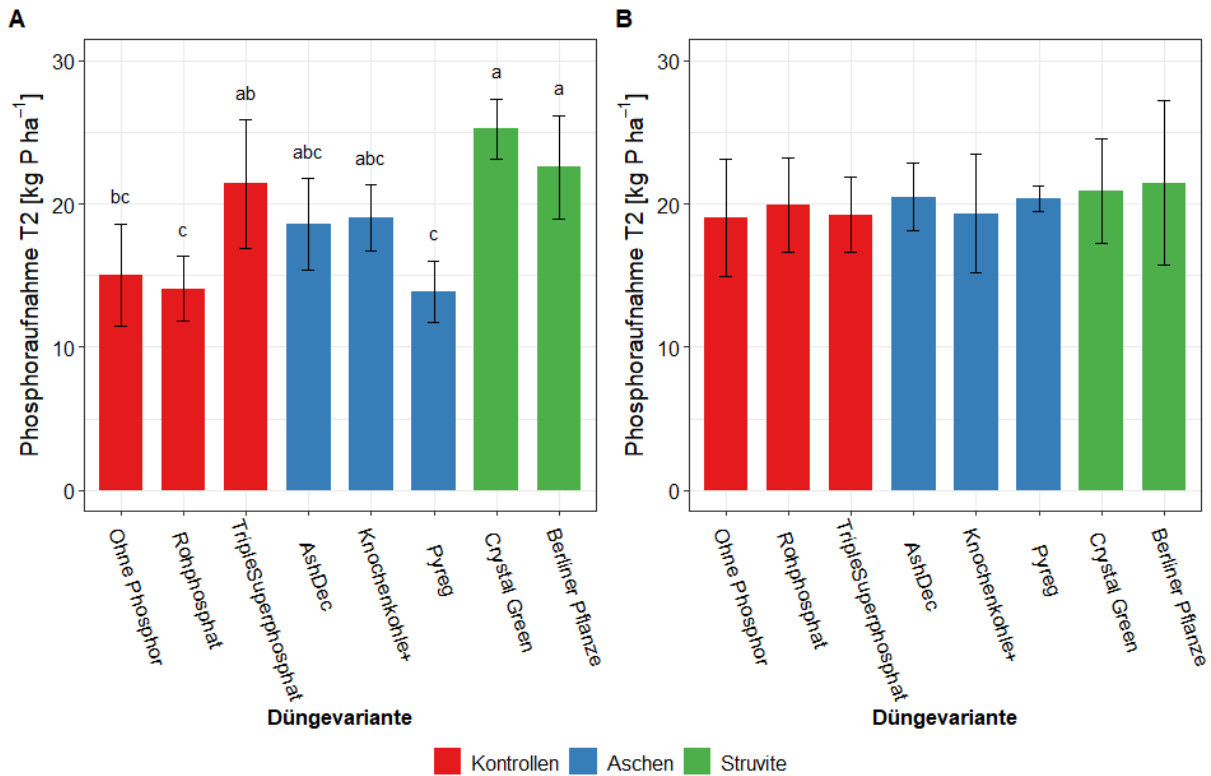
Für den Standort Weber (Abb. 19A) konnte eine signifikant höhere P-Aufnahme für Struvitprodukte als für OP, RP, AD und PY festgestellt werden. Dabei erzielte CG (12,9 kg P ha<sup>-1</sup>) zudem einen signifikant höheren Wert als BP (9,1 kg P ha<sup>-1</sup>). Der niedrigste Wert wurde dabei durch RP mit 4,8 kg P ha<sup>-1</sup> erreicht. Daraus ergibt sich für diesen Standort eine absteigende Reihenfolge von CG (a) > BP (b) > TSP, KK (bc) > OP, PY, RP (c).

Der Standort KF (Abb. 19B) wies ähnliche Signifikanzen wie der Standort W auf. So unterschied sich CG ebenfalls signifikant von OP, RP und PY, nicht aber von BP und AD. Tendenziell erzielten die Struvitprodukte (CG, BP), TSP und AD die höchsten P-Aufnahmen. Für diesen Standort ergibt sich eine absteigende Reihenfolge von CG (a) > TSP, BP, AD (ab) > KK (bc) > OP, PY, RP (c). Insgesamt erreichte der Standort W im Durchschnitt eine um 48% geringe Phosphoraufnahme als der Standort KF.



**Abb. 19: Phosphoraufnahme [kg P ha<sup>-1</sup>] der ersten Zeiternte (T1) in Abhängigkeit differenzierter P-Düngung (A) für den Standort Weber (10.06.2021) (B) für den Standort Kroll-Fiedler (30.06.2021) unterteilt in die Gruppen Kontrollen (rot), Asche- (blau) und Struvitprodukte (grün). Säulen mit verschiedenen Buchstaben innerhalb eines Graphens unterscheiden sich signifikant: Tukey-Test,  $\alpha = 0,05$**

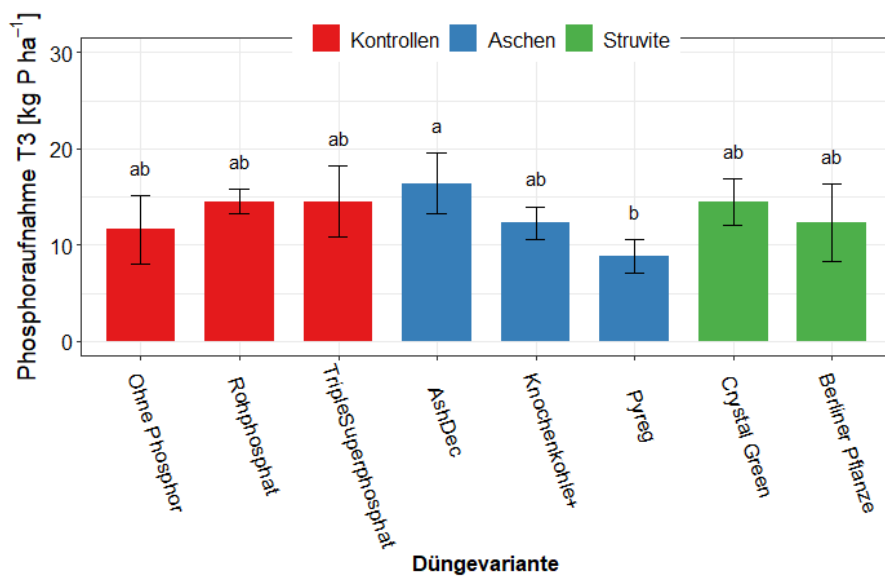
Analog zur ersten Zeiternte wurde die Phosphoraufnahme der zweiten Zeiternte (T2) ermittelt. Für den Standort W (Abb. 20A) wurden signifikante Unterschiede zwischen den Struvitprodukten (CG, BP) und OP, RP und PY festgestellt. Dabei erreichte CG mit 25,2 kg P ha<sup>-1</sup> den höchsten und PY mit 13,9 kg P ha<sup>-1</sup> den niedrigsten Wert. Für AD und KK ergaben sich keinerlei Signifikanzen. TSP hingegen wick nur signifikant von RP und PY ab. Für den Standort KF (Abb. 20B) ergaben sich keine signifikanten Unterschiede. Die Struvitprodukte (CG, BP) erreichten vergleichsweise die höchsten Aufnahmen, gefolgt von TSP und AD. So konnte BP eine um 11,3% höhere Phosphoraufnahme verglichen mit der ungedüngten Kontrolle erzielen.



**Abb. 20: Phosphoraufnahme [kg P ha<sup>-1</sup>] der zweiten Zeiternte (T2) in Abhängigkeit differenzierter P-Düngung (A) für den Standort Weber (28.07.2021) und (B) für den Standort Kroll-Fiedler (20.08.2021) unterteilt in die Gruppen Kontrollen (rot), Asche- (blau) und Struvitprodukte (grün). Säulen mit verschiedenen Buchstaben innerhalb eines Graphens unterscheiden sich signifikant: Tukey-Test,  $\alpha = 0,05$**

Die dritte Zeiternte (T3; 25.10.2021) wurde nur für den Standort W (Abb. 21) durchgeführt. Die höchste Phosphoraufnahme konnte für AD erreicht werden. Dabei war der Wert um 29,3% höher verglichen mit der ungedüngten Kontrolle. Signifikante Unterschiede wurden nur zwischen AD mit 16,4 kg P ha<sup>-1</sup> und PY 8,9 kg P ha<sup>-1</sup> gefunden. Die übrigen Düngevarianten wiesen keine Signifikanzen auf.

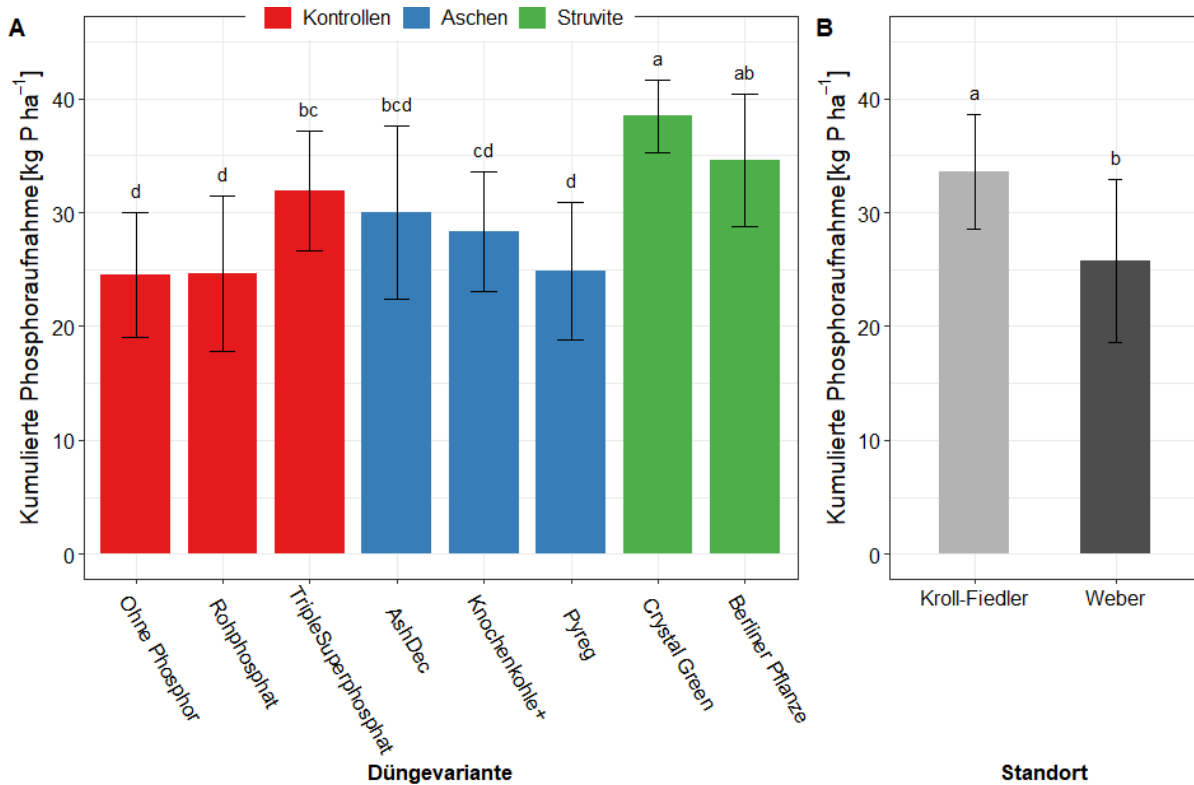




**Abb. 21: Phosphoraufnahme [kg P ha<sup>-1</sup>] der dritten Zeiternte (T3; 25.10.2021) am Standort Weber in Abhängigkeit differenzierter P-Düngung:** unterteilt in die Gruppen Kontrolle (rot), Asche- (blau) und Struvitprodukte (grün) Säulen mit verschiedenen Buchstaben innerhalb eines Graphens unterscheiden sich signifikant: Tukey-Test,  $\alpha = 0,05$

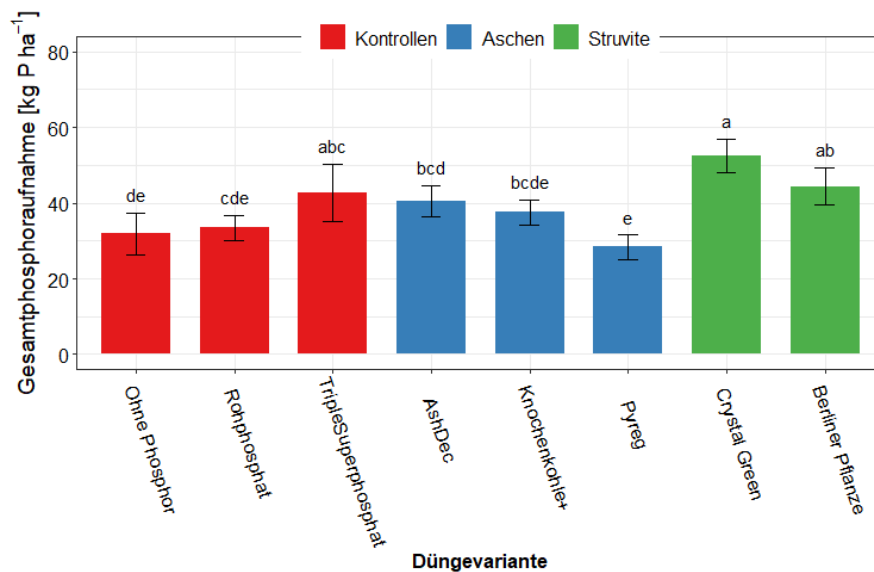
### Kumulierte P-Aufnahme

Die kumulierte Phosphoraufnahme der ersten beiden Zeiternten wurde in Abhängigkeit von der Düngevariante (Abb. 22A) und des Standortes (Abb. 22B) erfasst. Den höchsten Wert erreichte CG mit 38,5 kg P ha<sup>-1</sup>. Damit wick es signifikant von allen Düngevarianten außer BP ab, welches mit 34,6 kg P ha<sup>-1</sup> eine um 10,1% geringere Phosphoraufnahme erzielte. Die zu allen Düngemitteln signifikant geringste Phosphoraufnahme wurde durch OP (24,5 kg P ha<sup>-1</sup>), RP (24,6 kg P ha<sup>-1</sup>) und PY (24,9 kg P ha<sup>-1</sup>) erzielt. Auch zwischen den beiden Standorten (Abb. 22B) konnten signifikante Unterschiede ermittelt werden. So erzielte der Standort KF einen um 23,3% höhere Phosphoraufnahme (33 kg P ha<sup>-1</sup>) als der Standort W (25,8 kg P ha<sup>-1</sup>).



**Abb. 22: Kumulierte Phosphoraufnahme [kg P ha<sup>-1</sup>] der ersten und zweiten Zeiternte in Abhängigkeit (A) differenzierter P-Düngung:** unterteilt in die Gruppen Kontrolle (rot), Asche- (blau) und Struvitprodukte (grün) und **(B) in Abhängigkeit des Standortes.** Säulen mit verschiedenen Buchstaben innerhalb eines Graphens unterscheiden sich signifikant: Tukey-Test,  $\alpha = 0,05$

Für den Standort Weber wurde analog die Gesamtstickstoffaufnahme über die drei Zeiternten (Abb. 23) ermittelt. Mit 52,6 kg P ha<sup>-1</sup> erzielt CG den höchsten Wert und eine um 39,3% höhere Gesamtphosphoraufnahme vergleichen mit OP (31,9 kg P ha<sup>-1</sup>) sowie eine signifikant bessere Gesamtstickstoffaufnahme als alle Düngemittel außer TSP und BP. Somit wiesen die Struvitprodukte tendenziell eine bessere Aufnahme als die Ascheprodukte oder die Kontrollgruppe auf. Den geringsten Wert erreichte PY mit 28,4 kg P ha<sup>-1</sup>. Damit ist es signifikant zu allen Düngemitteln außer OP, RP und KK.

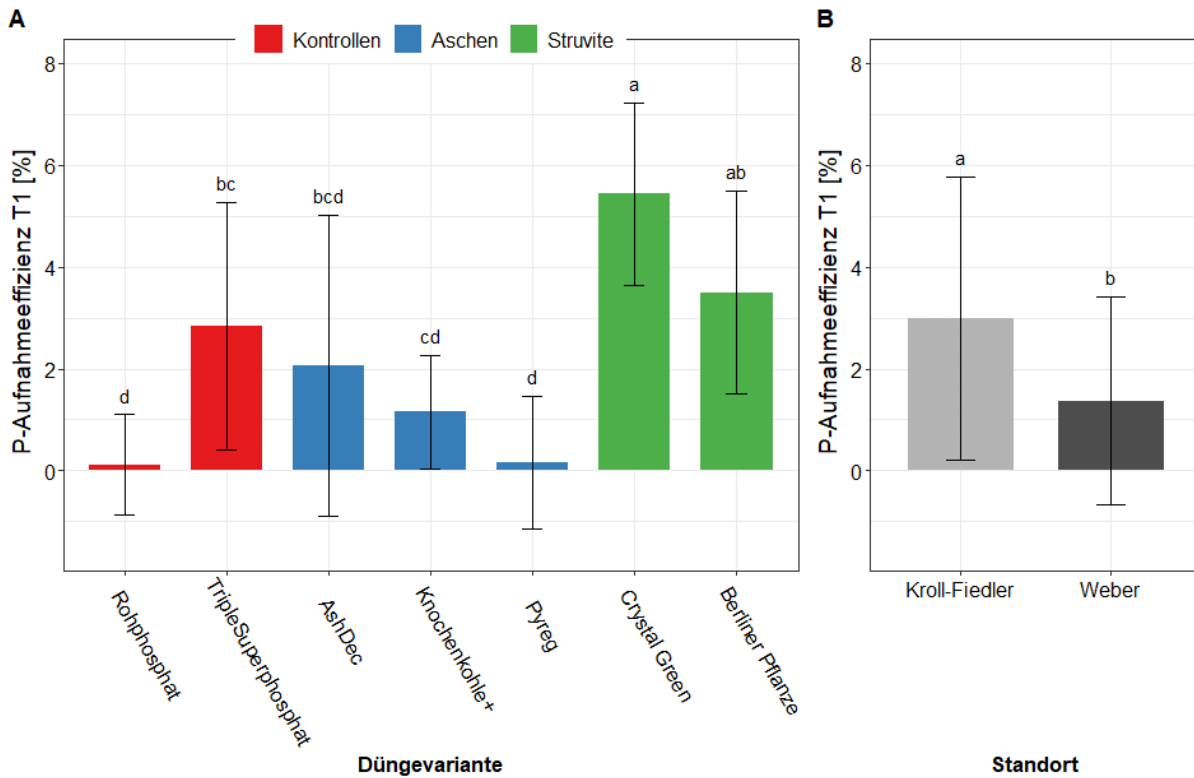


**Abb. 23: Gesamtphosphoraufnahme [kg P ha<sup>-1</sup>] der ersten, zweiten und dritten Zeiternte am Standort Weber in Abhängigkeit differenzierter P-Düngung:** unterteilt in die Gruppen Kontrollen (rot), Asche- (blau) und Struvitprodukte (grün). Säulen mit verschiedenen Buchstaben innerhalb eines Graphens unterscheiden sich signifikant: Tukey-Test,  $\alpha = 0,05$

### 5.2.2.2 Phosphoraufnahmeeffizienz

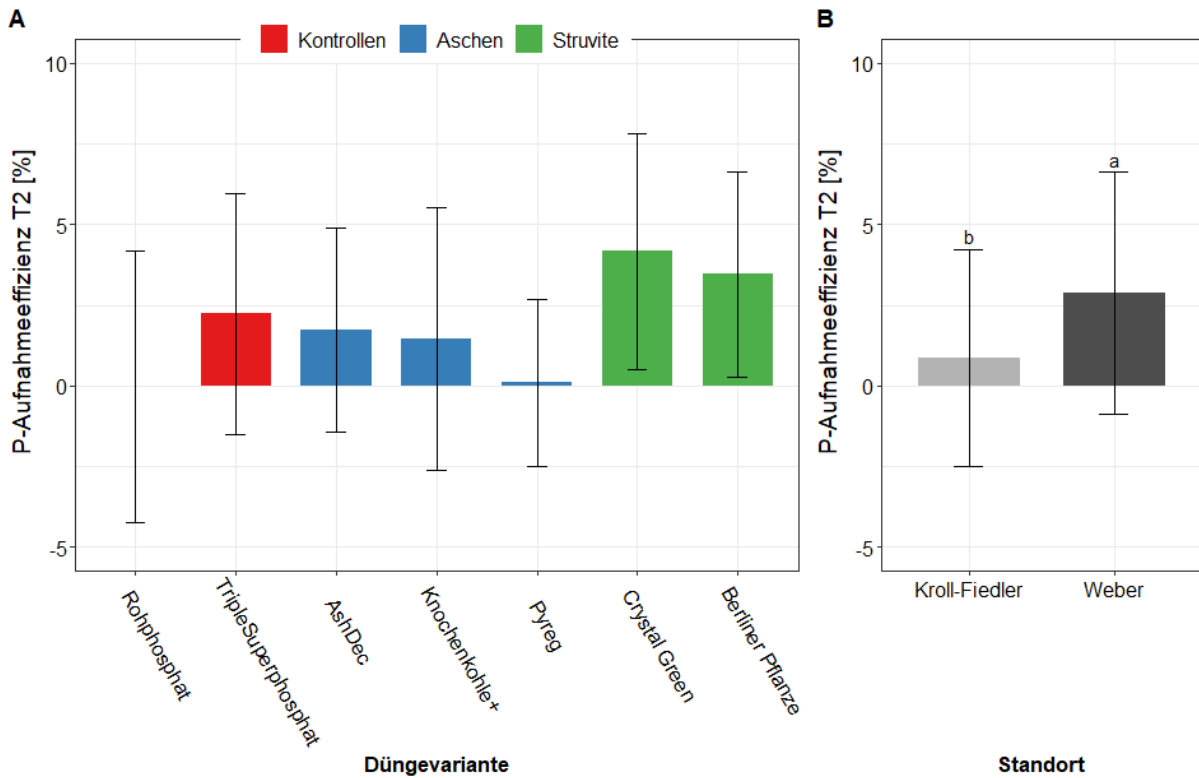
#### Zeiternte

Mit Hilfe der Netto-Phosphoraufnahme der oberirdischen Biomasse und der gedüngten Menge P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> konnte die Phosphoraufnahmeeffizienz bestimmt werden (vgl.4.4 Datenerfassung). Die Phosphoraufnahmeeffizienz der ersten Zeiternte wurde in Abhängigkeit von der Düngevariante (Abb. 24A) und des Standortes (Abb. 24B) erfasst. Zum Zeitpunkt der ersten Zeiternte erreichte CG den signifikant höchsten Wert mit einer Aufnahmeeffizienz von 5,4%. Die verbleibenden Düngemittel, mit Ausnahme von BP, wiesen eine signifikant niedrigere Effizienz auf. TSP erzielte mit 2,8% nur einen etwa halb so hohen Wert wie CG. Damit wies es nicht nur signifikante Unterschiede zu CG, sondern auch zu KK, RP und PY auf. Die drei zuletzt genannten Düngemittel lieferten die signifikant niedrigsten P-Aufnahmeeffizienzen. Dabei zeigten PY mit 0,2% und RP mit 0,1% (fast) keinen positiven Aufnahme-Effekt (im Vergleich zur ungedüngten Kontrolle). Auch zwischen den beiden Standorten (Abb. 24B) konnten signifikante Unterschiede ermittelt werden. So erzielte der Standort KF (2,99%) einen um 54,2% höhere Phosphoraufnahmeeffizienz als der Standort W (1,4%). Die Phosphoraufnahmeeffizienzen der einzelnen Düngemittel (Abb. 24A) und der Standorte (Abb. 24B) sind zudem gekennzeichnet von hohen Standardabweichungen und weisen zudem Blockeffekte auf.



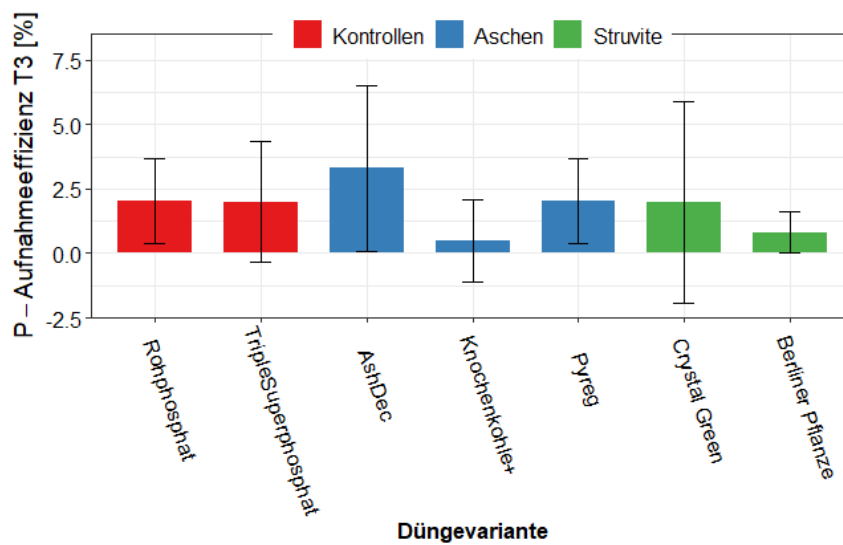
**Abb. 24: Phosphoraufnahmeeffizienz [%] der ersten Zeiternte (T1) in Abhängigkeit (A) differenzierter P-Düngung:** unterteilt in die Gruppen Kontrollen (rot), Asche- (blau) und Struvitprodukte (grün) und **(B) in Abhängigkeit des Standortes:** Weber (10.06.2021) und Kroll-Fiedler (30.06.2021). Säulen mit verschiedenen Buchstaben innerhalb eines Graphens unterscheiden sich signifikant: Tukey-Test,  $\alpha = 0,05$

Analog wurde die P-Aufnahmeeffizienz für die zweite Zeiternte (T2) bestimmt. Es konnte kein signifikanter Einfluss der verschiedenen Düngemittel auf die P-Aufnahmeeffizienz festgestellt werden (Abb. 25A). Tendenziell erzielten die Struvitprodukte die höchsten Effizienzen mit 4,2% für CG bzw. 3,5% für BP, worauf TSP mit 2,2% folgte. Die niedrigsten Werte erzielten PY mit 0,1% und RP. Dabei wies RP mit -0,02% sogar eine negative Aufnahmeeffizienz (im Vergleich zur ungedüngten Kontrolle) auf. Hingegen konnten signifikante Unterschiede zwischen den Standorten bestimmt werden (Abb. 25B). So erreichte diesmal, anders als beim ersten Schnitt, der Standort W eine höhere Effizienz (2,9%). Diese lag um 69,4%% höher als am Standort KF (0,9%). Auch hier war die P-Aufnahmeeffizienz sowohl der Düngemittel (Abb. 25A) als auch der Standorte (Abb. 25B) von hohen Standardabweichungen geprägt. Blockeffekte wurden hingegen nicht ermittelt.



**Abb. 25: Phosphoraufnahmeeffizienz [%] der zweiten Zeiternte (T2) in Abhängigkeit (A) differenzierter P-Düngung:** unterteilt in die Gruppen Kontrollen (rot), Asche- (blau) und Struvitprodukte (grün) und **(B) in Abhängigkeit des Standortes:** Weber (28.07.2021) und Kroll-Fiedler (20.08.2021). Säulen mit verschiedenen Buchstaben innerhalb eines Graphens unterscheiden sich signifikant: Tukey-Test,  $\alpha = 0,05$

Die P-Aufnahmeeffizienz der dritten Zeiternte wurde ausschließlich für den Standort W bestimmt (Abb. 26). Hier ließ sich kein signifikanter Einfluss der Düngemittel auf die P-Aufnahmeeffizienz feststellen. Den höchsten Wert erzielte AD mit 3,3%, gefolgt von TSP, PY und RP jeweils mit 2%. Die geringste Effizienz wurde von KK (0,5%) erreicht, welche um 85,7% niedriger war verglichen mit AD. Die Phosphoraufnahmeeffizienzen der einzelnen Düngemittel weisen zudem hohe Standardabweichungen und signifikante Blockeffekte auf.

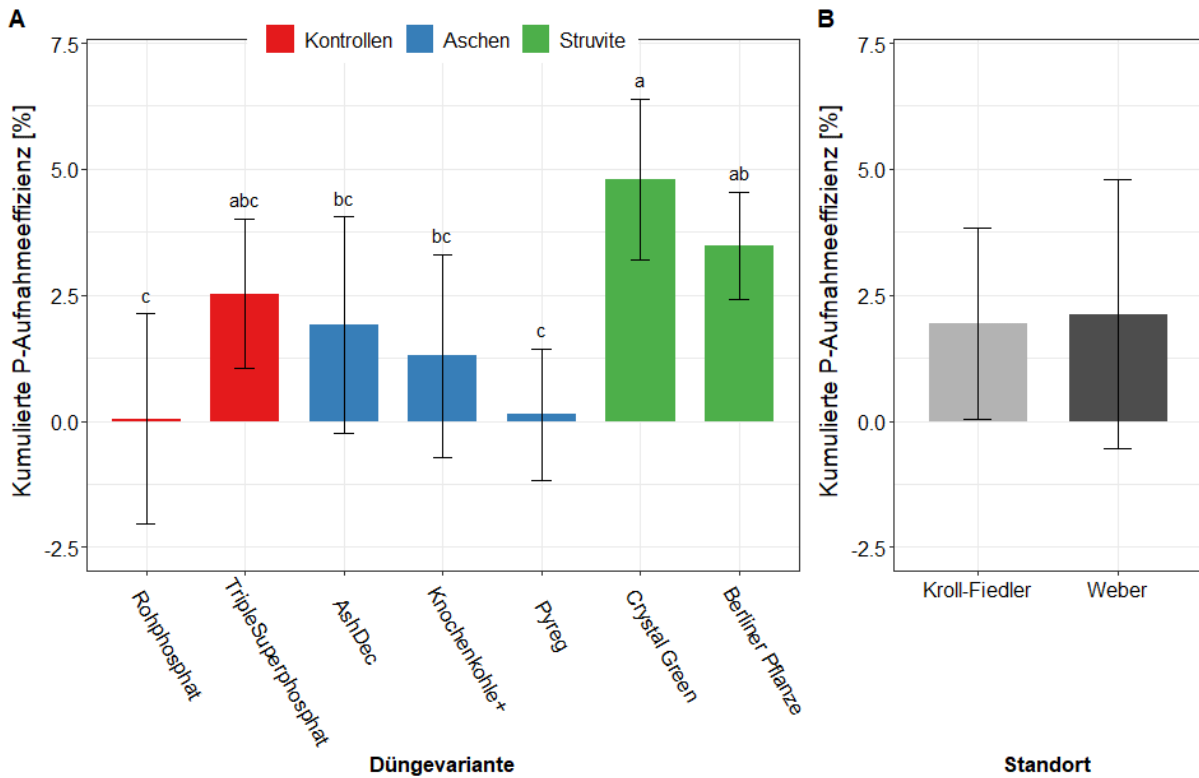


**Abb. 26: Phosphoraufnahmeeffizienz [%] der dritten Zeiternte (T3; 25.10.2021) am Standort Weber in Abhängigkeit differenzierter P-Düngung:** unterteilt in die Gruppen Kontrollen (rot), Asche (blau) und Struvitprodukte (grün) Säulen mit verschiedenen Buchstaben innerhalb eines Graphens unterscheiden sich signifikant: Tukey-Test,  $\alpha = 0,05$

### Kumulierte P-Aufnahmeeffizienz

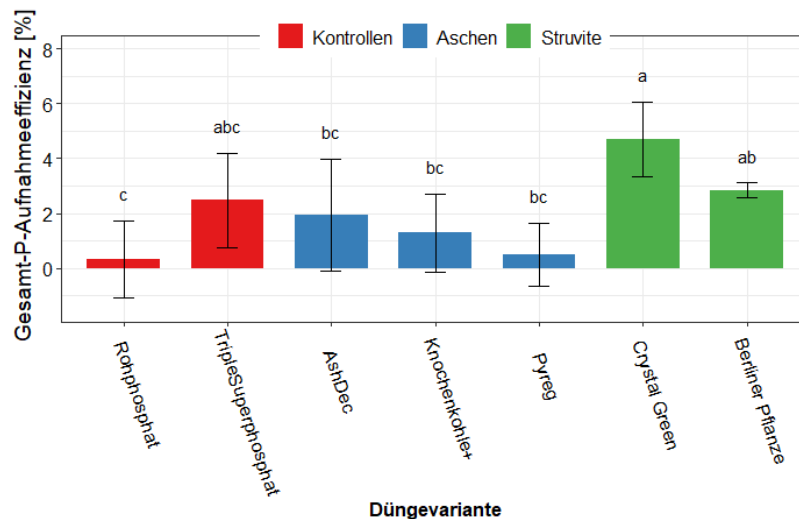
Die kumulierte Phosphoraufnahmeeffizienz der ersten beiden Zeiternten wurde in Abhängigkeit von der Düngevariante (Abb. 27A) und des Standortes (Abb. 27B) erfasst. Die Struvitprodukte (CG, BP) wiesen eine signifikant höhere P-Aufnahmeeffizienz als RP und PY auf. CG erzielte mit 4,8% den höchsten Wert aller Düngemittel. Damit erreichte CG eine um 99% höhere Aufnahmeeffizienz als RP, das die geringste Effizienz (0,05%) aufwies. CG war zudem signifikant zu AD (1,9%) und KK (1,3%). TSP wies keine signifikanten Unterschiede zu einem der Düngemittel auf.

Für den Standort konnte kein signifikanter Einfluss auf die Aufnahmeeffizienz ermittelt werden (Abb. 27B). Der Standort W konnte dennoch eine um 8,5% höhere Aufnahmeeffizienz über die beiden Zeiternten erreichen. Zudem sind die Phosphoraufnahmeeffizienzen der einzelnen Düngemittel (Abb. 27A) und der Standorte (Abb. 27B) von hohen Standardabweichungen geprägt.



**Abb. 27: Gesamtphosphoraufnahmeeffizienz [%] der ersten und zweiten Zeiternte in Abhängigkeit (A) differenzierter P-Düngung:** unterteilt in die Gruppen Kontrollen (rot), Asche- (blau) und Struvitprodukte (grün) **und (B) in Abhängigkeit des Standortes.** Säulen mit verschiedenen Buchstaben innerhalb eines Graphens unterscheiden sich signifikant: Tukey-Test,  $\alpha = 0,05$

Für den Standort Weber wurde analog die Gesamtphosphoraufnahmeeffizienz über die drei Zeiternten ermittelt (Abb. 28). Dabei unterschied sie sich in ihren Signifikanzen kaum von der kumulierten Phosphoraufnahmeeffizienz der ersten beiden Zeiternten an beiden Standorten (Abb. 27A). Nur *PY* wies eine verhältnismäßig höhere Effizienz auf, sodass sich keine signifikanten Unterschiede zu *BP* ermitteln ließen.



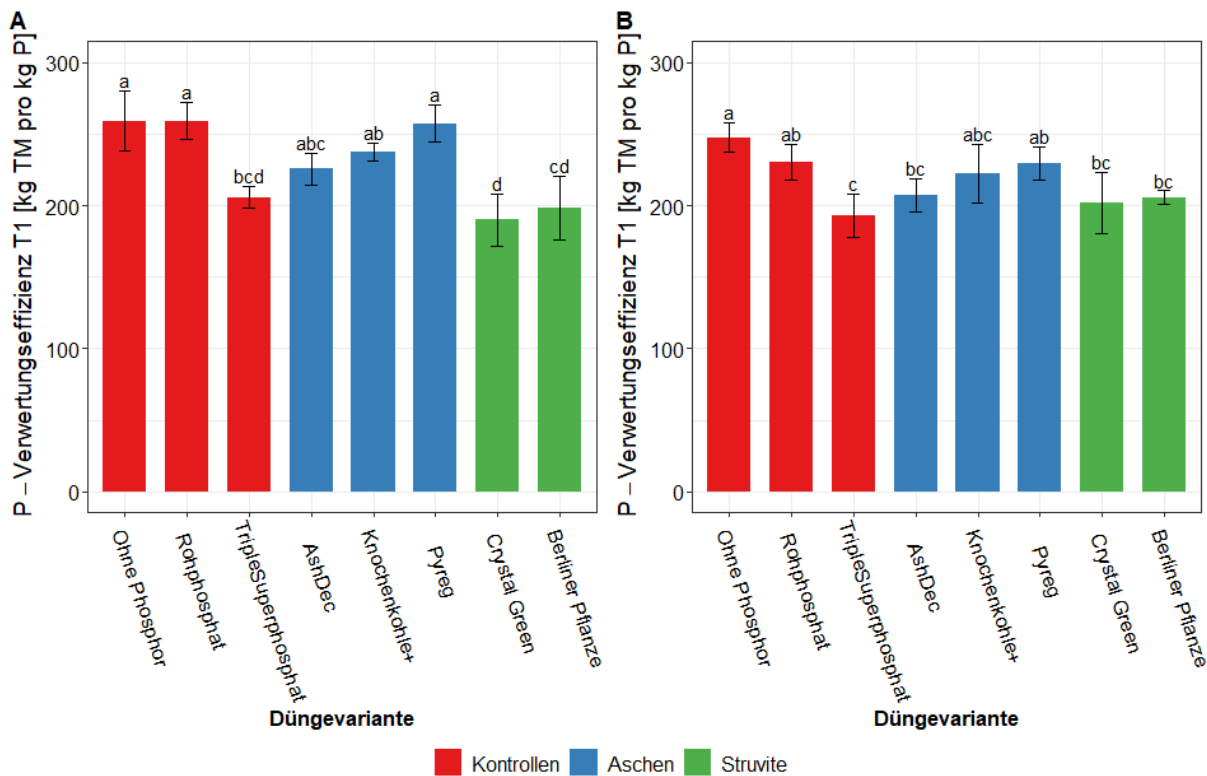
**Abb. 28:** Gesamtposphoraufnahmeeffizienz [%] der ersten, zweiten und dritten Zeiternte am Standort Weber in Abhängigkeit differenzierter P-Düngung: unterteilt in die Gruppen Kontrollen (rot), Asche- (blau) und Struvitprodukte (grün). Säulen mit verschiedenen Buchstaben innerhalb eines Graphens unterscheiden sich signifikant: Tukey-Test,  $\alpha = 0,05$

### 5.2.2.3 Phosphorverwertungseffizienz

#### Zeiternte

Die Phosphorverwertungseffizienz der ersten Zeiternte (T1) wurde für den Standort W (Abb. 29A) und für den Standort KF (Abb. 29B) getrennt ausgewertet. Bei beiden Standorten konnte die signifikant höchste Phosphorverwertungseffizienz durch *OP* mit 259,19 kg TM pro aufgenommenem kg P (W) bzw. mit 247,68 kg TM pro aufgenommenem kg P (KF) erzielt werden. Damit unterschied sich neben *OP*, *RP* und *PY* signifikant von *TSP*, *CG* und *BP* für den Standort W. Für den Standort KF wies nur *OP* signifikante Unterschiede zu *TSP*, *CG*, *BP* und zusätzlich zu *AD* auf. Den niedrigsten Wert für den Standort W erzielte *CG* mit einem um 26,7% niedrigeren Wert verglichen mit *OP*. Hingegen erreichte *TSP* für den Standort KF die geringste Phosphorverwertungseffizienz mit einem um 22,1% niedrigeren Wert verglichen mit *OP*.

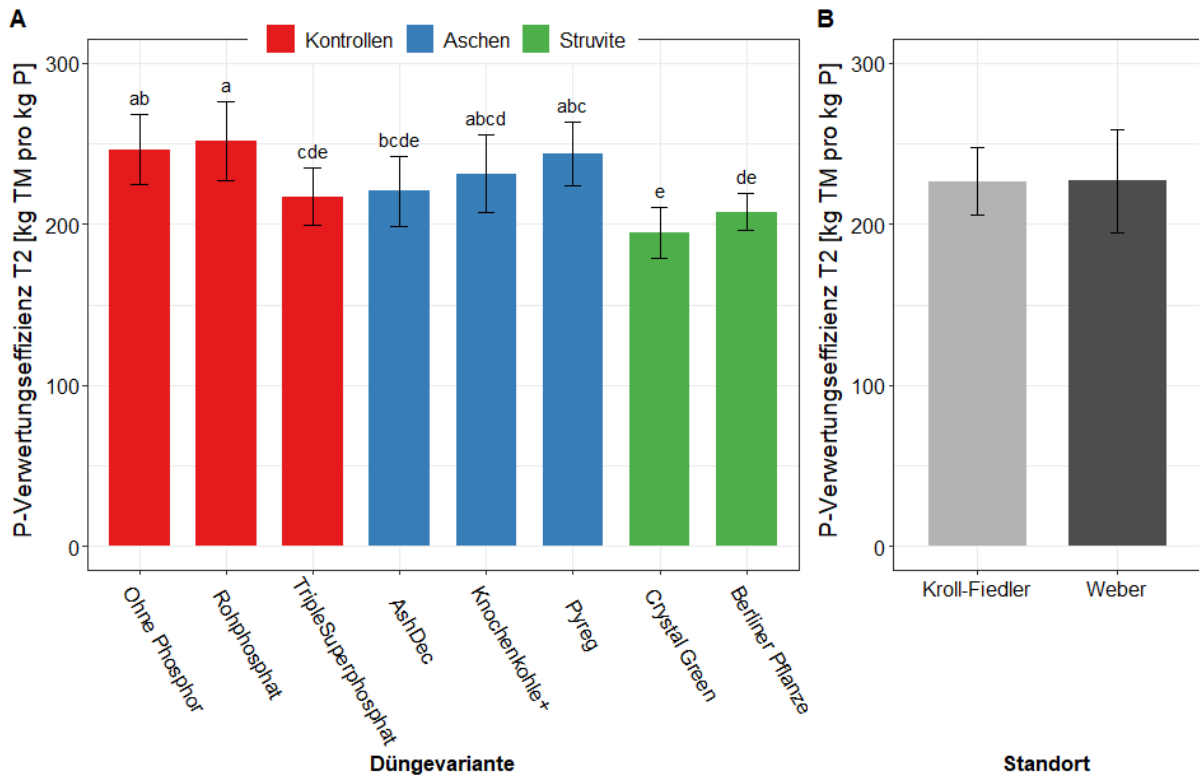




**Abb. 29: Phosphorverwertungseffizienz [kg TM pro kg P] der ersten Zeiternte (T1) in Abhängigkeit differenzierter P-Düngung:** unterteilt in die Gruppen Kontrollen (rot), Asche- (blau) und Struvitprodukte (grün) für die Standorte **(A) Weber** (10.06.2021) und **(B) Kroll-Fiedler** (30.06.2021). Säulen mit verschiedenen Buchstaben innerhalb eines Graphens unterscheiden sich signifikant: Tukey-Test,  $\alpha = 0,05$

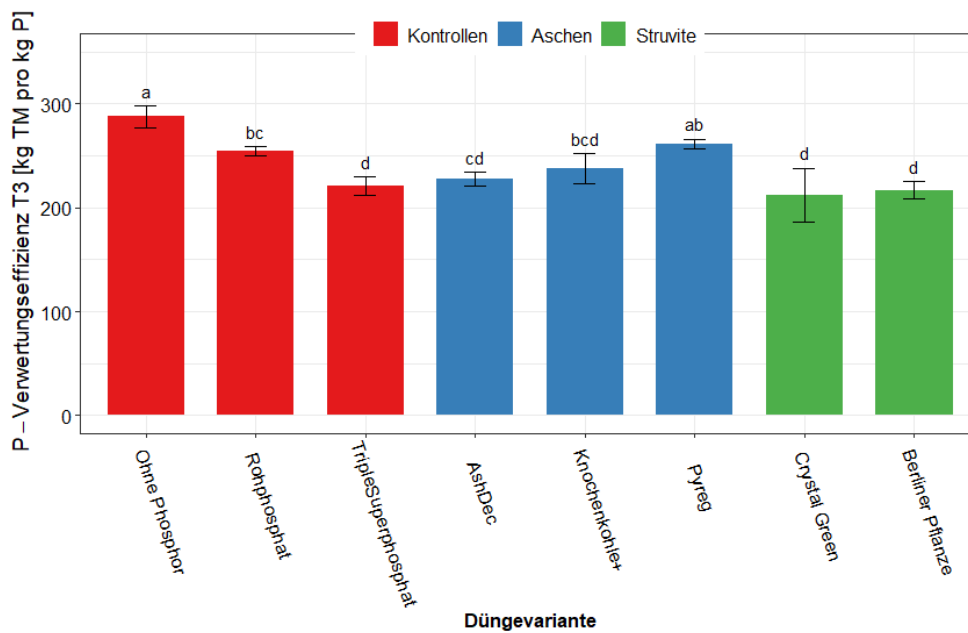
Die Auswertung der P-Verwertungseffizienz der zweiten Zeiternte (T2) erfolgte für beide Standorte gemeinsam. Es wurde für beide Standorte ein signifikanter Einfluss der verschiedenen Düngemittel auf die Verwertungseffizienz festgestellt (Abb. 30A). So erzielte *RP* mit 254,5 kg TM pro aufgenommenem kg P die signifikant höchste Effizienz und erreichte einen um 20,9% höheren Wert verglichen mit *CG*, dem niedrigsten Wert. Das gleiche Signifikanzniveau wie *RP* wiesen auch *OP*, *KK* und *PY* auf. Damit unterschieden sie sich signifikant von den verbleibenden Düngemitteln. Ähnlich wie in der ersten Zeiternte ergab sich eine absteigende Reihenfolge der Düngemittel von *RP* > *OP* > *PY* > *KK* > *AD* > *TSP* > *BP* > *CG*.

Hingegen konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Standorten bestimmt werden (Abb. 30B). So wich die Effizienz des Standortes *W* mit 226,9 kg TM pro aufgenommenem kg P gerade einmal um 0,1% vom Standort *KF* ab. Zudem wurden Blockeffekte für die einzelnen Düngemittel festgestellt.



**Abb. 30: Phosphorverwertungseffizienz [kg TM pro kg P] der zweiten Zeiternte (T2) in Abhängigkeit (A) differenzierter P-Düngung:** unterteilt in die Gruppen Kontrollen (rot), Asche- (blau) und Struvitprodukte (grün) und **(B) in Abhängigkeit des Standortes:** Weber (28.07.2021) und Kroll-Fiedler (20.08.2021). Säulen mit verschiedenen Buchstaben innerhalb eines Graphens unterscheiden sich signifikant: Tukey-Test,  $\alpha = 0,05$

Die Phosphorverwertungseffizienz der dritten Zeiternte wurde nur für den Standort Weber ermittelt (Abb. 31). Dabei erreicht *OP* mit 287,6 kg TM pro aufgenommenem kg P den höchsten Wert und unterschied sich signifikant von allen Düngemitteln außer *PY*. Die geringsten Effizienzen wiesen hingegen die Struvitprodukte (*CG*: 212,3 *BP*: 216,9 kg TM pro kg P) und *TSP* (220,8 kg TM pro kg P) auf. Damit unterschieden sie sich signifikant von *OP*, *RP* und *PY*.

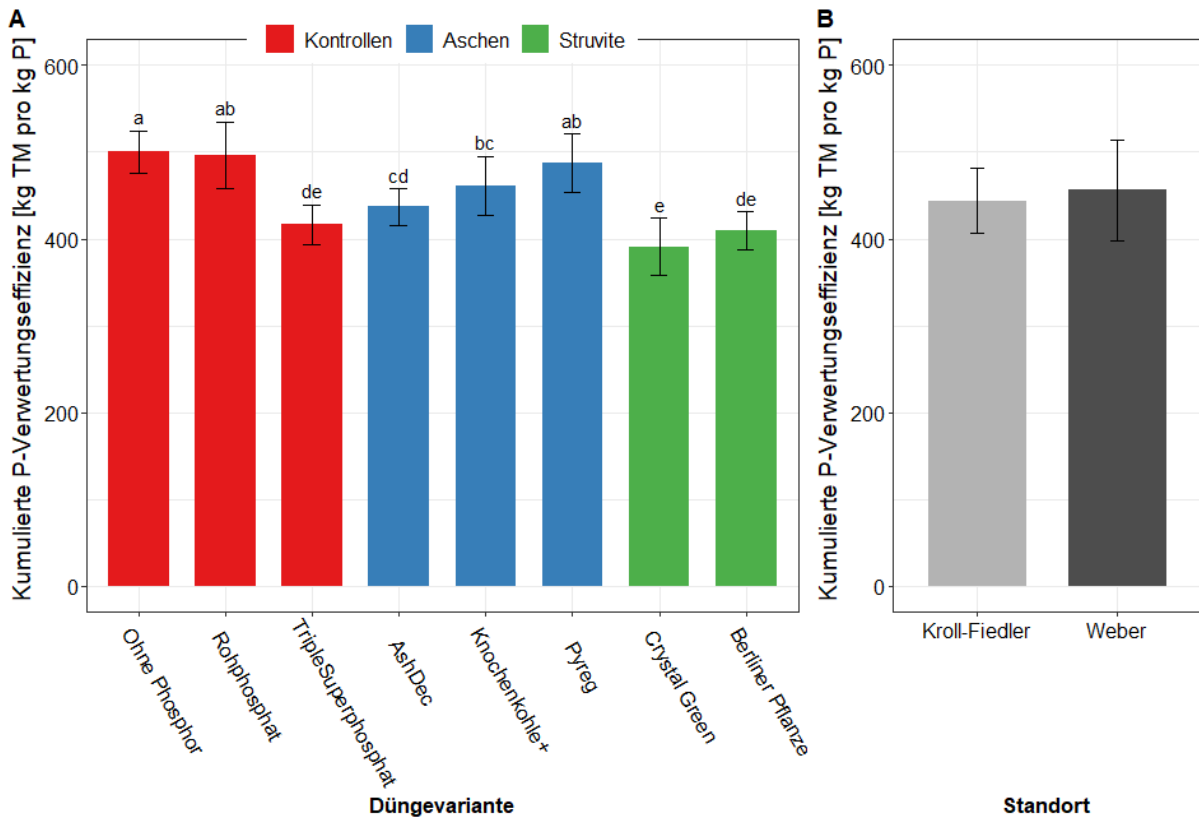


**Abb. 31: Phosphorverwertungseffizienz [kg TM pro kg P] der dritten Zeiternte (T3; 25.10.2021) für den Standort Weber in Abhängigkeit differenzierter P-Düngung:** unterteilt in die Gruppen Kontrollen (rot), Asche- (blau) und Struvitprodukte (grün). Säulen mit verschiedenen Buchstaben innerhalb eines Graphens unterscheiden sich signifikant: Tukey-Test,  $\alpha = 0,05$

### *Kumulierte P-Verwertungseffizienz*

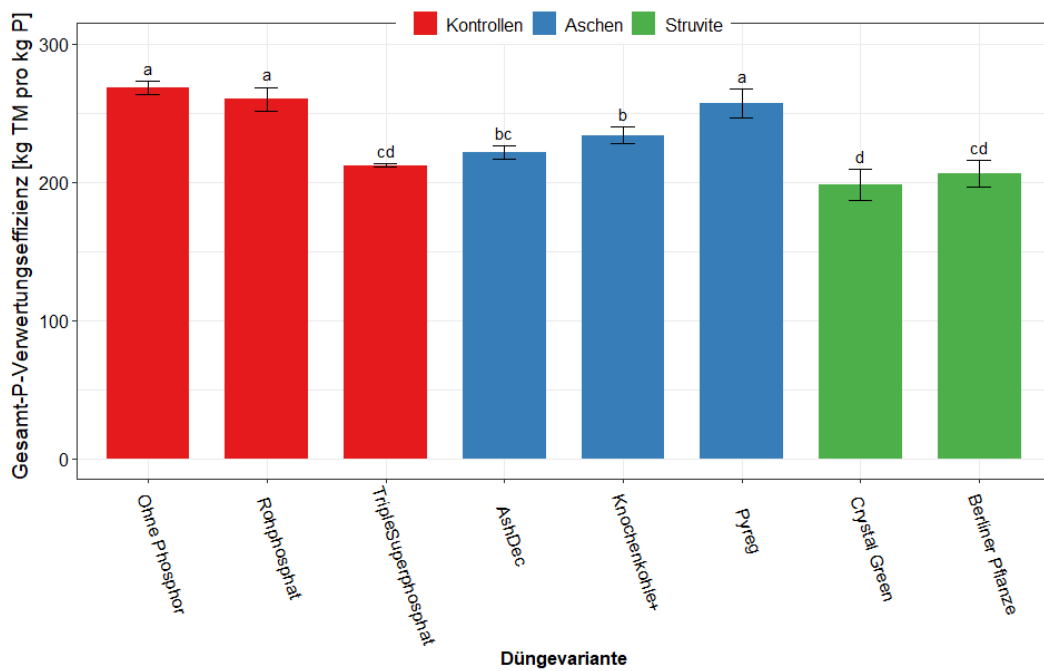
Die kumulierte Phosphorverwertungseffizienz der ersten beiden Zeiternten wurde in Abhängigkeit von der Düngevariante (Abb. 32A) und des Standortes (Abb. 32B) erfasst. *OP*, *RP* und *PY* wiesen eine signifikant höhere P-Aufnahmeeffizienz als *TSP*, *AD*, *CG* und *BP* auf. Dabei erreichte *OP* einen um 21,8% höheren Wert vergleichen mit *CG*, dem niedrigsten Wert.

Für den Standort konnte kein signifikanter Einfluss auf die Verwertungseffizienz ermittelt werden (Abb. 32B).



**Abb. 32: Kumulierte Phosphorverwertungseffizienz [kg TM pro kg P] der ersten und zweiten Zeiternte in Abhängigkeit (A) differenzierter P-Düngung:** unterteilt in die Gruppen Kontrollen (rot), Asche- (blau) und Struvitprodukte (grün) und **(B) in Abhängigkeit des Standortes.** Säulen mit verschiedenen Buchstaben innerhalb eines Graphens unterscheiden sich signifikant: Tukey-Test,  $\alpha = 0,05$

Für den Standort Weber wurde analog die Gesamtphosphoraufnahmeeffizienz über die drei Zeiternten ermittelt (Abb. 33). Die Kontrollvarianten *OP* und *RP* sowie das Ascheprodukt *PY* erzielten die höchsten Effizienzen und unterschieden sich damit signifikant von allen verbliebenen Düngevarianten. Die signifikant niedrigsten Effizienzen wurden durch *TSP*, *CG* und *BP* erzielt, wobei *CG* den geringsten Wert aufwies. Damit erzielte *CG* eine um 26,2% niedrigere Verwertungseffizienz als *OP* dem höchsten Wert mit 268,15 kg TM pro kg P.



**Abb. 33: Gesamtphosphorverwertungseffizienz [kg TM pro kg P] der ersten, zweiten und dritten Zeiternte am Standort Weber in Abhängigkeit differenzierter P-Düngung:** unterteilt in die Gruppen Kontrollen (rot), Aschen- (blau) und Struvitprodukte (grün). Säulen mit verschiedenen Buchstaben innerhalb eines Graphens unterscheiden sich signifikant: Tukey-Test,  $\alpha = 0,05$

## 6. Diskussion

Die Ergebnisse des hier vorliegenden Versuches weisen darauf hin, dass der Ertrag und die P-Aufnahme von Klee gras im ökologischen Landbau durch einzelne P-Recyclingdünger signifikant erhöht werden kann, sodass sie in ihrer Wirkung einer *TSP*-Düngung entsprechen und eine *RP*-Düngung sogar übertreffen können. Andererseits konnte gezeigt werden, dass eine einmalige hohe Düngemittelgabe zu Beginn der Fruchtfolge vorübergehend zu einem Überangebot an P und damit zu einer eingeschränkten Ertragswirkung sowie zu einer Abnahme der P-Verwertungseffizienz der Pflanzen führen kann. Nachfolgend werden die gewonnenen Ergebnisse in Bezug auf den aktuellen Forschungsstand diskutiert. Dafür werden folgende Fragen beantwortet:

- (1) Wie sind die erzielten Erträge, insbesondere auch die Unterschiede zwischen den beiden Standorten, einzuordnen?
- (2) Warum wurde insgesamt nur eine geringe Ertragswirkung auch im Hinblick auf die etablierten Düngemittel Rohphosphat und Triplesuperphosphat erzielt?
- (3) Wie schneiden die P-Recyclingdünger im Vergleich zu den Positiv- und Negativkontrollen ab?

Abschließend erfolgt eine kurze Methodenkritik zur Vorgehensweise bei der Versuchsanlage und -durchführung. Zudem wird auf eine mögliche Zulassung der P-Recyclingdünger im Ökolandbau, ihr Potential und mögliche Problemstellungen eingegangen.

### 6.1 Einfluss der Standortfaktoren

Die Versuchsböden wiesen mit 42 (KF) und 47 (W) Bodenpunkten eine mittlere Ertragsfähigkeit auf. So lagen an beiden Standorten der Humusgehalt (3,4%) und das C/N Verhältnis ( $>10$ ) im durchschnittlichen und der  $N_{\min}$ -Gehalt für ackerbaulich genutzte Böden im überdurchschnittlichen Bereich. Zudem waren die Wachstumsbedingungen während des Versuchszeitraums günstig. Dazu gehörte eine gute Wasserversorgung insbesondere in den niederschlagsreichen Monaten Juli und August (Zeitpunkt des zweiten Schnittes) sowie milde Temperaturen, die im Durchschnitt um 0,7 °C wärmer als im langjährigen Mittel waren (vgl.4.1).

Eine Einschätzung der Ertragshöhe gestaltet sich jedoch für Klee gras oder andere Gemenge des Feldfutterbaus schwierig. Ursächlich ist, dass die Ernteprodukte v.a. im ökologischen Landbau in der Regel nicht verkauft, sondern innerbetrieblich genutzt und infolge dessen häufig nicht bemessen werden. Dennoch werden durch das Statistische Bundesamt jedes Jahr Erhebungen durchgeführt. In Deutschland betrug der durchschnittliche Ertrag für Feldgras (einschließlich Mischungen mit überwiegendem Grasanteil) auf dem Ackerland 79,7 dt TM ha<sup>-1</sup> für das Jahr 2021, wobei die Werte zwischen den Bundesländern von 42,4 dt TM ha<sup>-1</sup> in Sachsenanhalt bis 101,7 dt TM ha<sup>-1</sup> in Niedersachsen schwankten (DESTATIS 2022). An beiden Standorten des hier vorliegenden Versuches konnten für organisch produziertes Klee gras vergleichsweise hohe Erträge von 74,1 dt TM ha<sup>-1</sup> (KF; zwei Schnitte) bzw. 88,1 dt TM ha<sup>-1</sup> (W;

drei Schnitte) erzielt werden. Dies entspricht 92,9% bzw. 110,6% des bundesweiten Durchschnitts. Vergleicht man die Erträge jedoch mit den bisher unveröffentlichten Daten eines Demonet-KleeLuzPlus Projektes der LWK unter der Leitung von Sebastian Glowacki, kommt man zu einem anderen Ergebnis. Das Projekt untersuchte über 2 Jahre verschiedene Kleegrasmischungen am Standort KF, wobei im Jahr 2020 durchschnittlich 124 dt TM ha<sup>-1</sup> und im niederschlagsreichen Jahr 2021 149 dt TM ha<sup>-1</sup> erzielt werden konnten. Demnach konnten die Versuchsflächen nur knapp 49,7% (KF) bzw. 59,1% (W) des Ertrages des Demonet-KleeLuzPlus Projektes im Jahr 2021 erreichen und erzielten damit vergleichsweise sehr niedrige Erträge. Zu beachten ist jedoch, dass die Versuchsflächen erst im Frühjahr des Erntejahres 2021 ausgesät wurden und nicht wie üblich und es für das Demonet-KleeLuzPlus Projekt geschehen ist, im Herbst des vorherigen Jahres. Bei einer Ansaat im Frühjahr ist prinzipiell durch einen erhöhten Unkrautdruck und einer kürzeren Etablierungszeit des Bestandes mit niedrigeren Erträgen zu rechnen (BERENDONK 2013; LFL 2016). Wie gut sich die Bestände tatsächlich etabliert haben und wie die Erträge zu bewerten sind, lässt sich daher erst im Folgejahr abschließend einschätzen.

Die beiden Standorte wiesen, trotz der geringen Entfernung voneinander (ca. 5,8 km) und den damit verbundenen sehr ähnlichen Umwelteinflüssen große Unterschiede in ihren Erträgen auf. So erzielte der Standort KF im Durchschnitt für die ersten beiden Schnitte einen um 23,2% höheren Ertrag als der Standort W auf. Eine mögliche Ursache für die enormen Unterschiede, könnten die geringen Kalium-Gehalte (K) am Standort W sein. Nach VDLUFA-Kategorisierung war der Standort KF in anzustrebendem Maße (Gehaltsklasse C) versorgt, während der Standort W nur niedrige (Gehaltsklasse B) fast schon sehr niedrige (A) Gehalte aufwies (LWK 2015A). Eine ausreichende K-Versorgung ist notwendig, um den osmotischen Druck und den Wasserhaushalt zu steuern. Zudem spielt es eine entscheidende Rolle für die Photosynthese, N-Fixierung, Stärkebildung und Zuckereinlagerung der Pflanze (AMELUNG ET AL. 2018B). Damit ist es ausschlaggebend für die Ertragsbildung und die Qualität von Kleegrasmischungen.

Zudem unterschieden sich die beiden Standorte hinsichtlich der P-Aufnahme der Pflanzen. Diese war, wie auch die Erträge, am Standort W signifikant geringer als am Standort KF. In Bezug auf die Phosphoraufnahme- und die Phosphorverwertungseffizienz unterschieden sich die Standorte jedoch nicht. Dies deutet daraufhin, dass die höhere P-Aufnahme am Standort KF für die Ertragsdifferenz zwischen den beiden Standorten verantwortlich war. Dabei ist die P-Aufnahme u.a. vom pH-Wert der Bodenlösung abhängig, welche am Standort Weber 5,3 und am Standort KF 6,5 betrug. Das pH-Optimum für die P-Aufnahme liegt zwischen 6-7, wobei die Wahrscheinlichkeit einer Adsorption an Fe- und Al-Minerale mit abnehmendem pH steigt (BARROW 2017). Es ist anzunehmen, dass das Potential zur P-Fixierung daher am Standort W deutlich höher und infolgedessen für die niedrigeren Erträge verantwortlich war.

Der pH-Wert beeinflusst jedoch nicht nur die P-Aufnahme, sondern ist auch relevant für weitere ackerbauliche Faktoren wie die Verfügbarkeit von weiteren Mikro- und Makronährstoffe, die Mobilität von Schwermetallen oder die Zusammensetzung der Bodenorganismen

(AMELUNG ET AL. 2018A; KRETZSCHMAR 2018). Für schluffige Lehmböden mit Humusgehalten unter 4%, wie denen der Versuchsstandorte, wird daher ein pH-Wert von 6,8 empfohlen (LWK 2015c). Dementsprechend könnte der niedrigere pH-Wert am Standort W verschiedene Faktoren beeinflusst haben, die zu einer geringen Ertragsbildung geführt haben. Somit bleibt offen, inwiefern sich weitere Faktoren auf die Ertragsbildung ausgewirkt haben, die in diesem Versuch nicht erfasst wurden.

## 6.2 Ertragswirkung der Kontrollen

Trotz der zu Beginn der Vegetationsperiode bestimmten niedrigen P-Gehalte der Böden, konnte in diesem Versuch für die verschiedenen Düngevarianten insgesamt nur eine geringe Ertragswirkung erzielt werden. Zu erwarten war jedoch, wie bereits in zahlreichen Studien bestätigt wurde, eine hohe Wirksamkeit des im konventionellen Anbau zugelassenen *TSP*, wohingegen der Einsatz von *RP* bisher häufig nur zu einer eingeschränkten Wirkung führte.

Wie gut Phosphor im Boden verfügbar ist hängt wie im Kapitel 2.2 beschrieben vor allem vom pH Wert, aber auch von der Mobilität des Nährstoffs, der Wasserversorgung und dem Aneignungsvermögen der jeweiligen Pflanzenart ab. Die direkte Verwendung von weicherdigen Rohphosphaten wird vor allem für Böden mit einem pH von unter 5,5 empfohlen, wobei die Löslichkeit und damit die P-Aufnahme durch die Wurzeln mit sinkendem pH zunimmt. Liegt der pH-Wert über 6, steigt die Wahrscheinlichkeit einer Ausfällung als Calciumphosphat, wodurch die Pflanzenverfügbarkeit stark eingeschränkt wird (ALBERT ET AL. 2008; PAULSEN ET AL. 2016). Zwar ist die Löslichkeit des *RPs* bei niedrigem pH höher, doch kann die pflanzenverfügbare P-Menge abnehmen, da es zu einer Zunahme der P-Adsorption an Eisen- und Aluminiumoxide kommt (BARROW 2017; BOLAN UND HEDLEY 1990; LAMBERS 2022). Während für einige Kulturen wie Mais insbesondere bei P-Mangelbedingungen eine erhöhte P-Aufnahme und ertragssteigernde Effekte für pH-Werte von 4 bis 5 durch eine *RP*-Düngung erzielt werden konnte (KASNO UND SUTRIADI 2012; LUKIWATI 2002), ist eine genaue Vorhersage des optimalen pH-Bereiches für Kleeegrasmischungen durch die hohe Variabilität der Zusammensetzung deutlich schwieriger. Dennoch fanden DUNLOP UND BOWLING 1978 für Weißklee, einem gängigen Vertreter in Kleeegrasmischungen, ein ähnliches pH-Optimum von 4,3 für die P-Aufnahme. In einigen Studien konnte zudem gezeigt werden, dass Leguminosen vor allem bei niedrigen P-Gehalten in der Bodenlösung schneller und stärker auf eine P-Düngung reagieren als Gräser (ACUÑA UND INOSTROZA 2013). Dies könnte zum einen an den hohen P-Ansprüchen von Leguminosen (SINGH UND SALE 1998), zum anderen an der niedrigeren P-Aufnahmerate der Gräser liegen (MENGEL 1983). Zusätzlich konnte in anderen Studien für verschiedene Kulturen eine starke Abhängigkeit zwischen der P-Aufnahme und der Biomasseproduktion (ACUÑA UND INOSTROZA 2013; SANDAÑA 2016; VISTOSO ET AL. 2021) festgestellt werden. In dem vorliegenden Versuch führte eine Düngung mit *RP* nicht zu einer erhöhten P-Aufnahme und damit zu keiner signifikanten Ertragssteigerung. Die Böden der Versuchsstandorte wiesen pH-Werte von 5,3 (W) bzw. 6,5 (KF) auf und lagen damit an der Grenze bzw. knapp oberhalb der



Werte für eine optimale P-Aufnahme für *RP*. Nicht nur die P-Aufnahme, sondern auch die Freisetzungsrates des P aus dem Dünger ist pH abhängig. Diese beträgt im Durchschnitt etwa 30% innerhalb des ersten Jahres nach der Anwendung. Aufgrund der geringen Löslichkeit des *RP* bleibt eine Wirkung, insbesondere im ersten Jahr häufig aus (BOLAN UND HEDLEY 1990; EDMEADES ET AL. 1991; SINCLAIR ET AL. 1993). Dies konnte auch in dem vorliegenden Versuch bestätigt werden. Insbesondere bei einem geringen P-Status des Bodens und pH-Werten wie denen der Versuchsstandorte, können Ertragsdefizite noch bis zu 6 Jahre nach der Applikation auftreten (EDMEADES ET AL. 1991). Es liegt daher nahe, dass die ausbleibende Ertragswirkung auf den pH-Wert zurückzuführen ist. Da das wasserlösliche *TSP* ebenfalls keinen Effekt auf den Ertrag oder die P-Aufnahme zeigte, ist anzunehmen, dass weitere Faktoren für die ausbleibende Ertragswirkung ausschlaggebend sind.

Der in *TSP* enthaltene P weist eine hohe Wasserlöslichkeit von über 90% auf, sodass er nahezu standortunabhängig gut pflanzenverfügbar ist (ALBERT ET AL. 2008; WAIDA UND KEHRES 2014). So konnten in einigen Studien auch unter P-Mangelbedingungen ertragssteigernde Effekte von *TSP* auf Klee, Gras und Kleeegrasmischungen belegt werden (ACUÑA UND WILMAN 1993; SINCLAIR ET AL. 1994), die insbesondere im ersten Jahr die Wirkung von *RP* übertrafen (BOLLAND UND GILKES 1995; SCHOLEFIELD ET AL. 1999). Eine positive Auswirkung der *TSP*-Düngung auf den Ertrag, konnte in dem vorliegenden Versuch nicht bestätigt werden. Lediglich für die P-Aufnahme übertraf *TSP* im zweiten Schnitt *RP*, in der kumulierten Aufnahme *RP* und die Negativkontrolle (*OP*) sowie in der Gesamt-P-Aufnahme *OP*. So konnte auch in einem Feldversuchen von SZILAS ET AL. 2007 mit Mais auf 10 Böden (pH 3,8-5,2; P-Olsen 1-31) gezeigt werden, dass eine Düngung mit *TSP* nur zu einer mit *RP* vergleichbaren Düngewirkung führt. Daneben blieb an einigen Standorten ein Ertragseffekt vollständig aus, was auf wachstumslimitierende Faktoren wie Frost, Wasserstress und Nährstoffmangel zurückzuführen war. Auch in dem vorliegenden Versuch könnte die Limitierung eines anderen Nährstoffes zu einer fehlenden Ertragswirkung von *TSP* geführt haben.

Zudem kann es trotz der hohen Wasserlöslichkeit des Düngers nach der Ausbringung durch die Umwandlung der leichtlöslichen Verbindungen in wasserunlösliche P-Formen innerhalb kürzester Zeit (zum Teil in nur 72 h) zur Festlegung des P im Boden kommen (BAAB 2014; KRATZ ET AL. 2016; RANIRO ET AL. 2022). Vor allem bei pH-Werten unter 6, wie sie an den Versuchsstandorten vorlagen, kommt es mit sinkendem pH verstärkt zur Adsorption an Eisen- oder Aluminiumoxide. Dabei könnte das P-Fixierungspotential am Standort Weber auf Grund des niedrigeren pH-Wertes (5,3) höher als am Standort Kroll-Fiedler (6,5) sein. Durch die rasche Festlegung des Ps stehen die Nährstoffe nicht dann zur Verfügung, wenn sie benötigt werden und wirken sich negativ auf den Ertrag aus. Dies könnte die insgesamt geringe Ertragswirkung sowie die Diskrepanz zwischen den beiden Standorten erklären.

Dabei hängt die Ertragswirkung nicht nur von der relativen P-Aufnahme, sondern auch von der Fähigkeit der Pflanze das aufgenommene P effektiv zu verwerten, ab. Die interne P-Verwer-

tungseffizienz ist hierbei abhängig von der Pflanzenart, der Sorte und dem P-Status des Bodens (BAYUELO-JIMÉNEZ UND OCHOA-CADAVID 2014; WANG ET AL. 2010). In dem vorliegenden Versuch erzielte die ungedüngte Variante, die höchste Verwertungseffizienz (500 bzw. 268 kg TM pro kg P<sub>aufgenommen</sub>), welche mit zunehmender Konzentration aufgenommenen Ps abnahm. Damit verhält sich die P-Verwertungseffizienz gegenläufig zur P-Aufnahme. So wurde durch eine CG Düngung zwar die höchste P-Aufnahme, aber auch die schlechteste P-Verwertungseffizienz (391 bzw. 198 kg TM pro kg P<sub>aufgenommen</sub>) erzielt. Dementsprechend führte eine steigende P-Aufnahme zu einer abnehmenden Verwertungseffizienz, was auch in anderen Studien mit Weizen (*Triticum aestivum*; RASUL 2016) und Mais (BAYUELO-JIMÉNEZ UND OCHOA-CADAVID 2014) gezeigt werden konnte. Im Unterschied zu diesen Studien, führte in diesem Versuch eine Mehraufnahme von P nicht zu einem signifikanten Mehrertrag, sodass die Erträge der ungedüngten Variante nicht signifikant schlechter als die von TSP waren.

Dies lässt vermuten, dass trotz der zu Beginn bestimmten niedrigen P-Gehalte der Böden ein anderer Faktor als die P-Versorgung primär verantwortlich für die fehlende Ertragswirkung der Düngemittel war. So konnten während des gesamten Untersuchungszeitraums keine P-Mangelsymptome wie eine violette Färbung der Blätter beobachtet werden. Dies traf insbesondere auch auf den parallel unter den gleichen Bedingungen an beiden Standorten durchgeführten Versuch an der P-Zeigerpflanze Mais zu. Eine Methode zur Erfassung des pflanzenverfügbaren Nährstoffgehaltes im Boden stellt die CAL-Methode, die den (lactat-)löslichen P-Anteil erfasst und in Deutschland von den Laboren der VDLUFA durchgeführt wird, dar. Anhand des P-Gehaltes des Bodens werden auf Basis von langjährigen Feldversuchen (WIESLER ET AL. 2018) Düngeempfehlungen ausgesprochen. Die anzustrebende Gehaltsklasse C (10–20 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 100 g<sup>-1</sup>) sieht eine P-Düngung in Höhe der P-Abfuhr durch die Ernteprodukte vor. Für Kleegras werden 21 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> dt<sup>-1</sup> (= 48,1 kg P dt<sup>-1</sup>) Entzüge als Zwischenfrucht veranlasst (LWK 2020). Zahlreiche Studien wiesen seit der letzten Festlegung der Gehaltsklassen 1997 daraufhin, dass eine Absenkung der aktuellen Richtwerte für die Gehaltsklasse C möglich ist (HEGE ET AL. 2008; KUCHENBUCH UND BUCZKO 2011; LORENZ 2004). Auf Grund dessen wurden die Richtwerte ab dem Jahr 2019 neu angepasst (vgl. Tab. 1), jedoch werden sie bisher noch nicht in allen Bundesländern u.a. NRW (LWK 2020) in der Praxis umgesetzt. Dementsprechend wurde im Rahmen des Versuches deutlich über den Pflanzenbedarf gedüngt.

Auch eine Metastudie von KOLBE 2019 konnte im Untersuchungszeitraum von 1993-2016 unter den Bedingungen des ökologischen Landbaus an 21 Standorten mit über 240 untersuchten Varianten zeigen, dass die P-Versorgung von ökologisch bewirtschafteten Flächen häufig unterschätzt wird. Demnach führen bereits Bodengehalte zwischen 5,7 und 10,3 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 100 g<sup>-1</sup> zu einer optimalen Nährstoffversorgung. Damit liegt insbesondere der Standort K (4,9 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 100 g<sup>-1</sup>) um einiges näher am Optimum als bisher angenommen. Der Standort W weist hingegen nicht einmal halb so hohe Gehalte mit 2,0 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 100 g<sup>-1</sup> auf. Bei Unterschreitung des optimalen Bereiches nimmt mit sinkender Konzentration an verfügbaren Nährstoffen in den Acker-

schlagen die Wahrscheinlichkeit von Ertragsschwankungen und Ernteauffällen im Ökolandbau zu, wodurch die Diskrepanz im Ertrag und in der Nährstoffaufnahme zwischen den beiden Standorten erklärt werden könnte.

Neben der Festlegung der idealen P-Gehalte in der Bodenlösung, spielt die Auswahl der Methode zur Ermittlung der P-Gehalte und des Nachlieferungspotentials eine entscheidende Rolle. In Gefäßversuchen mit Rotklee (*Trifolium pratense*; 17 verschiedene Böden; pH = 4,7-7,7; CAL-P = 0,5-13,2 mg 100g<sup>-1</sup>) konnten APPEL ET AL. 2021 zeigen, dass die CAL-Methode nicht geeignet ist, um das bodenbürtige P-Nachlieferungspotential vor allem nach dem ersten Aufwuchs zu bestimmen. Mildere Extraktionsverfahren wie die Elektro-Ultrafiltration- oder die Wasserextraktion nach FLOßMANN UND RICHTER scheinen hier passender, um die Mobilisierung des P aus der Rhizosphäre im Zuge der P-Aufnahme der Nutzpflanze zu simulieren. So war zwar der CAL-P-Gehalt am Standort W deutlich geringer als am Standort KF, jedoch war das Nachlieferungspotential für den Standort KF niedrig(er), während es für den Standort W mittel bis hoch ausfiel. Dementsprechend lässt sich die deutlich höhere P-Aufnahme am Standort W für den zweiten Schnitt im Vergleich zum ersten Schnitt erklären.

Es ist davon auszugehen, dass die ungewöhnlich hohen Niederschläge in den Monaten Juli und August ebenfalls einen Einfluss auf die gute Nährstoffaufnahme von N und P zum Zeitpunkt des zweiten Schnittes (W: 28.07. und KF: 20.08.2021) genommen haben. Eine günstige Wasserversorgung sorgt insbesondere bei immobilisierbaren Nährstoffen wie P für eine erhöhte Diffusion im Boden zur Verarmungszone der Rhizosphäre und wirkt sich damit positiv auf die P-Nachlieferung aus (LAMBERS ET AL. 2006). Ein Gefäßversuch mit Weißklee (*Trifolium repens* L.) und Welsches Weidelgras (*Lolium multiflorum*) konnte so zeigen, dass eine Abnahme der Bodenfeuchte zu einer Reduktion der P-Aufnahme und der Trockenmasseerträge führte (LOW UND PIPER 1960). Ein weiterer Faktor, der sich auf die Wirksamkeit von mineralischen P-Düngern auf den Ertrag auswirkt ist der Tongehalt des Bodens. Dieser sinkt mit steigendem Tongehalt, da tonhaltige Böden ein gutes Puffervermögen für P aufweisen, sodass der im Dünger enthaltene P der Pflanze nicht direkt für die Biomasseproduktion zur Verfügung steht. Ab einem Tongehalt von 25-35%, wie bei den beiden Versuchsstandorten, führt eine Düngung nur noch zu etwa 5% Mehrertrag im Vergleich zur ungedüngten Kontrolle (DAF 2019).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es bei der Betrachtung von einem einzelnen Versuchsjahr, wie es in dem vorliegenden Versuch geschehen ist, häufig zu sehr unterschiedlichen Ertragsreaktionen auf eine P-Düngung kommt (LESTER ET AL. 2008). Dies kann auf den P-Gehalt des Bodens, eine geringe Düngewirkung von nicht wasserlöslichen P-Düngern unmittelbar nach der Applikation, den pH-Wert, die Wasserversorgung, den Tongehalt oder die Verfügbarkeit von anderen Nährstoffen zurückgeführt werden und erklärt die eingeschränkte Ertragswirkung fast aller P-Recyclingdünger in diesem Versuch (DAF 2019; SYLVESTER-BRADLEY ET AL. 2019). Eine P-Aufnahmeeffizienz unter 5% deutet zudem daraufhin, dass fast der gesamte von der Pflanze aufgenommene P aus dem pflanzenverfügbaren P-Vorrat des Bodens

stammt (MERBACH ET AL. 2010). Dies erklärt auch, warum keine statistisch signifikante Ertragsminderung der Negativkontrolle beobachtet werden konnte (PANTEN UND LEINWEBER 2020).

### 6.3 Effekte der P-Recyclingdünger

Wie zuvor (vgl. 6.2) beschrieben ist anzunehmen, dass auf Grund der guten P-Versorgung der Pflanzen unabhängig von der Düngung nur eine geringe Ertragswirkung zu verzeichnen war. Ausschließlich die Struvitprodukte, insbesondere CG, erzielten eine signifikante Ertragssteigerung im Vergleich zur Negativkontrolle. Daher sollen im Folgenden die Effekte der einzelnen P-Recyclingdünger auf den Ertrag und die P-Aufnahme mit den Positivkontrollen (RP, TSP) verglichen und anschließend beurteilt werden. Die P-Aufnahmeeffizienzen der Rezyklate fielen so gering aus (0-5%), dass keine eindeutige Bewertung erfolgen kann. Durch niedrigere P-Gehalte in der Bodenlösung wären diese Unterschiede möglicherweise größer ausgefallen.

#### 6.3.1 Chemische Aufbereitung (Struvite)

Die pflanzenbauliche Wirkung von Struviten konnte bisher in zahlreichen Gefäß- und Freilandversuchen mit unterschiedlichen Kulturpflanzen nachgewiesen werden. Trotz der geringen Wasserlöslichkeit von dem im Struvit enthaltenen P von 1-5% (AHMED ET AL. 2018), wurden Düngewirkungen, die einer mineralischen Düngung entsprechen oder diese sogar übertreffen, gefunden (ANTONINI ET AL. 2011; CABEZA ET AL. 2011; HERTZBERGER ET AL. 2020; JOHNSTON UND RICHARDS 2003; MASSEY ET AL. 2009; RÖMER 2006). Auch in dem hier vorliegenden Versuch lieferten die Struvit-Produkte *Crystal Green (CG)* und *Berliner Pflanze (BP)* in Bezug auf die meisten Variablen die mit Abstand besten Ergebnisse, die eine Rohphosphatdüngung übertrafen und einer TSP-Düngung gleichwertig waren. In einigen Fällen konnte das getestete Struvit CG sogar die Düngewirkung von TSP übertreffen. So konnte ein signifikant höherer Ertrag für den ersten Schnitt und eine höherer kumulierte P-Aufnahme für CG im Vergleich zu TSP erzielt werden.

Zahlreiche Studien unterstützen die gefundenen Ergebnisse. So konnte eine Studie von JOHNSTON UND RICHARDS 2003, die in einem Gefäßversuch mit Weidelgras (*Lolium perenne*) und zwei unterschiedlichen Böden (sandiger Lehm; pH 6,6 und 7,1; P-Olsen 28 und 11 mg L<sup>-1</sup>) neun verschiedene Struvit-Präparate im Vergleich zu Monocalciumphosphat Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> (Hauptbestandteil von TSP) untersuchten, für Struvite Düngewirkungen wie für die wasserlösliche P-Verbindung Monocalciumphosphat nachweisen.

Die Ergebnisse des Vergleichs mit der in TSP enthaltenen P-Verbindung stimmen außerdem mit KRAUS ET AL. 2019B überein, welcher in einem zweijährigen Gefäßversuch (Lehm- und Sandböden aus 28 ökologisch bewirtschafteten Flächen; P-DL 2,1-53,4 mg 100 g<sup>-1</sup>) mit Ackerbohne (*Vicia faba*) und Sommerweizen (*Triticum aestivum*) die Düngewirkung von drei Struviten mit einer ungedüngten Kontrolle, TSP und drei Rohphosphaten verglich. Dabei konnten Struvite den pflanzenverfügbaren P-Gehalt im Boden erhöhen und überdurchschnittliche Er-

träge erzielen, die vergleichbar mit *TSP* und signifikant höher als die Kontrolle und Rohphosphat waren. Die gute Ertragswirkung der Struvite vor allem im zweiten Anbaujahr bei Sommerweizen deutet darauf hin, dass die Nährstoffe aus den Struviten langsamer verfügbar sind, als aus dem wasserlöslichen *TSP* (KRAUS ET AL. 2019B). Der in Struvit gebundene P liegt zu etwa 96% in zitratlöslicher Form als Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP) vor, sodass die Struvit-Auflösung durch Wurzelexsudate begünstigt wird. Die Exsudation von organischen Säuren ist kulturspezifisch, da sie in ihrer Zusammensetzung und Konzentration zwischen verschiedenen Spezies variiert (HERTZBERGER ET AL. 2020).

Durch die langsamere Freisetzung werden Auswaschungen bei starken Niederschlägen reduziert und durch die gezielte Auflösung zudem der Zeitpunkt und die Länge der Nährstofffreisetzung verbessert (HERTZBERGER ET AL. 2020). So konnte in einer Auswertung von 10 Studien (AHMED ET AL. 2016) eine geringere kumulative P- und N-Auswaschung aus Struviten im Vergleich zu herkömmlichen Düngemitteln wie Superphosphaten festgestellt werden.

Der vermutlich wichtigste Einflussfaktor auf die Freisetzung ist neben der Kulturart der pH-Wert des Bodens. Die Löslichkeit von Struviten ist bei sauren Böden am höchsten, da es über einem pH-Wert von 9 zur Fällung kommt. So konnten HERTZBERGER ET AL. 2020 in einer Auswertung von 30 Studien zeigen, dass ein pH-Wert unter 6 sogar zu höheren Erträgen und P-Aufnahmen von Struviten im Vergleich zu *TSP* führen kann. Die Freisetzungsgeschwindigkeit von P aus Struviten wird wie eine Studie von AHMED ET AL. 2018 zeigt unter anderem auch von der Granulatgröße und der Ausbringungsart gesteuert, sodass durch eine gröbere Granulierung und einer Applikation auf die Erdoberfläche die Freisetzungsrates weiter reduziert bzw. durch Pulverisierung und Einarbeitung erhöht werden kann. Zudem führt die Düngung mit Struviten nicht zu Verbrennungen der Pflanzenwurzeln, wodurch auch größere Düngegaben für eine komplette Fruchtfolge wie sie im Ökolandbau üblich sind, begünstigt werden. Auch die Belastung durch Schwermetalle ist für Struvite geringer als für andere kommerzielle Dünger wie *TSP* und Rohphosphat (HERTZBERGER ET AL. 2020).

Da kein Nährstoffausgleich zwischen den mit Struvit gedüngten und den restlichen Parzellen stattgefunden hat, könnte vor allem zu Beginn der Vegetationsperiode der in Struvit-Produkten enthaltene N ursächlich für die höheren P-Aufnahmen und Erträge verglichen mit *TSP* sein. Im Ökologischen Anbau ist die Pflanzenernährung mit N meist limitierter als im konventionellen Anbau (RÖMER 2013). Um eine N-Versorgung gewährleisten zu können, werden zur N-Fixierung Leguminosen angebaut. Durch die Ausbringung von Struviten, die N enthalten, wird jedoch die Fixierungsleistung von symbiotisch lebenden Leguminosen reduziert (DEMONET-KLEELUZPLUS 2021), sodass kein effizienter Ressourceneinsatz erfolgt. Insgesamt führen die gleichzeitige Freisetzung von N und P aus Struvit, die Auswirkung der Bodenbeschaffenheit (pH, Textur) auf die Freisetzung und die Folgen einer N-Düngung auf Fixierungsleistung dazu, dass es schwierig ist, die individuellen Auswirkungen der verschiedenen Faktoren zu bestimmen und den Reaktionen der Pflanzen auf Struvit zuzuordnen (HERTZBERGER ET AL. 2020).

Insgesamt weisen die Ergebnisse des zugrundeliegenden Versuches daraufhin, dass Struvite in Bezug auf ihre Düngewirkung *RP* überlegen und vergleichbar mit wasserlöslichen Mineraldüngern wie *TSP* sind, und diese zum Teil sogar übertreffen können. Zudem wird die Aussagekraft der Ergebnisse durch den aktuellen Stand der Wissenschaft untermauert.

### 6.3.2 Thermische Aufbereitung (Aschen und Karbonisate)

#### *Knochenkohle<sup>Plus</sup>*

Insgesamt wies Knochenkohle<sup>Plus</sup> (*KK<sup>Plus</sup>*) nur wenige signifikante Unterschiede zu anderen Düngemitteln oder den Kontrollen auf. So erzielte *KK<sup>Plus</sup>* im Vergleich zu *CG* signifikant geringere Werte in einigen Parametern im ersten Schnitt sowie in der kumulierten und Gesamt-P-Aufnahme. Hingegen konnten über die drei Zeiternten keine signifikanten Unterschiede zu *TSP*, *RP* oder der ungedüngten Kontrolle - weder in der P-Aufnahme, noch im Ertrag - gefunden werden.

Bisher wird der Tierknochenkohledünger ausschließlich in einigen Pilotanlagen hergestellt, so dass nur geringe Mengen produziert werden, die auch in ihrer Zusammensetzung stark variieren. Dementsprechend wurden bisher nur wenige Gefäß- und kaum Feldversuche durchgeführt. Die bislang vorliegenden Studien kommen zudem zu keinem eindeutigen Ergebnis. In einem Gefäßversuche von ZIMMER ET AL. (2019) mit einjährigem Welsches Weidelgras (*Lolium multiflorum*; sandiger Schluff; pH = 5,2; CAL-P = 2,4 mg 100g<sup>-1</sup>) wurde die Wirksamkeit von *KK<sup>Plus</sup>* im Vergleich zu *TSP* und einer Negativkontrolle ohne Düngung getestet. Es zeigte sich, dass die P-Aufnahme von mit *KK<sup>Plus</sup>* behandelten Pflanzen im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle signifikant höher war, nicht aber zu *TSP*. Hingegen waren die kumulativen Trockenmasseerträge von Knochenkohle<sup>Plus</sup> und *TSP* zwar tendenziell, aber nicht signifikant höher als bei der Negativkontrolle.

Entgegen der Versuche von ZIMMER ET AL. (2019) konnte ein von PANTEN UND LEINWEBER 2020) über fünf Jahre angelegter Feldversuch (lehmiger Schluff; pH = 5,1-5,2; CAL-P = 1,1-4,7 mg 100g<sup>-1</sup>) mit einer Fruchtfolge aus Wintergerste (*Hordeum vulgare*), Winterraps (*Brassica napus*), Winterweizen, Lupine (*Lupinus angustifolius*) und Winterroggen (*Secale cereale*), der die gleichen Dünger in Abhängigkeit der Ausgangs-P-Konzentration im Boden untersuchte, keine signifikante Steigerung der P-Aufnahme oder des Ertrages durch die Düngung mit *KK<sup>Plus</sup>* feststellen. In beiden Versuchen konnte *KK<sup>Plus</sup>* jedoch 90% der *TSP*-Wirkung (P-Aufnahme) erzielen. In dem hier vorliegenden Versuch wurde sogar ein Wirkungsgrad von 96-97% erreicht, sodass sich *TSP* und *KK<sup>Plus</sup>* statistisch nicht in ihrer P-Aufnahme unterscheiden. Hingegen lag die P-Aufnahmeeffizienz mit 1,3% deutlich unter den in bisherigen Versuchen erzielten Ergebnissen von 3,4% (PANTEN UND LEINWEBER 2020) oder sogar 10-15% (ZIMMER ET AL. 2019).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die signifikant höhere P-Aufnahme durch die *KK<sup>Plus</sup>*-Düngung der Gefäßversuche von ZIMMER ET AL. (2019) in den bisher durchgeführten Feldver-

suchen von PANTEN UND LEINWEBER (2019) sich in der hier vorliegenden Arbeit nicht replizieren ließ. Die oben aufgeführten Ergebnisse deuten darauf hin, dass es keine signifikante Wirkung von  $KK^{Plus}$  auf den Ertrag oder die P-Aufnahme gibt. Weitere Versuche v.a. unter Feldbedingungen sind daher notwendig, um diese These zu untermauern.

### *Pyreg*

Bisher wurden nur wenige Gefäß- und kaum Feldversuche mit Produkten aus dem *Pyreg*-Verfahren durchgeführt, die zudem widersprüchliche Ergebnisse lieferten. Als Ausgangsstoff für die Karbonisate dienten Klärschlämme, die unbehandelt oder mit verschiedenen Additiven versetzt bei Temperaturen von 500-700°C pyrolysiert wurden (APPEL UND FRIEDRICH 2017). Die Zugabe von Additiven soll die Bildung von dem schwerlöslichen und schlecht pflanzenverfügbaren P-Mineral Whitlockit verhindern, um die Pflanzenverfügbarkeit zu erhöhen und zudem die Schwermetallgehalte zu reduzieren (KERN ET AL. 2016; STECKENMESSER ET AL. 2016). Von allen Rezyklaten erzielte in dem hier vorliegenden Versuch das Pyrolyseprodukt *Pyreg* (*PY*) in Bezug auf die meisten Variablen die mit Abstand schlechtesten Ergebnisse. So wies die kumulierte P-Aufnahmeeffizienz über zwei (0,1%) bzw. drei Schnitte (0,5%) daraufhin, dass nahezu kein P aus dem Düngemittel von der Pflanze aufgenommen wurde. Auch in Bezug auf die P-Aufnahme und die Erträge wies *PY* meist die niedrigsten Werte auf.

In einem Gefäßversuch von APPEL ET AL. 2017 mit einer Fruchtfolge aus Mais und Weidelgras (lehmgiger Schluff; pH 4,9; CAL-P 0,2 mg 100 g<sup>-1</sup>) konnte gezeigt werden, dass die Temperatur während der Pyrolyse entscheidend für die Löslichkeit des Produktes ist. Bei einer Temperatur von 500-600 °C konnten die höchsten Erträge und eine Düngewirkung, die einem Drittel der *TSP*-Düngung entsprach, für beide Kulturen erzielt werden. Zudem konnte gezeigt werden, dass *PY* eine langsam wirkende P-Quelle ist, deren Nachlieferungspotential erst im zweiten Weidelgrasschnitt zutragen kam. Jedoch konnte eine *PY*-Düngung auch im zweiten Schnitt nicht das Niveau des hoch löslichen *TSPs* erreichen. Ein anderer Gefäßversuch von KERN ET AL. 2016 mit Mais und Welsches Weidelgras (pH 5,0; CAL-P 0,5 mg P 100 g<sup>-1</sup>) konnte zudem zeigen, dass eine Zugabe von Natriumsulfat ( $Na_2SO_4$ ) den Trockenmasseertrag und die P-Aufnahme signifikant erhöhen kann. Die in den Gefäßversuchen erzielten Ergebnisse konnten in Feldversuchen bisher nicht bestätigt werden. In drei Feldversuchen (APPEL UND FRIEDRICH 2017) unter ähnlichen Standortbedingungen (toniger Schluff pH 7,2-7,6; CAL-P 0,26-1,13 mg P 100 g<sup>-1</sup>) mit Sommer- und Winterweizen konnte unbeeinflusst von der Herstellungstemperatur, der Zugabe von Additiven oder den verwendeten Fällungsmitteln während der Abwasserreinigung keine Düngewirkung der Karbonisate erzielt werden. Auch ein von STECKENMESSER ET AL. 2016 durchgeführter Feldversuch mit einem einjährigen Kleeergrasgemenge (keine Angaben zu den Standortbedingungen), das mit Natriumsulfat versetzt und bei 550 °C hergestellt wurde, konnte keine Düngewirkung festgestellt werden. Zu beachten ist jedoch, dass bei allen Feldversuchen auch keine signifikanten Unterschiede in der P-Aufnahme oder dem Ertrag von *PY* im Vergleich zur Negativ- oder Positivkontrolle (*TSP*-Düngung) erzielt werden konnte.

Demnach ist davon auszugehen, dass die P-Versorgung der Böden unterschätzt wurde. Ein ähnliches Ergebnis lieferte auch der hier vorliegende Versuch. Signifikante Unterschiede zwischen *PY* und der Negativkontrolle oder *RP* konnten nicht gefunden werden. Lediglich *TSP* konnte im Vergleich zu *PY* eine signifikant höhere P-Aufnahme für den ersten Schnitt am Standort KF und für den zweiten Schnitt am Standort W erzielen.

Auf Grund der hohen P-Nachlieferung der Böden und/oder der ungenügenden Bestimmungsmethoden des tatsächlichen pflanzenverfügbaren P im Boden weist der zugrundeliegende Versuche ähnlich wie die wenigen bisher durchgeführten Feldversuche nur eine geringe Aussagekraft über die Wirksamkeit von *PY* auf. Da sich die einzelnen *PY*-Produkte auf Grund der unterschiedlichen Herstellungstemperaturen, den eingesetzten Additiven und den verwendeten Fällungsmitteln in ihren Eigenschaften unterscheiden, könnten diese Faktoren Bestandteil zukünftiger Forschungsarbeiten sein. Es sind weitere Versuche notwendig, um eine Düngewirkung auch unter Feldbedingungen nachzuweisen.

### *AshDec*

Die thermisch hergestellte Klärschlammasche *AshDec* (*AD*) wird mit Additiven (Natriumsulfat, Magnesium- oder Calciumchloride) versetzt, um die Calciumphosphatbildung zu stimulieren wodurch die Wasserlöslichkeit und damit die P-Verfügbarkeit für die Pflanze erhöht werden kann. In dem vorliegenden Versuch wies *AD* insgesamt nur wenige Unterschiede zu den Positiv- und Negativkontrollen auf. So konnte *AD* nur für den ersten Schnitt am Standort KF eine signifikant höhere P-Aufnahme als *RP* und die Negativkontrolle erzielen. Zu *TSP* ergaben sich jedoch keine signifikanten Unterschiede. Auch die geringe Aufnahmeeffizienz von 1,9% deutet daraufhin, dass kaum P aus dem Dünger aufgenommen wurde. Die wenigen bisher durchgeführten Versuche weisen ebenfalls darauf hin, dass die Düngewirkung von *AshDec* eingeschränkt und stark abhängig von den Standortbedingungen und der Kulturart ist.

Ein Freilandgefäßversuch von SEVERIN ET AL. 2014 (Sandiger Schluff; pH 3,8; P-CAL 1,14 mg P 100g<sup>-1</sup>) mit Mais (*Zea mays* L., cv. Bonfire) ergab, dass eine Düngung mit *AD* zu signifikant höheren Erträgen und pflanzlichen P-Aufnahmen führt, die im Mittel achtmal höher als bei der unbehandelten Asche (ohne Additive) und der Negativkontrolle waren. Damit unterschied sich *AshDec* in diesen Parametern nicht signifikant von *TSP*. Auch ein Gefäßversuch von RANIRO ET AL. 2022 (Sandiger Lehmboden; pH 5,2; P- nach Hedley 0,5 mg 100 g<sup>-1</sup>) mit Zuckerrohr (*Saccharum* spp.) unterstützt diese Ergebnisse.

Hingegen ergab ein über zwei Jahre durchgeführter Gefäßversuch von KRAUS ET AL. 2019B (Sand- und Lehmböden; pH = keine Angaben; P-DL 2,1-32 mg 100g<sup>-1</sup>) mit Ackerbohne (*Vicia faba*) und Weizen (*Triticum aestivum*), dass eine vergleichbare Düngewirkung wie *TSP* häufig nicht oder nur mittelfristig erzielt werden kann und abhängig von der Bodenart und der Kulturpflanze ist. Nicht näher ausgeführte Vegetationsversuche von WIESLER ET AL. 2020 wiesen



ebenfalls darauf hin, dass die hohe Variabilität der erzielten Ergebnisse nicht nur auf die heterogene chemische Zusammensetzung der Produkte (Herkunft und Inhaltsstoffe der Klärschlammaschen), sondern auch auf die Bodenbedingungen (pH, Textur, organische Substanz), die angebaute Pflanzenart und sogar die Sorte zurückzuführen war.

In einem Gefäßversuch von WOLLMANN ET AL. 2018 (sandiger Lehmboden, pH 7,2; CAL-P 2,2 mg 100 g<sup>-1</sup>) mit einer Fruchtfolge aus Rotklee (*Trifolium pratense* L.), Mais (*Zea mays* L.) und Weidelgras (*Lolium perenne* L.) konnte ein P-Mobilisierungseffekt von Rotklee für die nachfolgende Kultur gezeigt werden. Jedoch wies AD eine negative Düngewirkung auf, da zwar ähnliche Erträge wie bei der Negativkontrolle und der RP-Düngung erzielt werden konnten, es aber zu einer signifikanten Reduktion der P-Aufnahme im Vergleich zur Kontrolle kam. Ein besseres Ergebnis konnte in einem Gefäßversuch mit Weidelgras (*Lolium perenne* L.) auf zwei alkalischen Böden (schluffiger Lehm; pH 7,2-7,8; P = keine Angaben), die mit MgCl<sub>2</sub> behandeltem AD gedüngt wurden, erzielt werden. Die über vier Schnitte kumulierte P-Aufnahme des Weidelgrases wies 74-106% der Aufnahme aus TSP auf (RÖMER UND STEINGROBE 2018). Der hier vorliegende Versuch erzielte ein ähnliches Ergebnis und konnte in der kumulierten P-Aufnahme über zwei Schnitte 75,1% (beide Standorte) und über drei Schnitte 78,9% (nur W) der TSP-Aufnahme erreichen. Letztlich müssen noch weitere Versuche, insbesondere Feldversuche, erfolgen, um eine eindeutigere Aussage über die Wirksamkeit von AD treffen zu können.

## 6.4 Methodenkritik

Das in diesem Versuch verwendete Versuchsdesign und die Durchführung weisen einige Punkte auf, die als kritisch zu betrachten sind und die Belastbarkeit der Ergebnisse beeinträchtigen. Zum einen erfolgte nur eine einmalige, relativ hohe P-Gabe für die gesamte Fruchtfolge. Diese wurde praxisüblich mit dem NPMAX Tool ermittelt und beinhaltete neben den Entzügen durch die drei Kulturen einen Zuschlag für die niedrigen Versorgungsstufen (A bzw. B). Dabei ist zwar eine einmalige Düngung für Landwirte zeit- und kostensparender und schont zudem durch die reduzierte Bearbeitung den Boden. Versuchstechnisch ist jedoch ein Düngesteigerungsversuch mit P-Abstufung notwendig, um eine eindeutige Aussage über die P-Aufnahme treffen zu können. So weisen die geringen P-Aufnahmeeffizienzen daraufhin, dass kaum P (max. 5%) aus den Düngern aufgenommen wurde. Dafür verantwortlich ist zum einen die hohe P-Gabe, aber vor allem das hohe Nachlieferungspotential der Böden. Dabei spielt die verwendete Messmethode zur Bestimmung der P-Gehalte im Boden eine entscheidende Rolle. So konnte in einer Metastudie von BUCZKO 2019 gezeigt werden, dass die CAL-Methode nach Schüller nicht alle P-Fractionen erfasst, wodurch der pflanzenverfügbare Boden-P-Gehalt häufig unterschätzt wird. Da im vorliegenden Versuch die Negativkontrolle meist keinen signifikant geringeren Ertrag oder P-Aufnahme als die Positivkontrollen aufwies, ist davon auszugehen, dass die Pflanzenverfügbarkeit v.a. am Standort KF unterschätzt wurde. Dementsprechend stand den Pflanzen auch ohne Düngung ausreichend P zur Verfügung und eine Düngung hat

nur bedingt zu einem Mehrertrag geführt, sodass hier die Ressourceneffizienz in Frage gestellt werden kann.

Zudem ist nicht bekannt, ob sich die Düngung auf die Zusammensetzung des Gemenges ausgewirkt hat, da der Klee- und Grasanteils bei der Ernte nicht bestimmt wurde. Dabei hat die Zusammensetzung einen großen Einfluss auf den Ertrag, die fixierte N-Menge, die Silierfähigkeit und die Futterqualität (HAAS 2003).

## 7. Fazit und Ausblick

Diese Arbeit hatte zum Ziel neue P-Recyclingdünger aus Klärschlamm und Schlachtabfällen auf ihre Wirksamkeit zu untersuchen und mit gängigen Düngemitteln aus dem ökologischen und dem konventionellen Landbau zu vergleichen sowie ihr Potential für den Ökolandbau aufzuzeigen. Dafür wurden im Frühjahr 2021 an zwei ökologisch wirtschaftenden Betrieben in Warstein Feldversuche mit Klee gras im randomisierten Blockdesign angelegt.

Die in diesem Versuch erzielten Ergebnisse weisen darauf hin, dass die fünf untersuchten P-Recyclingdünger, unter den gegebenen Bedingungen, in ihrer Düngewirkung mit einer *RP*-Düngung vergleichbar waren und eine *TSP*-Düngung nur durch das Struvit *CG* übertroffen werden konnte. Aufgrund der einmaligen hohen P-Gabe zu Beginn der Fruchtfolge und der vermutlich zu gering eingeschätzten pflanzenverfügbaren P-Vorräte im Boden, fielen die Düngeeffekte insgesamt gering aus. So konnten keine signifikanten Unterschiede der Negativkontrolle zu *RP* und nur in einzelnen Parameter zu *TSP* gefunden werden. Hinsichtlich ihres Potentials für den Ökolandbau weisen die einzelnen P-Recyclingdünger jedoch Unterschiede auf.

Die vielversprechendsten Ergebnisse lieferten die Struvite, *CG* und *BP*, die in ihrer Düngewirkung vergleichbar mit einer mineralischen Düngung waren. Im Fall von *CG* konnte sogar die Wirkung von *TSP* im Hinblick auf die P-Aufnahme und den Ertrag übertroffen werden. Die aktuelle Studienlage kommt zu einem ähnlichen Schluss und zeigt zudem weitere Vorteile von Struviten auf. Auf Grund der geringen Wasser- und hohen Citratlöslichkeit des Produktes, ist P langsamer verfügbar als bei wasserlöslichen Mineraldüngern. Dabei kann die Freisetzung durch die Ausscheidung von Wurzelexudaten der Pflanze reguliert werden, wodurch sich das Auswaschungspotential für N und P reduziert. Die höchste Freisetzungsrates wird bei niedrigem pH (<6) erreicht und kann zudem durch die Granulierungsgröße des Produktes gesteuert werden. Auch die Belastung mit organischen Schadstoffen und Schwermetallen wird für dieses Produkt als gering eingeschätzt. Auf Grund dieser Eigenschaften und einer vergleichsweise nachhaltigen Produktion eignen sich Struvitprodukte, insbesondere *CG*, für den Einsatz im Ökolandbau. Dabei können die zugrundeliegenden Verfahren in bestehende Kläranlagen mit biologischer P-Elimination integriert werden. Allerdings trifft dies nur auf etwa 30% der Kläranlagen in Deutschland zu, sodass nur ein geringes Potential für die P-Rezyklierung besteht. Zudem erfüllen beide Verfahren auf Grund der niedrigen P-Rückgewinnungsrates nicht die Vorgaben der neuen Klärschlammverordnung, sodass trotz der guten Wirksamkeit des Produktes, die Etablierung für viele Kläranlagen unattraktiv ist.

*AD* übertraf in einigen Parametern die Düngewirkung der Negativkontrolle, jedoch konnten keine signifikanten Unterschiede zu *RP* und *TSP* festgestellt werden. Die Studienlage für die mit Additiven versetzte Klärschlammasche weist auf eine stark standort- und kulturspezifische Düngewirkung hin, die in weiteren Versuchen untersucht werden sollte. Bisher konnte nur in einigen Studien ein Mobilisierungseffekt von Rotklee für die nachfolgende Kultur gefunden werden, sodass hier ebenfalls Forschungsbedarf besteht. Offen bleibt zudem, welchen Einfluss verschiedene Additive auf die P-Aufnahme haben. Aufgrund des geringen Chemikalien-

und Energieverbrauches wird die Herstellung von *AD* als ökologisch vertretbar und vergleichbar mit konventionellen P-Düngemitteln eingestuft. Da die Pflanzenverfügbarkeit und die Schwermetallbelastung stark abhängig vom Ausgangsmaterial sind, besteht nur ein eingeschränktes Potential für den Ökolandbau.

Das Pyrolyseprodukt *PY* wies die mit Abstand schlechtesten Ergebnisse auf. Bei Betrachtung der absoluten Zahlen fiel zudem auf, dass eine *PY*-Düngung im Vergleich zu allen Kontrollen sogar zu einer Reduktion der Gesamt-P-Aufnahme und des Gesamtertrages führte und auf eine mögliche P-Festlegung hindeutet. Bisher wurden einige vielversprechende Gefäßversuche durchgeführt, die in Feldversuchen unbeeinflusst von der Herstellungstemperatur, der Zugabe von Additiven oder den verwendeten Fällungsmitteln während der Abwasserreinigung nicht bestätigt werden konnten. Der Einfluss dieser Faktoren auf die P-Verfügbarkeit ist daher noch nicht abschließend geklärt und könnte Bestandteil weiterer Forschung sein. Als ökologisch vorteilhaft zu bewerten ist, dass für die Herstellung dieses Produktes keine weiteren Chemikalien benötigt werden. Da das Verfahren autotherm abläuft, ist zudem mit Energieeinsparungen zu rechnen. Nachteilig und für eine Zulassung im Ökolandbau hinderlich ist jedoch, dass *PY* abhängig vom Ausgangsmaterial und der Temperatur unterschiedlich stark mit Schwermetallen, PAKs und organischen Schadstoffen belastet ist.

*KK<sup>Plus</sup>* wies keine Unterschiede zu den Positiv- und Negativkontrollen auf. Da sich das Produkt noch im Pilotstadium befindet, existieren bisher nur sehr wenige Studien, die zudem widersprüchliche Ergebnisse liefern und keine umfängliche Produktbewertung zulassen. Da sowohl *PY* als auch *KK<sup>Plus</sup>* das *PY*-Verfahren einsetzen, ist davon auszugehen, dass die Produkteigenschaften vergleichbar sind. Wie sich die anschließende Modifikation der Oberfläche durch den Schwefel auswirkt ist jedoch bisher nur wenig bekannt. Demnach bedarf es hier zunächst noch weiterer Forschung, um das Potential für den Ökolandbau besser abschätzen zu können.

Voraussetzung für die Etablierung der hier untersuchten P-Recyclingdünger im Ökolandbau ist eine entsprechende Zulassung im konventionellen Landbau. Im Juli 2022 werden alle in diesem Versuch verwendeten P-Rezyklate als P- oder Mehrnährstoffdünger in die EU-Düngemittelverordnung aufgenommen. Darüber hinaus stehen Vertreter von Öko-Verbänden dem Einsatz von P-Recyclingdüngern im ökologischen Landbau offen gegenüber, wenn die verwendeten Produkte sowohl eine niedrige Schadstoffbelastung als auch eine hohe Wirksamkeit aufweisen. Die gewünschten Eigenschaften weisen Struvitprodukte auf, sodass eine Zulassung im Ökolandbau in naher Zukunft möglich wäre. Aufgrund der neuen Klärschlammverordnung und den damit verbundenen P-Rückgewinnungsraten ist die Etablierung dieses Verfahrens für viele Kläranlagen jedoch nicht rentabel. Zwar erfüllen die übrigen in diesem Versuch verwendeten P-Recyclingdünger die Anforderungen der neuen Verordnung, da jedoch die Düngewirkung gering oder noch nicht ausreichend gesichert ist, besteht weiter Handlungs- und Forschungsbedarf, um nicht nur Produkte, die der Verordnung entsprechen, sondern auch eine hohe Wirksamkeit aufweisen, zu entwickeln und im Ökolandbau zu etablieren.

## Literaturverzeichnis

- ACUÑA, H.; INOSTROZA, L. (2013): Phosphorus efficiency of naturalized Chilean white clover in a grazed field trial. In: *Grass Forage Sci* 68 (1), S. 125–137. DOI: 10.1111/j.1365-2494.2012.00879.x.
- ACUÑA, H.; WILMAN, D. (1993): Some effects of added phosphorus on perennial ryegrass-white clover swards. In: *Grass and Forage Science* 48 (4), S. 416–420. DOI: 10.1111/j.1365-2494.1993.tb01876.x.
- ADAM, C. (2017): SUSAN-Sustainable and safe re-use of municipal sewage sludge for nutrient recovery. Final Activity Report. Hg. v. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM). CORDIS-COMMUNITY RESEARCH AND DEVELOPMENT INFORMATION SERVICE. Online [https://cordis.europa.eu/docs/results/16/16079/120694461-6\\_en.pdf](https://cordis.europa.eu/docs/results/16/16079/120694461-6_en.pdf), zuletzt geprüft am 28.06.2022.
- ADAM, C. (2018): Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm. In: Holm, O., Thomé-Kozmiensky, E., Quicker, P. und Kopp-Assenmacher, S. (Hg.): Verwertung von Klärschlamm. Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH.
- ADAM, C.; KRÜGER, O. (2013): Wertstoffpotential in deutschen Klärschlammaschen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hg.): Energie aus Abfall. 10 Bände. Neuruppin: TK-Verl., S. 997–1014.
- AHMED, N.; SHIM, S.; WON, S.; RA, C. (2018): Struvite recovered from various types of wastewaters: Characteristics, soil leaching behaviour, and plant growth. In: *Land Degrad Dev* 29 (9), S. 2864–2879. DOI: 10.1002/ldr.3010.
- AHMED, S.; KLASSEN, T. N.; KEYES, S.; DALY, M.; JONES, D. L.; MAVROGORDATO, M. ET AL. (2016): Imaging the interaction of roots and phosphate fertiliser granules using 4D X-ray tomography. In: *Plant and Soil* 401 (1-2), S. 125–134. DOI: 10.1007/s11104-015-2425-5.
- ALBERT, E.; BAUMGÄRTEL, G.; GRANSEE, A.; LORENZ, F. (2008): Gründüngung effizient gestalten. DLG-Merkblatt 349. 1. Aufl. Hg. v. DLG e.V. Frankfurt am Main.
- AMELUNG, W.; BLUME, H.-P.; FLEIGE, H.; HORN, R.; KANDELER, E.; KÖGEL-KNABNER, I. ET AL. (2018a): Chemische Eigenschaften und Prozesse. In: Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde: Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, S. 151–211. Online [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-55871-3\\_5](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-55871-3_5).
- AMELUNG, W.; BLUME, H.-P.; FLEIGE, H.; HORN, R.; KANDELER, E.; KÖGEL-KNABNER, I. ET AL. (2018b): Kapitel 9. Böden als Pflanzenstandorte. Phosphor. In: Amelung, W., Blume, H.-P., Fleige, H., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I. et al. (Hg.): Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde. Unter Mitarbeit von Thomas Gaiser, Jürgen Gauer, Nina Stoppe, Sören Thiele-Bruhn und Gerhard Welp. 17. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag GmbH, S. 491–581.
- AMI-AGRARMARKT INFORMATIONS-GESELLSCHAFT MBH (HG.) (2020): Bio Strukturdaten. Strukturdaten nach Bundesländern 2020. Online [https://www.ami-informiert.de/fileadmin/redaktion/bio\\_daten/strukturdaten/Strukturdaten\\_nach\\_Bundeslaendern\\_2020\\_PDF.pdf](https://www.ami-informiert.de/fileadmin/redaktion/bio_daten/strukturdaten/Strukturdaten_nach_Bundeslaendern_2020_PDF.pdf), zuletzt geprüft am 28.06.2022.
- ANDERS, A.; WEIGAND, H.; ÇAKIR, H.; OHNEMÜLLER, F. (2021): Recycling von Phosphor aus kommunalen Kläranlagen durch gekoppelte Bio-P-Rücklösung und Kristallisation/Pelletierung im Wirbelbettreaktor (Re-BioP-Cycle). Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben AiF-Nr. 19746 N. Hg. v. Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e.V. und Technische Hochschule Mittelhessen (THM). Köln (1). Online [https://fg-kalk-moertel.de/files/Forschungsbericht\\_01\\_2021\\_ReBioP-Cycle.pdf](https://fg-kalk-moertel.de/files/Forschungsbericht_01_2021_ReBioP-Cycle.pdf), zuletzt geprüft am 31.01.2022.
- ANTONINI, S.; PARIS, S.; EICHERT, T.; CLEMENS, J. (2011): Nitrogen and Phosphorus Recovery from Human Urine by Struvite Precipitation and Air Stripping in Vietnam. In: *Clean Soil Air Water* 39 (12), S. 1099–1104. DOI: 10.1002/clen.201100036.
- APPEL, T.; FRIEDRICH, K. (2017): Phosphor-Recycling mit Karbonisaten aus Klärschlamm. Abschlussbericht Projekt 03FH088PX2. Hg. v. Technische Informationsbibliothek (TIB) und Universitätsbibliothek Hannover. HERMANN-HOEPKE-INSTITUT. Bingen (Schriftenreihe des Hermann-Hoepke-Instituts, 1). Online <https://edocs.tib.eu/files/e01fb17/882226282.pdf>, zuletzt geprüft am 28.06.2022.

- APPEL, T.; SOHN, J.; URBATZKA, P.; KLEIN, H.-J.; SCHWITTEK, G.; BOECKER, H. (2021): Phosphor-Versorgungszustand von Böden unter langjähriger Bewirtschaftung nach den Richtlinien des Ökologischen Landbaus. Projektbericht. TECHNISCHE HOCHSCHULE BINGEN. Online [https://www.researchgate.net/profile/appel-thomas/publication/339128712\\_phosphor-versorgungszustand\\_von\\_boeden\\_unter\\_langjahriger\\_bewirtschaftung\\_nach\\_den\\_richtlinien\\_des\\_ökologischen\\_landbaus](https://www.researchgate.net/profile/appel-thomas/publication/339128712_phosphor-versorgungszustand_von_boeden_unter_langjahriger_bewirtschaftung_nach_den_richtlinien_des_ökologischen_landbaus), zuletzt geprüft am 28.06.2022.
- APPEL, T.; WALD, L.; KERN, D.; FRIEDRICH, K. (HG.) (2017): Phosphordüngewirkung von industriell hergestellten Karbonisaten aus dem Klärschlamm einer kommunalen Kläranlage. Vortrag Jahrestagung. Horizonte des Bodens. Göttingen, 02.-07.09.2017. Online <https://eprints.dbges.de/1275/1/P-Duengewirkung-von-Klaerschlammkarbonisaten.pdf>, zuletzt geprüft am 28.06.2022.
- ATKINSON, D. (1973): Some general effects of phosphorus deficiency on growth and development. In: *New Phytol* 72 (1), S. 101–111. DOI: 10.1111/j.1469-8137.1973.tb02014.x.
- BAAB, G. (2014): Pflanzenernährung: Haupt- und Spurenelemente Teil 2: Phosphor. In: *Öko-Obstbau* (2). Online <https://www.foeko.de/wp-content/uploads/2014/09/2-2014-Phosphor.pdf>, zuletzt geprüft am 28.06.2022.
- BAM-BUNDESANSTALT FÜR MATERIALFORSCHUNG UND -PRÜFUNG (2021a): Regionales Phosphor-Recycling (RePhoR). R-Rhenania - Modifiziertes Rhenania Phosphat aus Klärschlammasche für Bayern. Hg. v. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Online [https://www.fona.de/medien/pdf/Projektblaetter\\_RePhoR\\_2021.pdf](https://www.fona.de/medien/pdf/Projektblaetter_RePhoR_2021.pdf), zuletzt geprüft am 28.06.2022.
- BAM-BUNDESANSTALT FÜR MATERIALFORSCHUNG UND -PRÜFUNG (2021b): R-Rhenania -Projekt. Modifiziertes Rhenania Phosphat aus Klärschlammasche für Bayern. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Online <https://www.bam.de/Content/DE/Projekte/laufend/R-Rhenania/r-rhenania.html>, zuletzt geprüft am 08.12.2021.
- BARROW, N. J. (2017): The effects of pH on phosphate uptake from the soil. In: *Plant and Soil* 410 (1/2), S. 401–410. Online <http://www.jstor.org/stable/44245097>, zuletzt geprüft am 28.06.2022.
- BAYUELO-JIMÉNEZ, J. S.; OCHOA-CADAVID, I. (2014): Phosphorus acquisition and internal utilization efficiency among maize landraces from the central Mexican highlands. In: *Field Crops Research* 156, S. 123–134. DOI: 10.1016/j.fcr.2013.11.005.
- BERENDONK, C. (2013): Anbau von Ackergras und Klee gras im Frühjahr 2013. Hg. v. Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (LWK). Kleve. Online [https://www.landwirtschaftskammer.de/riswick/pdf/anbau\\_von\\_gras\\_und\\_kleegras\\_im\\_fruehjahr\\_2013.pdf](https://www.landwirtschaftskammer.de/riswick/pdf/anbau_von_gras_und_kleegras_im_fruehjahr_2013.pdf), zuletzt geprüft am 01.06.2022.
- BGR-BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (HG.) (2014): Rohstoffwirtschaftlicher Steckbrief für Phosphat. Online [https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min\\_rohstoffe/Downloads/rohstoffsteckbrief\\_phosphat2014.pdf](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohstoffsteckbrief_phosphat2014.pdf), zuletzt geprüft am 21.01.2022.
- BLE-BUNDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT UND ERNÄHRUNG (HG.) (2020): Strukturdaten zum ökologischen Landbau für das Jahr 2020. Ökologischer Landbau in Deutschland Verordnung (EG) Nr. 834/2007 i.V.m. Verordnung (EG) Nr. 889/2008 Aufschlüsselung der Gesamtzahl der Unternehmen nach Unternehmensformen Angabe der ökologisch bewirtschafteten Fläche (ha). Online <https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Landwirtschaft/Oekologischer-Landbau/ZahlenOekolandbau2020.pdf>, zuletzt geprüft am 22.06.2021.
- BMJV-BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung Anhang 2. BBodSchV, vom 1999. Fundstelle: BGBl, S. 1575–1579. Online [https://www.gesetze-im-internet.de/bbodsSchV/anhang\\_2.html](https://www.gesetze-im-internet.de/bbodsSchV/anhang_2.html), zuletzt geprüft am 16.11.2021.
- BOLAN, N. S.; HEDLEY, M. J. (1990): Dissolution of phosphate rocks in soils. 2. Effect of pH on the dissolution and plant availability of phosphate rock in soil with pH dependent charge. In: *Fertilizer Research* 24 (3), S. 125–134. DOI: 10.1007/BF01073580.
- BOLLAND, M. D. A.; GILKES, R. J. (1995): Long-term residual value of North Carolina and Queensland rock phosphates compared with triple superphosphate. In: *Fertilizer Research* 41 (2), S. 151–158. DOI: 10.1007/BF00750757.
- BUCZKO, U. (2019): Düngewirkung von Phosphat auf Basis einer Meta-studie über langjährige P-Düngungsversuche. In: Dachverband Agrarforschung (DAF) (Hg.): Phosphoreinsatz in der Agrar Spektrum - Landwirtschaft zwischen Knappheit und Überschuss. Frankfurt am Main (52).

- BURGSTALER, J.; WIEDOW, D.; LEINWEBER, P.: Verfahren zur Reinigung von Biogas, Rauchgas oder Flüssigkeiten, Adsorbens dafür, Filter, sowie Verwendung des Adsorptionsmittels. Veröffentlichungsnr: DE102011010525. Online <https://www.freepatentsonline.com/DE102011010525A1.html>, zuletzt geprüft am 16.12.2021.
- BWB-BERLINER WASSERBETRIEBE (HG.) (2013): Broschüre Verfahren zur MAP-Gewinnung. Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm zur Düngemittelproduktion. Online [https://www.bwb.de/de/assets/downloads/Produktblatt\\_MAP\\_web\\_2013.pdf](https://www.bwb.de/de/assets/downloads/Produktblatt_MAP_web_2013.pdf), zuletzt aktualisiert am 08.11.2021, zuletzt geprüft am 08.11.2021.
- BWB-BERLINER WASSERBETRIEBE (HG.) (2021): Berliner Pflanze- Der mineralische Langzeitdünger. Online [https://www.bwb.de/de/assets/downloads/BWB\\_Berliner%20Pflanze\\_ebook.pdf](https://www.bwb.de/de/assets/downloads/BWB_Berliner%20Pflanze_ebook.pdf), zuletzt aktualisiert am 08.11.2021, zuletzt geprüft am 08.11.2021.
- CABEZA, R.; STEINGROBE, B.; RÖMER, W.; CLAASSEN, N. (2011): Effectiveness of recycled P products as P fertilizers, as evaluated in pot experiments. In: *Fertilizer Research* 91 (2), S. 173–184. DOI: 10.1007/s10705-011-9454-0.
- COOPER, J.; REED, E. Y.; HÖRTENHUBER, S.; LINDENTHAL, T.; LØES, A.-K.; MÄDER, P. ET AL. (2018): Phosphorus availability on many organically managed farms in Europe. In: *Nutr Cycl Agroecosyst* 110 (2), S. 227–239. DOI: 10.1007/s10705-017-9894-2.
- DAF-DACHVERBAND AGRARFORSCHUNG (HG.) (2019): Phosphoreinsatz in der Agrar Spektrum - Landwirtschaft zwischen Knappheit und Überschuss. Frankfurt am Main (52). Online [https://www.dlg-verlag.de/files/3/142/agrarspektrum\\_52.pdf#page=68](https://www.dlg-verlag.de/files/3/142/agrarspektrum_52.pdf#page=68), zuletzt geprüft am 28.06.2022.
- DEMONET-KLEELUZPLUS (2021): Stickstofffixierungsleistung von Futterleguminosen. Hg. v. Freistaat Bayern, Körperschaft des öffentlichen Rechts. Online [https://www.demonet-kleeluz-plus.de/mam/cms15/dateien/kleeluzplus\\_stickstofffixierungsleistung\\_von\\_futterleguminosen.pdf](https://www.demonet-kleeluz-plus.de/mam/cms15/dateien/kleeluzplus_stickstofffixierungsleistung_von_futterleguminosen.pdf), zuletzt geprüft am 28.06.2022.
- DESTATIS-STATISTISCHES BUNDESAMT (2020): Betriebe mit ökologischem Landbau (Fachserie 3 Reihe 2.2.1). Online [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/06/PD21\\_N040\\_41.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/06/PD21_N040_41.html), zuletzt geprüft am 05.05.2022.
- DESTATIS-STATISTISCHES BUNDESAMT (2021a): Daten zu Düngemittelversorgung (Fachserie 4 Reihe 8.2). Online <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Industrie-Verarbeitendes-Gewerbe/Publikationen/Downloads-Fachstatistiken/duengemittelversorgung-jahr-2040820217004.pdf>, zuletzt geprüft am 28.06.2022.
- DESTATIS-STATISTISCHES BUNDESAMT (2021b): Deutlicher Zuwachs an Ökobetrieben und ökologisch bewirtschafteten Flächen im letzten Jahrzehnt (Pressemitteilung Nr. N040). Online [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/06/PD21\\_N040\\_41.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/06/PD21_N040_41.html), zuletzt geprüft am 05.05.2022.
- DESTATIS-STATISTISCHES BUNDESAMT (2022): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Wachstum und Ernte - Feldfrüchte - (Fachserie 3 Reihe 2.2.1), zuletzt geprüft am 28.06.2022.
- DEUTSCHER BUNDESTAG (2012): Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln. DüMV, vom 05.12.2012, Artikel 1 der Verordnung vom 02.10.2019 (BGBl. I S. 1414) geändert worden ist. Fundstelle: Bundesgesetzblatt (BGBl) 2012 (Teil I), S. 2482–2511. Online [https://www.gesetze-im-internet.de/d\\_mv\\_2012-/BJNR248200012.html](https://www.gesetze-im-internet.de/d_mv_2012-/BJNR248200012.html), zuletzt geprüft am 03.01.2022.
- DEUTSCHER BUNDESTAG (2017): Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen. DüV, vom 26.05.2017, die zuletzt durch Artikel 97 des Gesetzes vom 10.08.2021 (BGBl. I S. 3436) geändert worden ist. Fundstelle: Bundesgesetzblatt (BGBl) 2017 (Teil I), S. 1305–1347. Online [https://www.gesetze-im-internet.de/d\\_v\\_2017/BJNR130510017.html](https://www.gesetze-im-internet.de/d_v_2017/BJNR130510017.html), zuletzt geprüft am 03.01.2022.
- DEUTSCHER BUNDESTAG (2017): Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung. AbfKlärV, vom 27.09.2017. Fundstelle: Bundesgesetzblatt (BGBl) 2017 (Teil I Nr.65), S. 3465–3511. Online [https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/text.xav?SID=&tf=xaver.component.Text\\_0](https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/text.xav?SID=&tf=xaver.component.Text_0), zuletzt geprüft am 24.11.2021.

- DOBERMANN, A. (2007): Nutrient use efficiency – measurement and management. In: *Agronomy & Horticulture - Faculty Publications* (1442). Online <https://digitalcommons.unl.edu/agronomyfacpub/1442>, zuletzt geprüft am 28.06.2022.
- DPP-DEUTSCHE-PHOPHOR-PLATTFORM (2018): Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung nach der Kläranlage. Pearl-Verfahren. Frankfurt am Main (Phosphorrückgewinnung: wer, wie was? - Umsetzung einer zielgruppenorientierten Kommunikationsstrategie). Online [https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/wp-content/uploads/2018/06/Kennblatt\\_Ostara\\_Pearl.pdf](https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/wp-content/uploads/2018/06/Kennblatt_Ostara_Pearl.pdf), zuletzt geprüft am 13.12.2021.
- DPP-DEUTSCHE-PHOPHOR-PLATTFORM (2019a): Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung nach der Kläranlage. AirPrex (Phosphorrückgewinnung: wer, wie was? - Umsetzung einer zielgruppenorientierten Kommunikationsstrategie). Online [https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/wp-content/uploads/2018/06/Kennblatt\\_AirPrex.pdf](https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/wp-content/uploads/2018/06/Kennblatt_AirPrex.pdf), zuletzt geprüft am 10.12.2021.
- DPP-DEUTSCHE-PHOPHOR-PLATTFORM (2019b): Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung nach der Kläranlage. Ash dec (Phosphorrückgewinnung: wer, wie was? - Umsetzung einer zielgruppenorientierten Kommunikationsstrategie). Online [https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/wp-content/uploads/2018/06/DPP\\_Datenblatt\\_AshDec\\_0419.pdf](https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/wp-content/uploads/2018/06/DPP_Datenblatt_AshDec_0419.pdf), zuletzt geprüft am 08.12.2021.
- DUNLOP, J.; BOWLING, D. J. F. (1978): Uptake of Phosphate by White Clover. The effect of pH on the electrogenic phosphate pump. In: *J Exp Bot* 29 (5), S. 1147–1153. DOI: 10.1093/jxb/29.5.1147.
- DWD-DEUTSCHER WETTERDIENST (2021a): Niederschlag: vieljährige Mittelwerte 1961 - 1990. Warstein. Online [https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/mittelwerte/nieder\\_6190\\_akt.html.html?view=naPublication&nn=16102?view=naPublication&nn=16102](https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/mittelwerte/nieder_6190_akt.html.html?view=naPublication&nn=16102?view=naPublication&nn=16102), zuletzt geprüft am 02.01.2022.
- DWD-DEUTSCHER WETTERDIENST (2021b): Temperatur: vieljährige Mittelwerte 1961 - 1990. Eslohe. Online [https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/mittelwerte-/temp\\_6190\\_akt.html.html?view=naPublication&nn=16102](https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/mittelwerte-/temp_6190_akt.html.html?view=naPublication&nn=16102), zuletzt geprüft am 02.01.2022.
- EDMEADES, D. C.; WATKINSON, J. H.; PERROTT, K. W.; SINCLAIR, A. G.; LEDCARD, S. F.; RAJAN, S. ET AL. (1991): Comparing the agronomic performance of soluble and slow release phosphate fertilisers: the experimental basis for RPR recommendations. In: *ProNZG*, S. 181–190. DOI: 10.33584/jnzc.1991.53.1998.
- EFMA-EUROPEAN FERTILIZER MANUFACTURES ASSOCIATION (2000): Phosphorus essential element for food production. In: *Phosphorus booklet* (8/12), S. 1–38. Online [https://sswm.info/sites/default/files/reference\\_attachments/EFMA%202000%20Phosphorus%20Essential%20for%20Food%20Production.pdf](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/EFMA%202000%20Phosphorus%20Essential%20for%20Food%20Production.pdf), zuletzt geprüft am 13.04.2022.
- ERNST BASLER + PARTNER AG (2017): Beurteilung von Technologien zur Phosphor-Rückgewinnung. Gesamtheitliche Beurteilung der Nachhaltigkeit und Realisierbarkeit von P-Rückgewinnungstechnologien im Schweizer Kontext, S. 1–33. Online <https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/document/bafu-bericht/>, zuletzt geprüft am 28.06.2022.
- EU-EUROPÄISCHE KOMMISSION: Widerstandsfähigkeit der EU bei kritischen Rohstoffen: Einen Pfad hin zu größerer Sicherheit und Nachhaltigkeit abstecken. COM(2020) 474 final, S. 1–27. Online <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0474&from=EN>, zuletzt geprüft am 28.06.2022.
- EU-EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT: EG-Öko-Verordnung. EG Nr. 848/ 2018, vom Nr. 848/ 2018 848.
- EUR-LEX (2021a): Delegierte Verordnung der Kommission. Dokument Ares - 44211. Online [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=PI\\_COM%3AAres%282021%2944211#](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=PI_COM%3AAres%282021%2944211#), zuletzt geprüft am 15.06.2022.
- EUR-LEX (2021b): Delegierte Verordnung der Kommission. Dokument C - 4743. Online [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=PI\\_COM%3AC%282021%294743](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=PI_COM%3AC%282021%294743), zuletzt geprüft am 15.06.2021.
- EUR-LEX (2021c): Delegierte Verordnung der Kommission. Dokument C - 4751. Online [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=PI\\_COM%3AC%282021%294751](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=PI_COM%3AC%282021%294751), zuletzt geprüft am 15.06.2022.



- EUR-LEX (2021d): Durchführungsverordnung (EU) 2021/1165 der Kommission vom 15.07.2021. Online <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32021R1165>, zuletzt geprüft am 15.06.2022.
- EWERT, W.; WAGENBACH, A. (2014): AirPrex: MAP-Kristallisation in Verbindung mit Bio-P-Fällung. Abwasser - Phosphor - Dünger. Pollution Control Service (P.C.S.). Berlin, 28.01.2014. Online [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/dokumente/ewertwagenbach\\_pcs.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/dokumente/ewertwagenbach_pcs.pdf), zuletzt geprüft am 10.12.2021.
- FILIPPELLI, G. M. (2017): The global phosphorus cycle. In: Lal, R.; Stewart, B. A. (Hg.): Soil phosphorus. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group (Advances in soil science), S. 1–21.
- FLOßMANN, R.; RICHTER, D. (1982): Extraktionsmethode zur Charakterisierung der Kinetik der Freisetzung von P aus der festen Phase des Bodens in die Bodenlösung. In: *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* 26, S. 703-709. Online <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordid=us201302152668>, zuletzt geprüft am 28.06.2022.
- FÖHSE, D.; CLAASSEN, N.; JUNGK, A. (1988): Phosphorus efficiency of plants. In: *Plant and Soil* 110 (1), S. 101–109. DOI: 10.1007/BF02143545.
- FROSSARD, E.; BÜNEMANN, E. K.; GUNST, L.; OBERSON, A.; SCHÄRER, M.; TAMBURINI, F. (2016): Fate of Fertilizer P in Soils—The Organic Pathway. In: Schnug, E.; Kok, L. J. de (Hg.): Phosphorus in Agriculture: 100 % Zero. Dordrecht: Springer Netherlands, S. 41–61.
- GÜNTHER, S.; GRUNERT, M.; MÜLLER, S. (2018): Overview of recent advances in phosphorus recovery for fertilizer production. In: *Engineering in Life Sciences* 18 (7), S. 434–439. DOI: 10.1002/elsc.201700171.
- HAAS, G. (2003): Rotklee gras: Arten- und Sortenwahl der Gräser. In: *Dokumentation 10 Jahre Leitbetriebe Ökologischer Landbau in Nordrhein-Westfalen*. Online <https://orgprints.org/id/eprint/2323/>.
- HAMMOND, J. P.; BROADLEY, M. R.; WHITE, P. J.; KING, G. J.; BOWEN, H. C.; HAYDEN, R. ET AL. (2009): Shoot yield drives phosphorus use efficiency in Brassica oleracea and correlates with root architecture traits. In: *Journal of experimental botany* 60 (7), S. 1953–1968. DOI: 10.1093/jxb/erp083.
- HAUBOLD-ROSAR, M.; HEINKELE, T.; RADEMACHER, A. (2016): Chancen und Risiken des Einsatzes von Biokohle und anderer „veränderter“ Biomasse als Bodenhilfsstoffe oder für die C-Sequestrierung in Böden. Abschlussbericht. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Dessau-Roßlau (Umweltforschungsplan, 01/2016). Online [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte\\_04\\_2016\\_chancen\\_und\\_risiken\\_des\\_einsatzes\\_von\\_biokohle.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_04_2016_chancen_und_risiken_des_einsatzes_von_biokohle.pdf), zuletzt geprüft am 13.12.2021.
- HAYNES, R. J.; LUDECKE, T. E. (1981): Yield, root morphology and chemical composition of two pasture legumes as affected by lime and phosphorus applications to an acid soil. In: *Plant and Soil* 62 (2), S. 241–254. DOI: 10.1007/BF02374088.
- HEGE, U.; WENDLAND, M.; OFFENBERGER, K. (2008): Zur Bedeutung der Bodenversorgung mit Phosphat und Kali: Wie hoch müssen die Nährstoffgehalte im Boden sein? In: *Pflanzenbauwissenschaften* 12, S. 53–63.
- HEINZMANN, B.; LENGEMANN, A. (2021): Die Berliner Pflanze - MAP - Kristallisationsverfahren der Berliner. Phosphorrückgewinnung - Aktueller Stand zu Verordnung, Technologien, deren. Informationsveranstaltung BMU & UBA, 10.12.2021. Online <https://studylibde.com/doc/11037741/die-berliner-pflanze---map---kristallisationsverfahren-de...>, zuletzt geprüft am 10.12.2021.
- HERMANN, L.; SCHAAF, T. (2019): Outotec (AshDec®) Process for P Fertilizers from Sludge Ash. In: Ohtake, H.; Tsuneda, S. (Hg.): Phosphorus Recovery and Recycling. Singapore: Springer Singapore, S. 221–233.
- HERTZBERGER, A. J.; CUSICK, R. D.; MARGENOT, A. J. (2020): A review and meta-analysis of the agricultural potential of struvite as a phosphorus fertilizer. In: *Soil Sci. Soc. Am. j.* 84 (3), S. 653–671. DOI: 10.1002/saj2.20065.
- HOCKING, P. J.; RANDALL, P. J. (2001): Better growth and phosphorus nutrition of sorghum and wheat following organic acid secreting crops. In: Horst, W. J. (Hg.): Plant Nutrition. Dordrecht: Springer Netherlands, S. 548–549.

- HOLM, O.; THOMÉ-KOZMIENSKY, E.; QUICKER, P.; KOPP-ASSENMACHER, S. (HG.) (2018): Verwertung von Klärschlamm. Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH. Online <https://www.vivis.de/2018/11/verwertung-von-klaerschlamm/348/>, zuletzt geprüft am 13.12.2021.
- HOPPENHAUS, K. (2021): Phosphormangel im Ökolandbau - können Recycling-Dünger eine Lösung sein? Online <https://www.riffreporter.de/de/umwelt/phosphor-recycling-duenger-oekolandbau-struvit>, zuletzt geprüft am 15.06.2022.
- HÖRTENHUBER, S.; WEIßHAIDINGER, R.; FRIEDEL, J.; LINDENTHAL, T.; ZOLLITISCH, W. (HG.) (2013): Phosphorversorgung und P-Kreisläufe auf österreichischen Bio-Grünlandbetrieben. 18. Alpenländische Expertenforum zum Thema Phosphor im Grünlandbetrieb - Bedeutung und aktuelle Problembereiche. Raumberg-Gumpenstein, 10. Oktober 2013. LFZ-LEHR- UND FORSCHUNGSZENTRUM FÜR LANDWIRTSCHAFT. Irdning.
- HUGUENIN-ELIE; O; NYFELER; D; SUTER; M ET AL. (2009): Positive Mischungseffekte auf Ertrag und Stickstoffversorgung in Klee-Gras-Mischungen. In: Mayer, J., Alföldi, T., Leiber, F., Dubois, D., Fried, P., Heckendorn, F. et al. (Hg.): Werte - Wege - Wirkungen: Biolandbau im Spannungsfeld zwischen Ernährungssicherung, Markt und Klimawandel. Beiträge zur 10. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, BAND 1: BODEN, PFLANZENBAU, AGRARTECHNIK, UMWELT- UND NATURSCHUTZ, BIOLANDBAU INTERNATIONAL, WISSENSMANAGEMENT. 10. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, 11.-13. Februar 2009. Berlin: Dr. Köster, S. 159–162. Online [https://orgprints.org/14416/1/HugueninElie\\_14416.pdf](https://orgprints.org/14416/1/HugueninElie_14416.pdf), zuletzt geprüft am 10.11.2021.
- IFOAM-INTERNATIONAL FEDERATION OF ORGANIC AGRICULTURE MOVEMENTS (2000): Prinzipien des Ökolandbaus Präambel. Hg. v. International federation of organic agriculture movements (IFOAM). Online [https://www.agrarbuendnis.de/fileadmin/Daten-KAB/AB-Veranstaltungen/Fairness\\_und\\_Ethik/POA\\_folder\\_german.pdf](https://www.agrarbuendnis.de/fileadmin/Daten-KAB/AB-Veranstaltungen/Fairness_und_Ethik/POA_folder_german.pdf), zuletzt geprüft am 03.05.2022.
- JACOB, I.; WEIß, J.; HEILMEIER, L. (2022): Viehloser Ökoackerbau: Mit Klee gras Nährstoffe optimal managen. In: *BIOTOPP* (01). Online [https://www.demonet-kleeluzplus.de/mam/cms15/dateien/2022-1\\_biotopp\\_kleegrasverwertung.pdf](https://www.demonet-kleeluzplus.de/mam/cms15/dateien/2022-1_biotopp_kleegrasverwertung.pdf), zuletzt geprüft am 28.06.2022.
- JOHNSTON, A. E.; RICHARDS, I. R. (2003): Effectiveness of different precipitated phosphates as phosphorus sources for plants. In: *Soil Use and Management* 19 (1), S. 45–49. DOI: 10.1111/j.1475-2743.2003.tb00278.x.
- KABBE, C. (2017): German sludge and P-recovery ordinance moves forward. In: *European Sustainable Phosphorus Platform (ESPP) eNews* (7), S. 2.
- KANDELER, E. (2018): 4.1 Bodenorganismen. Symbiosen zwischen Mikroorganismen und Pflanzen. In: Amelung, W., Blume, H.-P., Fleige, H., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I. et al. (Hg.): Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde. Unter Mitarbeit von Thomas Gaiser, Jürgen Gauer, Nina Stoppe, Sören Thiele-Bruhn und Gerhard Welp. 17. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag GmbH, S. 124–126.
- KASNO, A.; SUTRIADI, M. T. (2012): Indonesian rock-phosphate effectivity for maize crop on ultisols soils. In: *AGRIVITA, Journal of Agricultural Science* 34 (1), S. 14–21. Online <https://agrivita.ub.ac.id/index.php/agrivita/article/view/134/589>, zuletzt geprüft am 28.06.2022.
- KERN, D.; FRIEDRICH, K.; APPEL, T. (2016): Phosphor-Düngewirkung und Schwermetallverfügbarkeit von karbonisiertem Klärschlamm in Abhängigkeit von der Dauer der Karbonisierung und der Zugabe von Natriumsulfat. In: Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA) (Hg.): VDLUFA-Schriftenreihe. 128. VDLUFA Kongress Rostock (Kongressband, 73.), S. 355–361. Online [https://www.researchgate.net/profile/daniel-kern-7/publication/316515899\\_phosphor-dungewirkung\\_und\\_schwermetallverfugbarkeit\\_von\\_karbonisiertem\\_klaerschlamm\\_in\\_abhangigkeit\\_von\\_der\\_dauer\\_der\\_karbonisierung\\_und\\_der\\_zugabe\\_von\\_natriumsulfat](https://www.researchgate.net/profile/daniel-kern-7/publication/316515899_phosphor-dungewirkung_und_schwermetallverfugbarkeit_von_karbonisiertem_klaerschlamm_in_abhangigkeit_von_der_dauer_der_karbonisierung_und_der_zugabe_von_natriumsulfat), zuletzt geprüft am 28.06.2022.
- KILLICHES, F. (2013): Phosphat: Mineralischer Rohstoff und unverzichtbarer Nährstoff für die Ernährungssicherheit weltweit. Unter Mitarbeit von Gebauer, H.-P., Franken, D., Röhling, S., Schulz, P. und Müller, H. W. Hg. v. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (GBR). Hannover. Online [https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Zusammenarbeit/TechnZusammenarbeit/Politikberatung\\_SV\\_MER/Downloads/phosphat.pdf](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Zusammenarbeit/TechnZusammenarbeit/Politikberatung_SV_MER/Downloads/phosphat.pdf), zuletzt geprüft am 21.01.2022.
- KOLBE, H. (2008): Fruchtfolgegrundsätze im ökologischen Landbau. Online [https://orgprints.org/15100-1/fruchtfolge\\_internet.pdf](https://orgprints.org/15100-1/fruchtfolge_internet.pdf), zuletzt geprüft am 06.05.2022.

- KOLBE, H. (2010): Phosphor und Kalium im ökologischen Landbau – aktuelle Probleme, Herausforderungen, Düngungsstrategien. In: Bundesarbeitskreis Düngung (BAD) (Hg.): Phosphor- und Kaliumdüngung – brauchen wir neue Düngekonzepte? Frankfurt/Main: Bundesarbeitskreis Düngung (BAD) (Tagung des Verbandes der Landwirtschaftskammern (VLK) und des Bundesarbeitskreises Düngung (BAD), 10), S. 117–137. Online <https://orgprints.org/id/eprint/19354/>, zuletzt geprüft am 28.06.2022.
- KOLBE, H. (2016): Nährstoff- und Humusversorgung im Ökolandbau. Über die unterschiedlichen Entwicklungstendenzen bei der Bodenfruchtbarkeit. In: AgrarBündnis eV (Hg.): Der kritische Agrarbericht, S. 168–174.
- KOLBE, H. (2019): Einfluss mineralischer P- und K-Düngung auf die Ertragsreaktion der Fruchtarten in Abhängigkeit von der Nährstoffversorgung des Bodens unter den Anbaubedingungen des ökologischen Landbaus in Deutschland. In: *Journal für Kulturpflanzen* Bd. 71 (6), S. 161–181. DOI: 10.5073/JfK.2019.06.02.
- KRÄMER, J. (2019): Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung nach der Kläranlage. PYREG-Verfahren. DBU-Abschlussbericht. Hg. v. Deutsche-Phosphor-Plattform (DPP) e.V. Frankfurt am Main (Phosphorrückgewinnung: wer, wie was? - Umsetzung einer zielgruppenorientierten Kommunikationsstrategie), zuletzt geprüft am 16.12.2021.
- KRATZ, S.; SCHICK, J.; ØGAARD, A. F. (2016): P Solubility of Inorganic and Organic P Sources. In: Schnug, E.; Kok, L. J. de (Hg.): Phosphorus in Agriculture: 100 % Zero. Dordrecht: Springer Netherlands.
- KRATZ, S.; SCHICK, J.; SHWIEKH, R.; SCHNUG, E. (2014): Abschätzung des Potentials erneuerbarer P-haltiger Rohstoffe in Deutschland zur Substitution rohphosphathaltiger Düngemittel. In: *Journal für Kulturpflanzen* 66 (8), S. 261–275.
- KRAUS, F.; REMY, C.; KRABBE, C. (2016): Phosphorrecycling: Aktueller Stand und Perspektiven. Berliner Wasserwerkstatt. Phosphor-Recycling - Nexus zwischen Wasser- und Landwirtschaft. Kompetenzzentrum Wasser Berlin (KWB). Berlin, 28.09.2016. Online [https://www.siwawi.ruhr-uni-bochum.de/mam/content/kraus\\_-\\_phosphorrecycling\\_-\\_aktueller\\_stand\\_und\\_perspektiven.pdf](https://www.siwawi.ruhr-uni-bochum.de/mam/content/kraus_-_phosphorrecycling_-_aktueller_stand_und_perspektiven.pdf), zuletzt geprüft am 13.12.2021.
- KRAUS, F.; ZAMZOW, M.; HOFFMANN, C.; BESSAI, A.-K.; FISCHINGER, S. ET AL. (2019a): Abschlussbericht - Einsatzmöglichkeiten für Nährstoffzyklate im Ökolandbau (nurec4org). Hg. v. Kompetenzzentrum Wasser Berlin, Bioland Beratung, Institut für Agrar- und Stadökologische Projekte, P-REX Environment.
- KRAUS, F.; ZAMZOW, M.; HOFFMANN, C.; BESSAI, A.-K.; FISCHINGER, S.; MUSKOLUS, A.; KABBE, C. (2019b): Einsatzmöglichkeiten für Nährstoffzyklate im Ökolandbau - Abschlussbericht des Projektes nurec4org. KOMPETENZENTRUM WASSER BERLIN GMBH. Online <https://publications.kompetenzwasser.de/pdf/Kraus-2019-1109.pdf>, zuletzt geprüft am 07.06.2022.
- KRETZSCHMAR, R. (2018): Kapitel 5. Chemische Eigenschaften und Prozesse. In: Amelung, W., Blume, H.-P., Fleige, H., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I. et al. (Hg.): Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde. Unter Mitarbeit von Thomas Gaiser, Jürgen Gauer, Nina Stoppe, Sören Thiele-Bruhn und Gerhard Welp. 17. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag GmbH, S. 151–211.
- KROLL-FIEDLER, C. (2021): Der Hof - Biolandhof Kroll-Fiedler. Hg. v. Biolandhof Kroll-Fiedler. Warstein-Belecke. Online <https://biolandhof-kroll-fiedler.de/der-hof/>, zuletzt aktualisiert am 28.09.2021, zuletzt geprüft am 09.11.2021.
- KROLL-FIEDLER, S.; GLOWACKI, S.; LEISEN, E. (2018): Ökolandbau NRW: Überdurchschnittlich wirtschaftlich - trotz zersplitterter Weideflächen. Hg. v. Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MULNV NRW) und Öko-Team der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (LWK). Münster. Online <https://www.oekolandbau.nrw.de/fachinfo/tierhaltung/rinder/2018/ueberdurchschnittlich-wirtschaftlich-trotz-zersplitterter-weideflaechen>, zuletzt aktualisiert am 09.11.2021, zuletzt geprüft am 09.11.2021.
- KUCHENBUCH, R. O.; BUCZKO, U. (2011): Re-visiting potassium- and phosphate-fertilizer responses in field experiments and soil-test interpretations by means of data mining. In: *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 174 (2), S. 171–185. DOI: 10.1002/jpln.200900162.
- LAL, R.; STEWART, B. A. (HG.) (2017): Soil phosphorus. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group (Advances in soil science).

- LAMBERS, H. (2022): Phosphorus Acquisition and Utilization in Plants. In: *Annual review of plant biology* 73, S. 17–42. DOI: 10.1146/annurev-arplant-102720-125738.
- LAMBERS, H.; SHANE, M. W.; CRAMER, M. D.; PEARSE, S. J.; VENEKLAAS, E. J. (2006): Root structure and functioning for efficient acquisition of phosphorus: Matching morphological and physiological traits. In: *Annals of botany* 98 (4), S. 693–713. DOI: 10.1093/aob/mcl114.
- LEITHOLD, G. (2003): Ökologischer Landbau-umweltgerechte Lebensmittelproduktion und Ernährungssicherung. Universitätsbibliothek Gießen. Online <https://core.ac.uk/download/pdf/56347216.pdf>, zuletzt geprüft am 04.05.2022.
- LESTER, D. W.; BIRCH, C. J.; DOWLING, C. W. (2008): Fertiliser N and P applications on two Vertosols in north-eastern Australia. 1. Comparative grain yield responses for two different cultivation ages. In: *Aust. J. Agric. Res.* 59 (3), S. 247. DOI: 10.1071/AR07169.
- LFL-BAYRISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (HG.) (2016): Feldfutterbau - Klee, Klee gras, Luzerne, Luzernegräser, Gräser. Integrierter Pflanzenbau. INSTITUT FÜR PFLANZENBAU UND PFLANZENZÜCHTUNG. Online [https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/schriftenreihe/lfl-information\\_feldfutterbau.pdf](https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/schriftenreihe/lfl-information_feldfutterbau.pdf), zuletzt geprüft am 01.06.2022.
- LFULG-SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE ABTEILUNG PFLANZLICHE ERZEUGUNG (HG.) (2008): Fruchtfolgegrundsätze im ökologischen Landbau. SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE. Online [https://org-prints.org/15100/1/fruchtfolge\\_internet.pdf](https://org-prints.org/15100/1/fruchtfolge_internet.pdf), zuletzt geprüft am 28.06.2022.
- LØES, A.-K.; ØGAARD, A. F. (2001): Long-term changes in extractable soil phosphorus (P) in organic dairy farming systems. In: *Plant and Soil* 237 (2), S. 321–332. DOI: 10.1023/A:1013328228904.
- LORENZ, F. (2004): Wenn P und K fehlen: So ändern sich Ertrag, Düngebedarf, Nährstoffausnutzung und Bodenvorräte. In: *VDLUFA-Schriftenreihe* 60, S. 705–712.
- LOW, A. J.; PIPER, F. J. (1960): The influence of water supply on the growth and phosphorus uptake of italian ryegrass and white clover in pot culture. In: *Plant and Soil* 13 (3), S. 242–252. DOI: 10.1007/BF01677505.
- LUFU-LANDWIRTSCHAFTLICHER UNTERSUCHUNGS- UND FORSCHUNGSANSTALT (HG.) (2019): Vorsorge-, Prüf- und Maßnahmenwerte für Boden gemäß Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV). LWK-LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN. Online <https://www.landwirtschaftskammer.de/lufa/download/fachinfo/bodengarten/richtwerte-bbodschv.pdf>, zuletzt aktualisiert am 16.11.2021, zuletzt geprüft am 16.11.2021.
- LUKIWATI, D. R. (2002): Effect of rock phosphate and superphosphate fertilizer on the productivity of maize var. Bisma. In: Adu-Gyamfi, J. J. (Hg.): *Food Security in Nutrient-Stressed Environments: Exploiting Plants' Genetic Capabilities*. Dordrecht: Springer (Springer eBook Collection, 95), S. 183–187.
- LWK-LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN (HG.) (2015a): Düngung mit Phosphat, Kali, Magnesium. Online <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/pdf/phosphat-kalium-magnesium-pdf.pdf>, zuletzt geprüft am 03.06.2022.
- LWK-LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN (2015b): Düngung mit Phosphat, Kali, Magnesium. Gehaltsklassen für Acker- und Grünland. Online <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/pdf/phosphat-kalium-magnesium-pdf.pdf>, zuletzt geprüft am 22.11.2021.
- LWK-LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN (HG.) (2015c): Kalkung. Online <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/duengung/basisinfos/kalkung-pdf.pdf>, zuletzt geprüft am 03.06.2022.
- LWK-LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN (HG.) (2020): Anleitung zur Erstellung der Düngebedarfsermittlung (DBE) für Phosphat nach DüV 2020 für Ackerbau. Düngebedarfsermittlung P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> für Futterzwischenfrüchte. Online <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/duengung/programme/dbepdf/p-dbe-anleitung.pdf>, zuletzt geprüft am 28.06.2022.

- LWK-LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN (2021): Ökolandbau NRW: Adressen. Hg. v. Referat II 4 - Ökologischer Landbau, Agrarumweltförderung. MULNV NRW-MINISTERIUM FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT, NATUR- UND VERBRAUCHERSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN. Düsseldorf. Online [https://www.oekolandbau.nrw.de/service/adressen/adresse?tt\\_address%5BshowUid%5D=2183&cHash=36439c14dbd317f576a534c0a9cc1701](https://www.oekolandbau.nrw.de/service/adressen/adresse?tt_address%5BshowUid%5D=2183&cHash=36439c14dbd317f576a534c0a9cc1701), zuletzt aktualisiert am 09.11.2021, zuletzt geprüft am 09.11.2021.
- MAPCOORDINATES (2021): Google Maps Koordinaten einfach und schnell finden. Meereshöhe bestimmen. Hg. v. Vivid Planet Software GmbH. Wallersee. Online <https://www.mapcoordinates.net/de>, zuletzt aktualisiert am 08.11.2021, zuletzt geprüft am 08.11.2021.
- MASSEY, M. S.; DAVIS, J. G.; IPPOLITO, J. A.; SHEFFIELD, R. E. (2009): Effectiveness of Recovered Magnesium Phosphates as Fertilizers in Neutral and Slightly Alkaline Soils. In: *Agronomy Journal* 101 (2), S. 323–329. DOI: 10.2134/agronj2008.0144.
- MATSCHÉ, N. (1973): Die Stickstoffelimination beim Betrieb der Kläranlage Wien-Blumental. In: v. d. Emde, W. (Hg.): Probleme des Umweltschutzes am Beispiel von großen Abwasserreinigungsanlagen. Wien: Springer Wien, S. 100–106.
- MENGEL, K. (1983): Responses of various crop species and cultivars to fertilizer application. In: *Plant and Soil* 72 (2-3), S. 305–319. DOI: 10.1007/BF02181970.
- MERBACH, W.; DEUBEL, A.; GRANSEE, A.; RUPPEL, S.; KLAMROTH, A.-K. (2010): Phosphorus solubilization in the rhizosphere and its possible importance to determine phosphate plant availability in soil. A review with main emphasis on German results. In: *Archives of Agronomy and Soil Science* 56 (2), S. 119–138. DOI: 10.1080/03650340903005640.
- METEOSTAT (HG.) (2021): Warstein | Wetterrückblick 2021. Online <https://meteostat.net/de/place/46Y0NU?t=2021-01-01/2021-12-31>, zuletzt aktualisiert am 01.11.2021, zuletzt geprüft am 02.01.2022.
- MEYER, C.; STEINMETZ, H. (2013): Phosphorrückgewinnung aus Klärschlämmen kommunaler Kläranlagen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hg.): Energie aus Abfall, Band 10. Online 1015-1038.
- MIESKE, R. (2018): Anaerobe Schlammstabilisierung bei Faultemperaturen unter 35 °C. Erweiterung deutscher Bemessungsregeln. UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG. Institut für Siedlungswasserwirtschaft.
- MOTESHAZADEH, B.; ETESAMI, H.; BAGHERI-NOVAIR, S.; AMIRMOKRI, H. (2017): Fertilizer consumption trend in developing countries vs. developed countries. In: *Environmental monitoring and assessment* 189 (3), S. 103. DOI: 10.1007/s10661-017-5812-y.
- MULNV-MINISTERIUM FÜR KLIMASCHUTZ, UMWELT, LANDWIRTSCHAFT, NATUR- UND VERBRAUCHERSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (HG.) (2013): EU-Verordnung Ökologischer Landbau Eine einführende Erläuterung mit Beispielen. Erzeugung, Kontrolle, Kennzeichnung, Verarbeitung und Einfuhr von Öko-Produkten Mit allen Gesetzes- und Verordnungstexten. 4. Aufl. Düsseldorf. Online <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/oekolandbau/pdf/oekovo-mkulnv.pdf>, zuletzt geprüft am 28.06.2022.
- NOWAK, O. (1993): Der Einfluß der Klärschlammbehandlung und Klärschlamm Entsorgung auf das Verfahrenskonzept der Kläranlage. Wien. Online [https://repositum.tuwien.at/bitstream/20.500.12708/16880/1/Nowak\\_Der%20Einfluss%20der%20KI%C3%A4rschlammbehandlung%20und\\_1993.pdf](https://repositum.tuwien.at/bitstream/20.500.12708/16880/1/Nowak_Der%20Einfluss%20der%20KI%C3%A4rschlammbehandlung%20und_1993.pdf).
- OHTAKE, H.; TSUNEDA, S. (HG.) (2019): Phosphorus Recovery and Recycling. Singapore: Springer Singapore.
- ORTWEIN, B. (2016): AirPrex - ein Verfahren zur Schlammoptimierung mit der Option der Phosphat-Rückgewinnung - PDF Download. Innovationsforum THERMOLYPHOS. Halle, 05.10.2016. Online <https://docplayer.org/62859300-Airprex-ein-verfahren-zur-schlammoptimierung-mit-der-option-der-phosphat-rueckgewinnung.html>, zuletzt geprüft am 10.12.2021.
- OSTARA-OSTARA NUTRIENT RECOVERY TECHNOLOGIES INC. (o.J.): Nutrient Recovery Solution. Pearl® and WASSTRIP®. Online [http://ostara.com/wp-content/uploads/2017/03/EU\\_Ostara\\_NRS\\_Brochure\\_170329.pdf](http://ostara.com/wp-content/uploads/2017/03/EU_Ostara_NRS_Brochure_170329.pdf), zuletzt geprüft am 28.06.2022.

- OSTARA-OSTARA NUTRIENT RECOVERY TECHNOLOGIES INC. (2016): CrystalGreen® continuous release fertilizer 5-28-0 with 10%Mg. Vancouver. Online [http://crystalgreen.com/wp-content/uploads/2016/01/CrystalGreen\\_Label\\_Technical-Data-Sheet-2000lbs\\_rev-05.pdf](http://crystalgreen.com/wp-content/uploads/2016/01/CrystalGreen_Label_Technical-Data-Sheet-2000lbs_rev-05.pdf), zuletzt geprüft am 28.06.2022.
- PANTEN, K.; LEINWEBER, P. (2020): Agronomische Bewertung nach fünfjähriger Phosphordüngung mit Knochenkohle. In: *Journal für Kulturpflanzen* 72 (12), S. 561–576. DOI: 10.5073/JfK.2020.12.02.
- PAULSEN, H. M.; KÖPKE, U.; OBERSON, A.; RAHMANN, G. (2016): Phosphorus—The Predicament of Organic Farming. In: Schnug, E.; Kok, L. J. de (Hg.): *Phosphorus in Agriculture: 100 % Zero*. Dordrecht: Springer Netherlands, S. 195–214.
- POWELL, C. L. (1974): Effect of P fertilizer on root morphology and P uptake of *Carex coriacea*. In: *Plant and Soil* 41 (3), S. 661–667. DOI: 10.1007/BF02185824.
- PYREG GMBH-PYREG GMBH CARBON TECHNOLOGY SOLUTIONS (2019): Pyreg. Klärschlamm\_Broschüre.DE.12.2019. Dörth. Online [https://pyreg.com/wp-content/uploads/2020\\_pyreg\\_broschure\\_schlamm\\_DE.pdf](https://pyreg.com/wp-content/uploads/2020_pyreg_broschure_schlamm_DE.pdf), zuletzt geprüft am 16.12.2021.
- RANIRO, H. R.; SOARES, T. D. M.; ADAM, C.; PAVINATO, P. S. (2022): Waste-derived fertilizers can increase phosphorus uptake by sugarcane and availability in a tropical soil #. In: *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. DOI: 10.1002/jpln.202100410.
- RASUL, G. A. M. (2016): Effect of Phosphorus Fertilizer Application on Some Yield Components of Wheat and Phosphorus Use Efficiency in Calcareous Soil. In: *Journal of Dynamics in Agricultural Research* 3 (4), S. 46–51. Online [https://www.researchgate.net/profile/ghafoor-mam-rasul/publication/311948376\\_effect\\_of\\_phosphorus\\_fertilizer\\_application\\_on\\_some\\_yield\\_components\\_of\\_wheat\\_and\\_phosphorus\\_use\\_efficiency\\_in\\_calcareous\\_soil](https://www.researchgate.net/profile/ghafoor-mam-rasul/publication/311948376_effect_of_phosphorus_fertilizer_application_on_some_yield_components_of_wheat_and_phosphorus_use_efficiency_in_calcareous_soil), zuletzt geprüft am 28.06.2022.
- RÖMER, W. (2006): Vergleichende Untersuchungen zur Pflanzenverfügbarkeit von Phosphat aus verschiedenen P-Recycling-Produkten im Keimpflanzenversuch. In: *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 169 (6), S. 826–832. DOI: 10.1002/jpln.200520587.
- RÖMER, W. (2013): P-Düngewirkung von P-Recyclingprodukten. In: *Korrespondenz Abwasser, Abfall* 60 (3), S. 202–215. DOI: 10.3242/kae2013.03.003.
- RÖMER, W.; STEINGROBE, B. (2018): Fertilizer Effect of Phosphorus Recycling Products. In: *Sustainability* 10 (4), S. 1166. DOI: 10.3390/su10041166.
- SANDAÑA, P. (2016): Phosphorus uptake and utilization efficiency in response to potato genotype and phosphorus availability. In: *European Journal of Agronomy* 76, S. 95–106. DOI: 10.1016/j.eja.2016.02.003.
- SCHAAF, T. (1998): Integration von Modellansätzen zur Bodenbearbeitung und Düngung in den Baukasten für Stickstoffs simulationsmodelle EXPERT-N. Dissertation. Hg. v. Zentralstelle für Agrardokumentation und-information (ZADI).
- SCHEHKAHN, A.; JOSTES, A. (2010): Zukunft braucht Werte: Bio&Fair. Leitfaden für Erzeuger, Verarbeiter und Handel. Hg. v. Kassler Institut für ländliche Entwicklung e.V. Warburg. Online [https://org-prints.org/18132/1/18132-101004\\_BR\\_biofair\\_ansichts.pdf](https://org-prints.org/18132/1/18132-101004_BR_biofair_ansichts.pdf), zuletzt geprüft am 20.04.2022.
- SCHIPPER, W. (2019): Success Factors for Implementing Phosphorus Recycling Technologies. In: Ohtake, H.; Tsuneda, S. (Hg.): *Phosphorus Recovery and Recycling*. Singapore: Springer Singapore, S. 101–132.
- SCHNUG, E.; HANEKLAUS, S. H. (2016): The Enigma of Fertilizer Phosphorus Utilization. In: Schnug, E.; Kok, L. J. de (Hg.): *Phosphorus in Agriculture: 100 % Zero*. Dordrecht: Springer Netherlands.
- SCHNUG, E.; KOK, L. J. DE (HG.) (2016): *Phosphorus in Agriculture: 100 % Zero*. Dordrecht: Springer Netherlands.
- SCHOLEFIELD, D.; SHELDRIK, R. D.; MARTYN, T. M.; LAVENDER, R. H. (1999): A comparison of triple superphosphate and Gafsa ground rock phosphate fertilisers as P-sources for grass-clover swards on a poorly-drained acid clay soil. In: *Nutr Cycl Agroecosyst* 53 (2), S. 147–155. DOI: 10.1023/A:1009750623318.
- SCHÜLLER, H. (1969): Die CAL-Methode, eine neue Methode zur Bestimmung des pflanzenverfügbaren Phosphates in Böden. In: *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 123 (1), S. 48–63. DOI: 10.1002/jpln.19691230106.

- SEVERIN, M.; BREUER, J.; REX, M.; STEMANN, J.; CH, A.; VAN DEN WEGHE, H.; KÜCKE, M. (2014): Phosphate fertilizer value of heat treated sewage sludge ash. In: *Plant Soil Environ.* 60 (No. 12), S. 555–561. DOI: 10.17221/548/2014-PSE.
- SINCLAIR, A. G.; JOHNSTONE, P. D.; SMITH, L. C.; RISK, W. H.; MORTON, J. D.; O'CONNOR, M. B. ET AL. (1994): Patterns of, and a model for, dry matter yield response in grass/clover pastures to annual applications of triple superphosphate fertiliser. In: *New Zealand Journal of Agricultural Research* 37 (2), S. 239–253. DOI: 10.1080/00288233.1994.9513061.
- SINCLAIR, A. G.; JOHNSTONE, P. D.; SMITH, L. C.; RISK, W. H.; O'CONNOR, M. B.; ROBERTS, A. H. ET AL. (1993): Effect of reactive phosphate rock on the pH of soil under pasture. In: *New Zealand Journal of Agricultural Research* 36 (3), S. 381–384. DOI: 10.1080/00288233.1993.10417736.
- SINGH, D. K.; SALE, P. W. G. (1998): Phosphorus supply and the growth of frequently defoliated white clover (*Trifolium repens* L.) in dry soil. In: *Plant and Soil* 205 (2), S. 155–162. DOI: 10.1023/A:1004316726665.
- SPIEGEL, A.-K.; GRONLE, A.; ARNCKEN, C.; BERNHARDT, T.; HEB, J.; SCHMACK, J. ET AL. (2014): Leguminosen nutzen. Naturverträgliche Anbaumethoden aus der Praxis. 1. Aufl. Online <https://www.fibl.org/fileadmin/documents/shop/1655-leguminosen.pdf>, zuletzt geprüft am 05.05.2022.
- SPIEGEL-DER SPIEGEL GMBH & CO. KG (2000): Rinderseuche: Die Chronologie der BSE-Krise. In: *DER SPIEGEL*, 28.11.2000. Online <https://www.spiegel.de/politik/ausland/rinderseuche-die-chronologie-der-bse-krise-a-105210.html>, zuletzt geprüft am 14.12.2021.
- STECKENMESSER, D.; VOGEL, C.; ADAM, C.; STEFFENS, D. (2016): Phosphorrecycling mittels Kombination von Nieder-Temperatur-Konvertierung und thermochemischem Aufschluss von biogenen Reststoffen. Hg. v. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Online <https://orgprints.org/31706/>, zuletzt geprüft am 28.06.2022.
- STEFFENS, D.; STAMM, R.; YAN, F.; LEITHOLD, G.; SCHUBERT, S.; HEB, J.; RAHMANN, G. (2005): Rohphosphatmobilisierung von Sommerweizen, Weißlupine und Ackerbohne in einer Fruchtfolge. In: *Ende der Nische, Beiträge zur 8. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau*. Online <https://orgprints.org/id/eprint/3604/>, zuletzt geprüft am 28.06.2022.
- STEIN-BACHINGER, K.; RECKLING, M.; GRANSTEDT, A. (2013): Kreislauforientierte Landwirtschaft-Ökologische Landwirtschaft. Online [https://www.zalf.de/de/forschung\\_lehre/publikationen/Documents/oekolandbau/handbuecher/BERAS\\_Pflanzenbau\\_Tierhaltung.pdf](https://www.zalf.de/de/forschung_lehre/publikationen/Documents/oekolandbau/handbuecher/BERAS_Pflanzenbau_Tierhaltung.pdf), zuletzt geprüft am 28.06.2022.
- SYLVESTER-BRADLEY, R.; ROLLETT, A.; DOWNING, E.; DUDMAN, S.; SLATER, M.; MORRIS, N.; WITHERS, P. (2019): Cost-effective Phosphorus Management on UK Arable Farms. 570. Aufl. (AHDB Research Report, 3). Online <https://scholar.google.com/citations?user=skwbxucaaaj&hl=de&oi=sra>, zuletzt geprüft am 28.06.2022.
- SZILAS, C.; SEMOKA, J. M. R.; BORGGAARD, O. K. (2007): Can local Minjingu phosphate rock replace superphosphate on acid soils in Tanzania? In: *Fertilizer Research* 77 (3), S. 257–268. DOI: 10.1007/s10705-006-9064-4.
- TAYLOR, M.; KIM, N.; SMIDT, G.; BUSBY, C.; MCNALLY, S.; ROBINSON, B. ET AL. (2016): Trace Element Contaminants and Radioactivity from Phosphate Fertiliser. In: Schnug, E.; Kok, L. J. de (Hg.): *Phosphorus in Agriculture: 100 % Zero*. Dordrecht: Springer Netherlands, S. 231–266.
- TIMAC AGRO (HG.) (2017): Starke Lösungen für den Biobetrieb. Online [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwivLTwrLb0AhXYiP0HHczOCgoQFnoECAMQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.timacagro.com%2Fapp%2Fuploads%2Fsites%2F15%2F2017%2F11%2FTimac\\_BioBroschu%25CC%2588re\\_3.2018\\_web.pdf&usq=AOvVaw3O2IBROu1GPnYhlzwtJYX0](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwivLTwrLb0AhXYiP0HHczOCgoQFnoECAMQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.timacagro.com%2Fapp%2Fuploads%2Fsites%2F15%2F2017%2F11%2FTimac_BioBroschu%25CC%2588re_3.2018_web.pdf&usq=AOvVaw3O2IBROu1GPnYhlzwtJYX0), zuletzt aktualisiert am 26.11.2021, zuletzt geprüft am 26.11.2021.
- UBA-UMWELTBUNDESAMT (2007): Rückgewinnung eines schadstofffreien, mineralischen Kombinationsdüngers "Magnesiumammoniumphosphat - MAP" aus Abwasser und Klärschlamm. Abschlussbericht. Forschungsbericht 202 33 308. Unter Mitarbeit von Pinnekamp, J., Montag, D., Gethke, K., Goebel, S. und Herbst, H. SIEDLUNGSWASSERWIRTSCHAFT DER RWTH AACHEN. Dessau-Roßlau (Umweltforschungsplan, 27/2007). Online <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3256.pdf>, zuletzt geprüft am 31.01.2022.

- UBA-UMWELTBUNDESAMT (2019): Ökobilanzieller Vergleich der P-Rückgewinnung aus dem Abwasserstrom mit der Düngemittelproduktion aus Rohphosphaten unter Einbeziehung von Umweltfolgeschäden und deren Vermeidung. Abschlussbericht. Unter Mitarbeit von Kraus, F., Zamzow, M., Conzelmann, L., Remy, C., Kleyböcker, A., Seis, W. et al. Dessau-Roßlau (Umweltforschungsplan, 13/2019). Online [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-02-19\\_texte\\_13-2019\\_phorwaerts.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-02-19_texte_13-2019_phorwaerts.pdf), zuletzt geprüft am 02.11.2021.
- ULLMANN, M. (1894): Über Knochenmehl-Düngung. Ein Beitrag zur richtigen Wertbemessung der Knochenmehle. 2. Aufl. Hamburg: Lucas Gräfe & Sillem.
- USGS-U.S. GEOLOGICAL SURVEY (2022): Mineral commodity summaries 2022. In: *Mineral Commodity Summaries* (2022). DOI: 10.3133/mcs2022.
- VDLUFA-VERBAND DEUTSCHER LANDWIRTSCHAFTLICHER UNTERSUCHUNGS- UND FORSCHUNGSANSTALTEN (1997): Bodenuntersuchung Gesamtposphor. A 2.4.2.1 Molybdänblau Methode. In: Das VDLUFA-Methodenbuch. Band I. Darmstadt: VDLUFA-Verlag.
- VDLUFA-VERBAND DEUTSCHER LANDWIRTSCHAFTLICHER UNTERSUCHUNGS- UND FORSCHUNGSANSTALTEN (2013): Die chemische Untersuchung von Futtermitteln. A 2.2.5 Bestimmung von Rohprotein mittels DUMAS-Verbrennungsmethode. In: Das VDLUFA-Methodenbuch. Band III. Unter Mitarbeit von Naumann, C., Bassler, R., Seibold, R., & Barth, K. 4.1.2. Aufl. Darmstadt: VDLUFA-Verlag.
- VISTOSO, E.; IRAIRA, S.; SANDAÑA, P. (2021): Phosphorus Use Efficiency in Permanent Pastures in Andisols. In: *J Soil Sci Plant Nutr* 21 (4), S. 2587–2599. DOI: 10.1007/s42729-021-00526-9.
- WAIDA, C.; KEHRES, B. (2014): Phosphat-Löslichkeit. In: *Humuswirtschaft & Kompost (H&K)* (10), S.1-4.
- WANG, X.; SHEN, J.; LIAO, H. (2010): Acquisition or utilization, which is more critical for enhancing phosphorus efficiency in modern crops? In: *Plant Science* 179 (4), S. 302–306. DOI: 10.1016/j.plantsci.2010.06.007.
- WARREN, G. P.; ROBINSON, J. S.; SOMEUS, E. (2009): Dissolution of phosphorus from animal bone char in 12 soils. In: *Nutr Cycl Agroecosyst* 84 (2), S. 167–178. DOI: 10.1007/s10705-008-9235-6.
- WIESLER, F.; APPEL, T.; DITTER, K.; MÜLLER, T.; EBERSTEDT, T. (2018): Standpunkt - Phosphordüngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf. Hg. v. Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA). Speyer. Online <https://www.agrar-heute.com/media/2018-03/2018-standpunkt-p-duengung.pdf>, zuletzt geprüft am 30.05.2022.
- WIESLER, F.; HUND-RINKE, K.; GEORGE, E.; GREEF, J. M.; HOLZ, F.; HÖLZE, L. E.; ... & WULF, S. (2020): Recyclingphosphate in der Düngung–Nutzen und Grenzen. Hg. v. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Berlin. Online <https://opus4.kobv.de/opus4-bam/frontdoor/index/index/docid/51011>, zuletzt geprüft am 28.06.2022.
- WOLLMANN, I.; GAURO, A.; MÜLLER, T.; MÖLLER, K. (2018): Phosphorus bioavailability of sewage sludge-based recycled fertilizers. In: *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 181 (2), S. 158–166. DOI: 10.1002/jpln.201700111.
- WUHRMANN, K. (1964): Stickstoff- und Phosphorelimination Ergebnisse von Versuchen im technischen Maßstab. In: *Schweiz. Z. Hydrologie* 26 (2), S. 520–558. DOI: 10.1007/bf02504064.
- YLI-HALLA, M. (2016): Fate of Fertilizer P in Soils: Inorganic Pathway. In: Schnug, E.; Kok, L. J. de (Hg.): *Phosphorus in Agriculture: 100 % Zero*. Dordrecht: Springer Netherlands, S. 27–40.
- YLI-HALLA, M.; SCHICK, J.; KRATZ, S.; SCHNUG, E. (2016): Determination of Plant Available P in Soil. In: Schnug, E.; Kok, L. J. de (Hg.): *Phosphorus in Agriculture: 100 % Zero*. Dordrecht: Springer Netherlands, S. 62–93.
- YU, X.; KEITEL, C.; DIJKSTRA, F. A. (2021): Global analysis of phosphorus fertilizer use efficiency in cereal crops. In: *Global Food Security* 29, S. 100545. DOI: 10.1016/j.gfs.2021.100545.
- ZIMMER, D.; PANTEN, K.; FRANK, M.; SPRINGER, A.; LEINWEBER, P. (2019): Sulfur-Enriched Bone Char as Alternative P Fertilizer: Spectroscopic, Wet Chemical, and Yield Response Evaluation. In: *Agriculture* 9 (1), S. 21. DOI: 10.3390/agriculture9010021.



---

## Anhang

I.	Versuchsvorbereitung .....	XVIII
I.I.	Bodenprüfbericht der LUFA - Standort Kroll-Fiedler .....	XVIII
I.II.	Bodenprüfbericht der LUFA – Standort Weber .....	XIX
II.	Versuchsaufbau .....	XX
II.I.	Versuchsskizze Kroll-Fiedler .....	XX
II.II.	Versuchsskizze Weber .....	XXI
II.III.	Kalkulationsrechnung der Düngemenge pro Parzelle, um 135,28 kg P ha <sup>-1</sup> (KF) und 146,19 kg P ha <sup>-1</sup> (W) zuzuführen .....	XXII
III.	Versuchsdurchführung .....	XXIII
III.I.	Daten der einzelnen Kleeegrasschnitte .....	XXIII

## I. Versuchsvorbereitung

## I.I. Bodenprüfbericht der LUFA - Standort Kroll-Fiedler

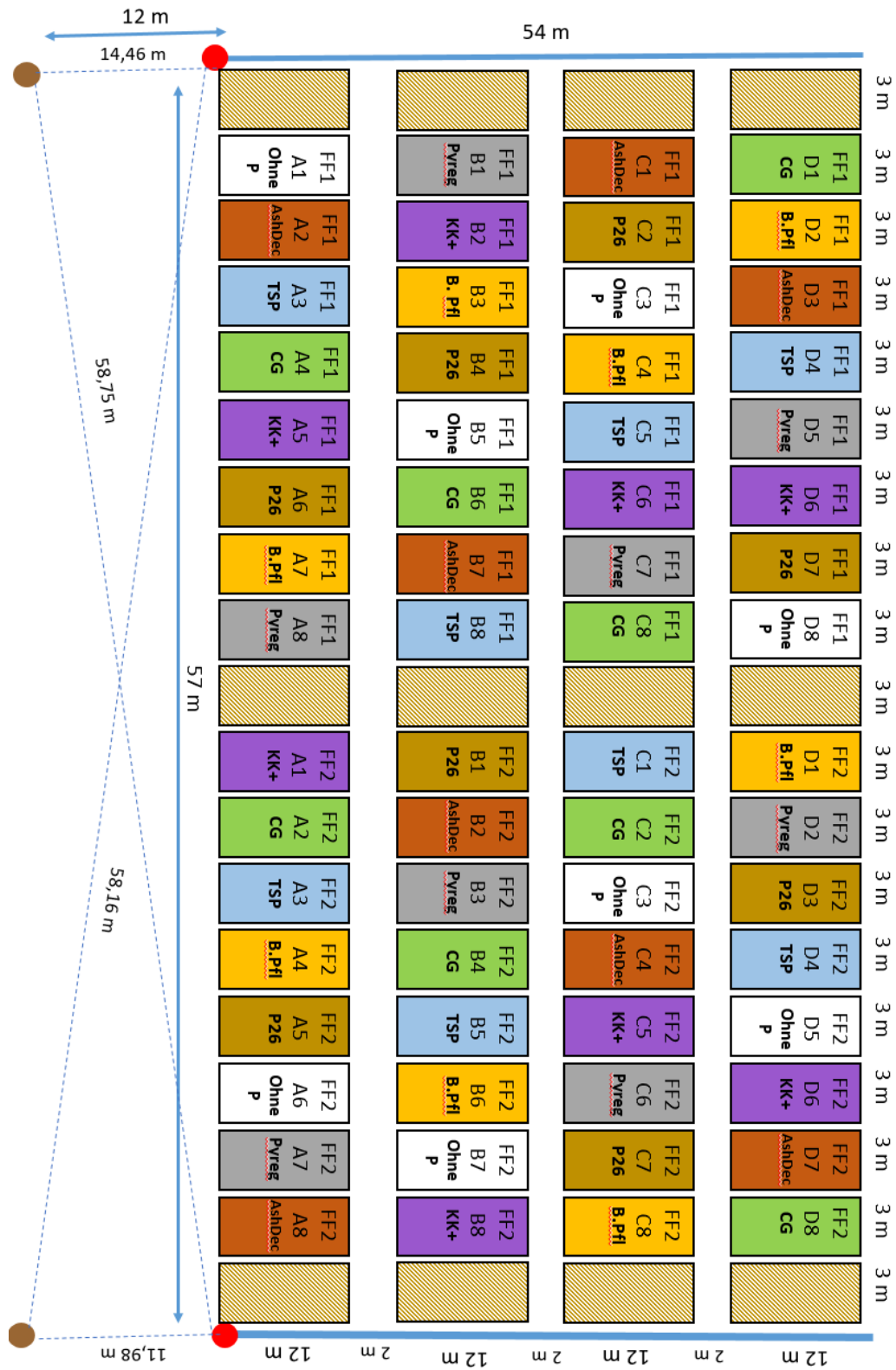
	pH-Wert	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Mg	Cu	Mn	Zn	Bor
		mg 100 g <sup>-1</sup> Boden			mg kg <sup>-1</sup> Boden			
<b>Versuchsfläche 1 (Klee gras)</b>	<b>6,45</b>	<b>4,91</b>	<b>16,69</b>	<b>7,69</b>	<b>1,97</b>	<b>162,44</b>	<b>5,88</b>	<b>0,57</b>
<b>Block A</b>	<b>6,49</b>	<b>5</b>	<b>18,00</b>	<b>7,63</b>	<b>2,00</b>	<b>163,38</b>	<b>5,89</b>	<b>0,60</b>
A1	6,7	4	16	7	1,8	159	5,9	0,58
A2	6,6	5	18	8	1,9	155	5,9	0,56
A3	6,3	6	22	8	1,9	166	6,3	0,68
A4	6,4	6	23	8	2,3	172	6,8	0,66
A5	6,4	6	17	8	2	160	6,3	0,61
A6	6,5	5	17	8	2,1	178	5,8	0,57
A7	6,5	4	15	7	2	158	5	0,56
A8	6,5	4	16	7	2	159	5,1	0,57
<b>Block B</b>	<b>6,41</b>	<b>4,75</b>	<b>17,63</b>	<b>7,63</b>	<b>1,93</b>	<b>153,88</b>	<b>5,56</b>	<b>0,57</b>
B1	6,4	5	22	8	2	169	6,3	0,66
B2	6,5	4	16	7	1,9	155	5,4	0,55
B3	6,4	5	19	8	2	155	5,9	0,6
B4	6,4	5	18	8	1,9	153	6	0,63
B5	6,3	4	14	7	2,1	162	5,9	0,64
B6	6,5	5	17	8	1,8	170	5,3	0,58
B7	6,2	5	18	8	1,9	159	4,9	0,56
B8	6,6	5	17	7	1,8	108	4,8	0,35
<b>Block C</b>	<b>6,45</b>	<b>4,75</b>	<b>14,88</b>	<b>7,75</b>	<b>1,91</b>	<b>153,14</b>	<b>5,68</b>	<b>0,54</b>
C1	6,4	5	18	8	2,1	181	6,9	0,6
C2	6,5	5	15	8	2,1	171	6,5	0,63
C3	6,4	8	22	9	2,1	179	7,3	0,63
C4	6,5	4	14	8	2,1	167	6,2	0,57
C5	6,4	4	12	7	2,1	179	6,4	0,6
C6	6,5	4	12	7	0,5	0,1	0,1	0,1
C7	6,4	4	13	7	2,1	175	5,9	0,61
C8	6,5	4	13	8	2,2	173	6,1	0,61
<b>Block D</b>	<b>6,46</b>	<b>5,13</b>	<b>16,25</b>	<b>7,75</b>	<b>2,03</b>	<b>179,38</b>	<b>6,40</b>	<b>0,56</b>
D1	6,5	7	20	8	2,1	205	7,2	0,6
D2	6,7	5	17	7	1,9	159	6,1	0,5
D3	6,4	8	19	8	2	180	6,8	0,55
D4	6,5	5	19	8	2	186	6,6	0,59
D5	6,3	4	15	8	2,1	175	6,3	0,59
D6	6,5	4	12	8	2	193	5,9	0,54
D7	6,5	4	16	8	2	164	6,3	0,49
D8	6,3	4	12	7	2,1	173	6	0,58

## I.II. Bodenprüfbericht der LUFA – Standort Weber

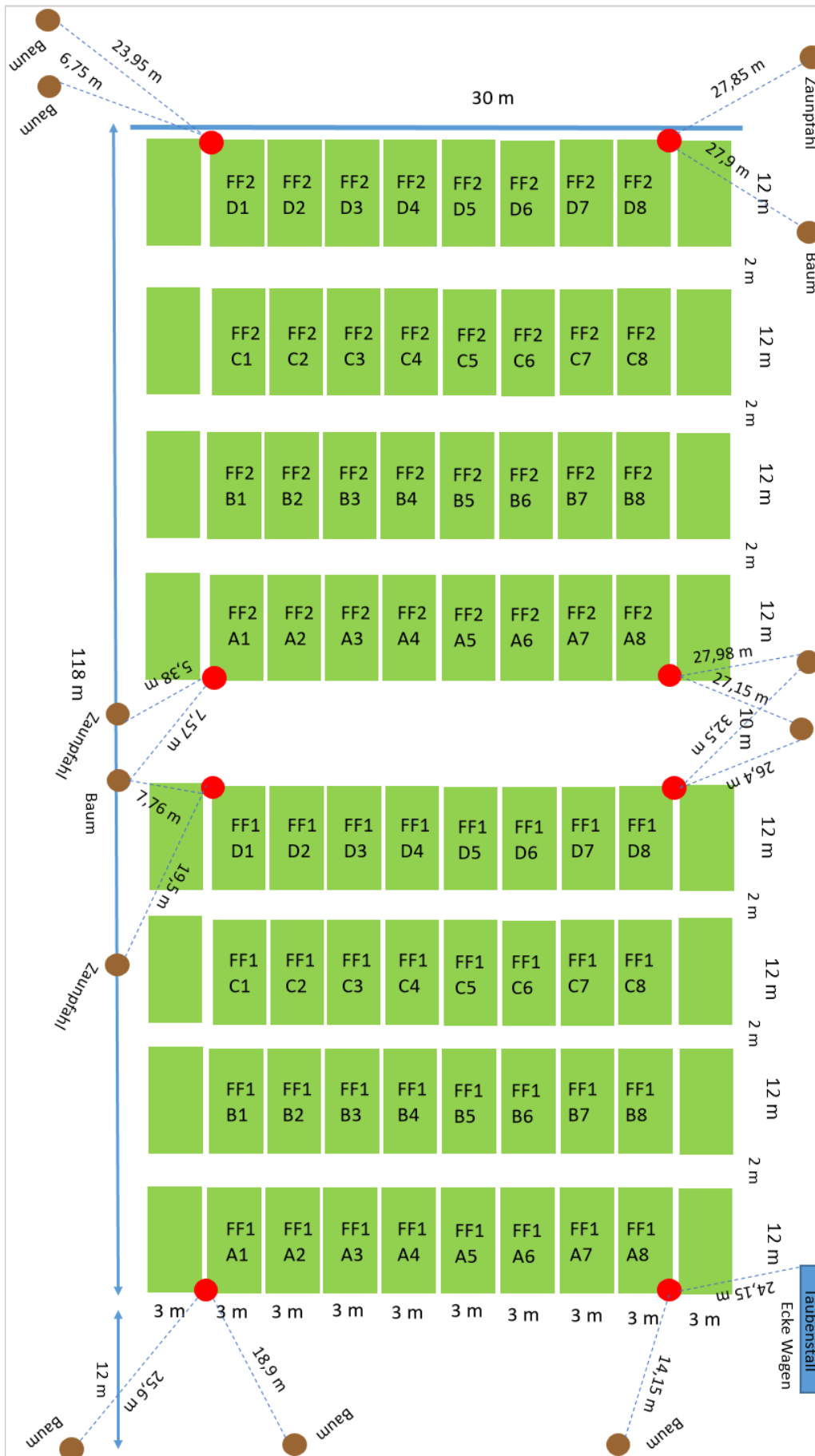
	pH-Wert	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Mg
	mg 100g <sup>-1</sup> Boden			
<b>Versuchsfläche 1 (Klee gras)</b>	<b>5,31</b>	<b>2</b>	<b>3,81</b>	<b>5,59</b>
<b>Block A</b>	<b>5,29</b>	<b>2</b>	<b>3,88</b>	<b>5,63</b>
A1	5,1	2	5	6
A2	5,2	2	4	5
A3	5,3	2	4	5
A4	5,2	2	3	5
A5	5,2	2	3	6
A6	5,2	2	4	6
A7	5,5	2	5	6
A8	5,6	2	3	6
<b>Block B</b>	<b>5,24</b>	<b>2</b>	<b>3,63</b>	<b>5,38</b>
B1	5,5	2	5	6
B2	5,2	2	3	6
B3	5,6	2	5	5
B4	4,9	2	4	5
B5	5,1	2	3	5
B6	5,1	2	3	5
B7	5,2	2	3	6
B8	5,3	2	3	5
<b>Block C</b>	<b>5,36</b>	<b>2</b>	<b>3,63</b>	<b>5,63</b>
C1	5,6	2	3	6
C2	5,6	2	4	5
C3	5,1	2	3	5
C4	5,6	2	4	6
C5	5,5	2	4	6
C6	5,2	2	4	6
C7	5,1	2	3	5
C8	5,2	2	4	6
<b>Block D</b>	<b>5,35</b>	<b>2</b>	<b>4,13</b>	<b>5,75</b>
D1	5,6	2	5	6
D2	5,7	2	5	6
D3	5,3	2	4	5
D4	5,4	2	5	6
D5	5,1	2	3	5
D6	5,1	2	3	6
D7	5,1	2	4	5
D8	5,5	2	4	7

## II. Versuchsaufbau

### II.I. Versuchsskizze Kroll-Fiedler



## II.II. Versuchsskizze Weber



## II.III. Kalkulationsrechnung der Düngemenge pro Parzelle, um 135,28 kg P ha<sup>-1</sup> (KF) und 146,19 kg P ha<sup>-1</sup> (W) zuzuführen

### **Bedarf:**

Berechnung mit dem Tool NPM<sub>ax</sub> der LWK unter Einbezug der Bodenart, P-Gehalt und den angebauten Kulturen (drei gliedrige Fruchtfolge aus Klee-/Luzernengras, Silomais TS 33 und Winterroggen)

**Kroll-Fiedler:** 310 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>

**Weber:** 335 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>

### **Berechnung der Ausbringungsmenge P pro Parzelle:**

#### **Kroll-Fiedler:**

310 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> × 0,4364 = 135,284 kg P ha<sup>-1</sup>

135,284 kg P ha<sup>-1</sup> × 0,0036 = 0,487 kg P/ 36 m<sup>2</sup>

#### **Weber:**

335 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> × 0,4364 = 146,194 kg P ha<sup>-1</sup>

146,194 kg P ha<sup>-1</sup> × 0,0036 = 0,526 kg P/ 36 m<sup>2</sup>

### **Berechnung der Düngemittel-Ausbringungsmenge pro Parzelle (36 m<sup>2</sup>):**

$$\frac{\text{"Bedarf pro Parzelle"} \div \text{"Düngemittel P pro TM"}}{\text{"Düngemittel TM"}} = \text{"Düngemittel pro Parzelle"}$$

**Beispiel:** Ausbringungsmenge Crystal Green pro Parzelle für den Standort Kroll-Fiedler:

$$\frac{0,487 \frac{\text{kg P}}{36 \text{ m}^2} \div 0,11 \frac{\text{kg P}}{\text{kg TM}}}{0,617} = 7,175 \frac{\text{kg}}{\text{Parzelle}}$$

Produkt	Crystal Green	Berliner Pflanze	AshDec	Pyreg	KK <sup>Plus</sup>	TSP	Rohphosphat
TM	61,7 %	83,7 %	100 %	76,1 %	95,7 %	91,3 %	95,2 %
M.-% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> TM	25 %	25 %	17 %	14 %	25%	39 %	22 %
kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /kg TM	0,25	0,25	0,17	0,14	0,25	0,39	0,22
M.-% P TM	11 %	11 %	7,5 %	6,1 %	11%	17 %	10 %
kg P/kg TM	0,11	0,11	0,075	0,061	0,11	0,17	0,1
<b>Ausbringungsmenge pro Parzelle</b>							
Kroll-Fiedler	7,18 kg 36m <sup>-2</sup>	5,29 kg 36m <sup>-2</sup>	6,49 kg 36m <sup>-2</sup>	10,49 kg 36m <sup>-2</sup>	4,63 kg 36m <sup>-2</sup>	3,14 kg 36m <sup>-2</sup>	5,12 kg 36m <sup>-2</sup>
Weber	7,75 kg 36m <sup>-2</sup>	5,71 kg 36m <sup>-2</sup>	7,01 kg 36m <sup>-2</sup>	11,33 kg 36m <sup>-2</sup>	5,00 kg 36m <sup>-2</sup>	3,39 kg 36m <sup>-2</sup>	5,53 kg 36m <sup>-2</sup>

### III. Versuchsdurchführung

#### III.I. Daten der einzelnen Kleegrasschnitte

Kleegrasschnitt	Kroll-Fiedler	Weber
1.	30.06.2021	10.06.2021
2.	20.08.2021	28.07.2021
3.	-	25.10.2021

## Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten und nicht veröffentlichten Schriften entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form oder auszugsweise im Rahmen einer anderen Prüfung noch nicht vorgelegt worden.

Köln, den 01.07.2022

---

Unterschrift der Studierenden



**RHEINISCHE FRIEDRICH-WILHELMS-UNIVERSITÄT BONN**

Landwirtschaftliche Fakultät

# **BACHELORARBEIT**

im Rahmen des Bachelorstudiengangs

**Agrarwissenschaften**

zur Erlangung des Grades

*„Bachelor of Science“*

*Einfluss verschiedener P-Düngerarten auf die Zusammensetzung  
der P-Fractionen im Oberboden unter Mais*

vorgelegt von:

Friederike Charlotte Helene tho Seeth

Matrikel-Nr.: 3333258

vorgelegt am:

26.09.2022

1. Prüfer: Dr. Daniel Neuhoff

2. Prüfer: Prof. Dr. Thomas Döring

## Kurzfassung

Besonders bei spezialisierten Betrieben des ökologischen Landbaus kommt es durch die Abfuhr und den Verkauf der Erträge zu einem Phosphordefizit im innerbetrieblichen Nährstoffkreislauf (LWK-NRW 2015). Für Rohphosphat und somit, neben den Wirtschaftsdüngern, die wichtigste P-Quelle des deutschen Öko-Landbaus, wird es in absehbarer Zukunft zu einer Verknappung kommen. Die weltweiten Vorräte werden ausgeschöpft sein (KOLBE 2016). Um eine bisher ungenutzte P-Quelle des ökologischen Landbaus effizient nutzen zu können, gibt es zahlreiche Ansätze, aus Klärschlämmen verwendbare P-Rezyklate für die Landwirtschaft zurückzugewinnen. Der Einfluss auf die Zusammensetzung der P-Fractionen im Oberboden dieser P-Recycling-Dünger wurde in einem Mais-Feldversuch unter den Bedingungen des ökologischen Landbaus untersucht.

Der Versuch wurde auf zwei ökologisch bewirtschafteten Betrieben in Warstein auf einer randomisierten Blockanlage mit den Prüffaktoren Düngevariante und Standort angelegt. Die vier Wiederholungen waren in jeweils acht Parzellen unterteilt, die mit fünf Produkten der P-Rückgewinnung und drei Kontrollvarianten gedüngt wurden. Die Rezyklate haben zwei Herstellungsvorgänge der Rückgewinnung abgedeckt. Die Rückgewinnung aus Klärschlammwasser (*Crystal Green*), Klärschlammmasche (*AshDec*), Klärschlamm (*Berliner Pflanze*), getrockneter Klärschlamm (*Pyreg*) und entfetteten Knochenchips (*Knochenkohle+*). Die Kontrollvarianten waren in zwei Positivkontrollen (*Tripelsuperphosphat*, *Rohphosphat*) und in einer Negativkontrolle (*ohne P*) unterteilt. Es wurden von jeder Parzelle Bodenproben gezogen, um für jeden Standort eine Ausgangsmessung vor der Düngung und eine Messung nach der Ernte durchzuführen. Diese wurden einer Laboranalyse unterzogen und der durchschnittliche P-Gehalt der Proben wurde mit der sequentiellen P-Extraktion nach TIESSEN & MOIR (1993) analysiert. Die Analysedaten wurden einer Varianzanalyse unterzogen.

Schlussendlich konnte kein eindeutiges Ergebnis bezüglich der P-Fraktionierung im Boden festgestellt werden. Zwischen den Standorten gab es zahlreiche signifikante Unterschiede. Zwischen dem Prüffaktor Düngevariante hingegen nur in Hedley I.

Die Hypothese ob durch die Düngung die Zusammensetzung der P-Fractionen im Boden geändert werden kann, konnte bestätigt werden. Es darf nicht vernachlässigt werden, dass nicht nur die pflanzenverfügbaren Fraktionen verändert wurden, sondern auch die P-Gehalte in den nicht verfügbaren Fraktionen gestiegen sind. Letztendlich ist der Einfluss der Rezyklate stark abhängig von verschiedenen Faktoren in der Produktion und der Nutzung in der Landwirtschaft.

Zukünftige Studien sollten Aufschluss darüber geben, ob die in Gefäßversuchen festgestellten Veränderungen auf die P-Fraktionierung im Boden auch in Feldversuchen unter den Bedingungen des ökologischen Landbaus zu bestätigen sind.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b> .....	I
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	II
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	VI
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	VII
<b>1 Einleitung</b> .....	1
<b>2 Literaturübersicht</b> .....	3
2.1 Der Phosphorkreislauf in der Biosphäre .....	3
2.2 Phosphor (P) als essentielles Nährelement .....	4
2.3 Phosphor als Dünger in der Landwirtschaft .....	5
2.4 P-Management im Ökolandbau .....	7
2.5 P-Recycling-Dünger .....	10
2.5.1 Crystal Green .....	10
2.5.2 AshDec .....	12
<b>3 Material und Methoden</b> .....	13
3.1 Feldversuch .....	13
3.1.1 Versuchsstandorte .....	13
3.1.2 Versuchsaufbau .....	15
3.1.3 Versuchsdurchführung .....	16
3.2 Sequentielle P-Extraktion .....	17
3.2.1 Laboranalyse .....	17
3.2.2 Herstellung der Lösungen für die Extraktion .....	18
3.2.3 Herstellung der Anionenaustauscherharzstreifen .....	18
3.2.4 Durchführung der sequenziellen P-Extraktion .....	19
3.3 Photometrische Messung .....	22
3.3.1 Herstellung der Standards .....	22
3.3.2 Bestimmung von $P_i$ in den Extrakten .....	22
3.3.2.1 Bestimmung von $P_i$ in Hedley I (0,5 M HCl) .....	23
3.3.2.2 Bestimmung von $P_i$ in Hedley II (0,5 M $\text{NaHCO}_3$ ) .....	23
3.3.3.3 Bestimmung von $P_i$ in Hedley III (0,1 M NaOH) .....	24
3.3.3.4 Bestimmung von $P_i$ in Hedley IV (1 M HCl) .....	24

---

3.3.3.5 Bestimmung von $P_i$ in Hedley V konzentrierter HCl.....	25
3.3.3 Berechnung der Extinktionswerte .....	26
3.4 Statistische Auswertung .....	27
<b>4 Ergebnisse</b> .....	<b>28</b>
4.1 P-Gehalt der Bodenproben .....	28
4.2 Z-Verteilung der Düngevarianten .....	34
<b>5 Diskussion</b> .....	<b>35</b>
5.1 Effekte der Standorte.....	35
5.2 Effekte der Düngevariante .....	36
5.3 Methodenkritik .....	39
<b>6 Zusammenfassung</b> .....	<b>40</b>
<b>7 Literaturverzeichnis</b> .....	<b>42</b>
<b>Eidesstattliche Erklärung</b> .....	<b>IX</b>

# Abkürzungsverzeichnis

## Maßeinheiten:

g	Gramm
ha	Hektar
nm	Nanometer
m	Meter
m <sup>2</sup>	Quadratmeter
ml	Milliliter
mm	Millimeter
µl	Mikroliter

## Chemische Elemente:

Al	Aluminium
Ca	Calcium
Fe	Eisen
N	Stickstoff
P	Phosphor

## Abkürzungen:

AbfKlärV	Klärschlammverordnung
AD	AshDec
AOL	Agrarökologie und organischer Landbau
ATP	Adenosintriphosphat
BP	Berliner Pflanze
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CAL-Methode	Calcium-Acetat-Lactat-Methode
CG	Crystal Green
h	Stunde
K0	Kontrollvariante
KK	KnochenkohlePlus
LWK	Landwirtschaftskammer
M	Mol
MAP	Magnesiumammoniumphosphat
min	Minute
P <sub>i</sub>	anorganischer Phosphorgehalt
P <sub>t</sub>	totaler Phosphorgehalt
PY	Pyreg
RP	Rohphosphat
rpm	Runde pro Minute
Standort K	Standort Kroll-Fiedler
Standort W	Standort Weber

TSP	Tripelsuperphosphat
UBA	Umweltbundesamt
VDLUFA	Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalt E.V.
vglw.	vergleichsweise

Symbole:

±	Plus/ Minus
°C	Temperatur in Grad Celsius
> / <	größer als/ kleiner als
®	registrierte Marke

# Tabellenverzeichnis

<b>Tab. 1: Gehaltsklassen für Acker- und Grünland nach VDLUFA-NRW.</b> S = Sand, lS = lehmiger Sand, sU = sandiger Schluff, ssL = stark sandiger Lehm, lU = lehmiger Schluff, sL = sandiger Lehm, uL = schluffiger Lehm, L = Lehm, utl = schluffiger toniger Lehm, tL = toniger Lehm, T = Ton. ....	5
<b>Tab. 2: Blockgenaue und durchschnittliche Bodeneigenschaften der Versuchsstandorte in 30 cm Tiefe (WANTULLA 2022)</b> bestimmt durch die Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt Nordrhein-Westfalen; Bodenproben vom 02.12.21 (Kroll-Fiedler) und 01.04.22 (Weber); N <sub>gesamt</sub> nach DIN EN 16168, P-Nachlieferungspotenzial nach FLOSSMANN & RICHTER (1982) bestimmt; alle anderen Parameter nach Methodenhandbuch I der VDLUFA (VDLUFA, 1999) bestimmt. ....	14
<b>Tab. 3: Schema zur Herstellung der Anionenaustauscherharzstreifen</b> HCl = Salzsäure, NaHCO <sub>3</sub> = Natriumhydrogencarbonat. ....	18
<b>Tab. 4: Ablaufschema der Sequenziellen P-Extraktion.</b> ....	21
<b>Tab. 5: Schema zum Ansetzen der Standards zur Bestimmung von P<sub>i</sub> in den Hedleys I (bis V).</b> ....	23
<b>Tab. 6: Hedley II</b> HCl = Salzsäure, NaHCO <sub>3</sub> = Natriumhydrogencarbonat. ....	23
<b>Tab. 7: Hedley III</b> HCl = Salzsäure, NaOH = Natriumhydroxid. ....	24
<b>Tab. 8: Hedley IV</b> HCl = Salzsäure. ....	24
<b>Tab. 9: Hedley V</b> NaOH = Natriumhydroxid. ....	25

# Abbildungsverzeichnis

<b>Abb. 1: Phosphor-Kreislauf.</b> Ohne Destruenten 1-5. Destruenten-Saprophagen-Nahrungskette 6-8. Phosphor- kreislauf - Kompaktlexikon der Biologie (spektrum.de).....	3
<b>Abb. 2: Speicherung von P-Düngern in Agdell Field, Rothamsted Experimental Station 1960 (JOHNSTON et al. 1970),</b> abgeändert.....	6
<b>Abb. 3: Die P-Verfügbarkeit im P-Kreislauf in nicht landwirtschaftlich genutzten Böden. Angaben des P- Flusses in kg ha<sup>-1</sup>.</b> (Modifiziert nach AMELUNG et al. 2018). ....	8
<b>Abb. 4: Schematischer Aufbau einer dreistufigen Kläranlage inklusive der Unterteilung in die integrierte und nachgestellte P-Rückgewinnung.</b> Die P-Schöpfungsquellen sind mit grünen Kreisen markiert. WASSTRIP®- und Pearl®-Verfahren (Crystal Green), Air-Prex®-Verfahren (Berliner Pflanze). Modifiziert nach AMELUNG (2018), KRAUS et al.....	9
<b>Abb. 5: Aufbau des Düngerversuchs in Form einer randomisierten Blockanlage auf 1620 m<sup>2</sup> mit Maisanbau während der Vegetationsperiode 2021:</b> Beispielhafte Darstellung für den Standort K (Darstellung um 180° gedreht). ....	15
<b>Abb. 6: Auszug aus dem Bodenprüfbericht des Standortes Kroll-Fiedler nach der LUFA (FISCHER 2022).</b> .....	16
<b>Abb. 7: Flussdiagramm der sequentiellen P-Extraktion nach TIESSEN &amp; MOIR von 1993,</b> abgeändert. ....	17
<b>Abb. 8: Schema der Phosphorfractionierung von HEDLEY et al. (1982).</b> Modifiziert von TIESSEN & MOIR (1993). ....	19
<b>Abb. 9: Einwiegen der getrockneten und gemahlten Bodenproben auf einer Feinwaage (THO SEETH 2022).</b> .....	20
<b>Abb. 10: Standardreihe</b> Die Extinktion (E) beschreibt das Ergebnis der Messung mit dem Photometer. Die Zahlenwerte geben die Konzentration $c = \text{mg P L}^{-1}$ an (THO SEETH 2022). ....	22
<b>Abb. 11: Extrahierte Proben in Falcons (1), 50 ml Messkolben zum Ansetzen der im Photometer zu messenden Lösungen (2), Pipetten mit dazugehörigen Pipettenspitzen (3) (THO SEETH 2022).</b> .....	25
<b>Abb. 12: Veranschaulichung der Funktion eines Photometers.</b> Die Proben werden mit einer Lichtstärke von 900 nm gemessen. (Chemiemitlicht.uni-wuppertal.de) <a href="https://chemiemitlicht.uni-wuppertal.de/fileadmin/Chemie/chemiemitlicht/images/QR_images/7_3/photometer_schematisch.png">https://chemiemitlicht.uni-wuppertal.de/fileadmin/ Chemie/chemiemitlicht/images/QR_images/7_3/photometer_schematisch.png</a> (zuletzt zugegriffen 03.08.2022). ....	26
<b>Abb. 13: Auszug aus der Auswertung der Extinktionswerte in Hedley IV (THO SEETH 2022).</b> .....	27
<b>Abb. 14: P-Gehalt [ppm] der Fraktion „Hedley I“ (bis Hedley V B) zur Probennahme 02.12.2020 und 26.11.2021 an Standort K bzw. 01.04.2021 und 25.11.2021 an Standort W in Abhängigkeit der Düngevariante und dem Standort;</b> Die Säulen sind unterteilt in die Probennahme vor der Düngung (grün) und nach der Ernte (blau). Die Säulen desselben Prüffaktors mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich statistisch signifikant (Tukey-Test, $\alpha = 0,05$ ). ....	29
<b>Abb. 15: Hedley II P<sub>t</sub></b> .....	29
<b>Abb. 16: Hedley II P<sub>t</sub></b> .....	30



---

<b>Abb. 17: Hedley III Pt.</b> .....	31
<b>Abb. 18: Hedley III Pi.</b> .....	31
<b>Abb. 19: Hedley IV</b> .....	32
<b>Abb. 20: Hedley V Pt.</b> .....	33
<b>Abb. 21: Hedley V B.</b> .....	33
<b>Abb. 22: Z-Verteilung der Düngevarianten aus Hedley I nach der Ernte.</b> F-Statistik = 2,62; Pr > F = 0,0701; AD = AshDec, CG = Crystal Green, OP = ohne P, TSP = Tripelsuperphosphat. ....	34
<b>Abb. 23: Z-Verteilung der Düngevarianten aus Hedley V nach der Ernte.</b> F-Statistik = 0,17; Pr > F = 0,9171; AD = AshDec, CG = Crystal Green, OP = ohne P, TSP = Tripelsuperphosphat. ....	34

# 1 Einleitung

Phosphor (P) stellt für alle Lebewesen ein essenzielles Makronährelement dar. Die Pflanze ist hierbei ein natürliches Brückenglied für P, um in die phytophage Nahrungskette zu gelangen. Dazu wird P in Form von Phosphat aus dem Boden aufgenommen (SCHNUG et al. 2003).

Der P-Bedarf im Ackerbau ist deutlich höher als in seminatürlichen Ökosystemen wie beispielsweise Wäldern. Um nachhaltig hohe Erträge zu erzielen und den Entzug von P durch die Ernte auszugleichen, wird eine zusätzliche P-Quelle benötigt. Angesichts des jetzigen P-Verbrauchs erscheint es naheliegend, dass sich die P-Bilanz in naher Zukunft verschlechtern wird (KOLBE 2016).

Als unverzichtbares Element des Lebens ist P zudem eine endliche natürliche Ressource (PRADT 2003). Zugleich muss auch der Aspekt der Umweltbelastung durch P erwähnt werden (FREDE & BACH 2003). Wenn es zu einer starken Anreicherung von Phosphat im Ökosystem kommt, kann es durch Erosionen zu einer Eutrophierung der Gewässer kommen. Die Eutrophierung zeigt sich durch eine vermehrte Bildung von Algen und Wasserpflanzen in Flüssen und Seen. Zum Schutz der Oberflächengewässer gibt es seit 2020 genaue Vorgaben durch die Düngeverordnung (BOCKHOLT 2020). Diese beinhaltet, dass eine Ausbringung von N- und P-haltigen Substanzen bei gefrorenem Boden untersagt ist. Zusätzlich muss ein Mindestabstand zu Gewässern in Abhängigkeit der Hangneigung, sichergestellt werden (LWK NRW 2020).

Da die abbaubaren Vorkommen des nicht substituierbaren Elements in der Landwirtschaft nach SCHNUG et al. (2003) in absehbarer Zeit knapp werden, ist für eine nachhaltige Nutzung in der Landwirtschaft eine effiziente und verlustfreie Nutzung von P unerlässlich. Dazu zählt die Ausbringung einer bedarfsgerechten Menge von P sowie eine effiziente Ausnutzung der P-Vorräte aus dem Boden. Phosphor liegt in ackerbaulich genutzten Böden überwiegend als Orthophosphat ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) in organischen und anorganischen Bindungen vor. Die anorganischen P-Bindungen ( $\text{P}_i$ ) kommen in neutralen bis alkalischen Böden als Calciumphosphate und Apatit vor. In sauren Böden als Fe- und Al-Phosphat. Die organischen P-Verbindungen ( $\text{P}_o$ ) kommen dagegen in der Biomasse des Bodens und im Humus vor. Nicht nur die effiziente Nutzung der P-Vorräte ist eine Möglichkeit dem P-Verlust vorzubeugen, sondern auch der verhältnismäßig neue Ansatz der Nutzung von P-Recycling-Düngern.

Ziel ist es, die begrenzte Ressource zu schützen und P aus anderen natürlichen Quellen, die als Abfall gelten, zu recyceln. Ein weiteres Kriterium ist die Regionalität. Die Nährstoffe werden aus Kläranlagen in der Umgebung zurückgewonnen. Daher müssen keine Rohphosphate aus den Ländern wie Marokko, Algerien oder Russland importiert werden. Eine direkte Klärschlammnutzung ist nur in der konventionellen Bewirtschaftung und nicht im ökologischen

Landbau genehmigt. Daher stellen die P-Rezyklate aus Klärschlamm eine interessante P-Quelle für den ökologischen Landbau dar.

Die Rezyklate unterscheiden sich in ihrer stofflichen Zusammensetzung durch unterschiedliche Herstellungsverfahren und Ausgangsmaterialien. Dadurch weicht die P-Verfügbarkeit für die Pflanze und die Schadstoffbelastung innerhalb der Fraktionen voneinander ab. Um die Fraktionierung im Oberboden zu ermitteln, wurde die sequentiellen P-Extraktion nach TIESSEN & MOIR (1993) angewandt. Die Messung von Phosphat in den jeweiligen Fraktionen wird mit der Phosphor-Molybdänblau Methode nach MURPHY & RILEYS (1962) durchgeführt.

Mit der sequentiellen P-Extraktion können P-Poole in ihre labilen und refraktären Komponenten unterteilt werden. Dabei wird zwischen löslichem, aluminium-/eisen gebundenem, kalzium gebundenem P und dessen Restformen unterschieden. Es kann jede Fraktion separat auf organische und anorganische Phosphorformen analysiert werden.

Auf Grund der verpflichtenden Klärschlammverordnung (AbfKlärV) sind die Betreiber der Kläranlagen dazu angehalten effiziente Verfahren und Technologien zu entwickeln. Gleichzeitig muss ein Markt geschaffen werden, auf dem es eine regelmäßige Abnahme der Produkte gibt. Deshalb beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit dem Einfluss der verschiedenen P-Düngerarten auf die Zusammensetzung der P-Fraktionen im Oberboden unter Mais. Ziel dieser Arbeit, ist es herauszufinden, inwiefern P-Rezyklate aus Bestandsabfällen wie Klärschlamm zurückgewonnen werden können. Anschließend wird die Verfügbarkeit für die Pflanze und die Unterteilung der Fraktionen im Boden geprüft. Hierfür wird der Anteil des pflanzenverfügbaren und des partiell verfügbaren Ps ermittelt. Dazu wird die Wirksamkeit einer Auswahl entsprechender P-Recycling-Dünger in einem Mais-Feld-Versuch unter den Bedingungen des ökologischen Landbaus untersucht.

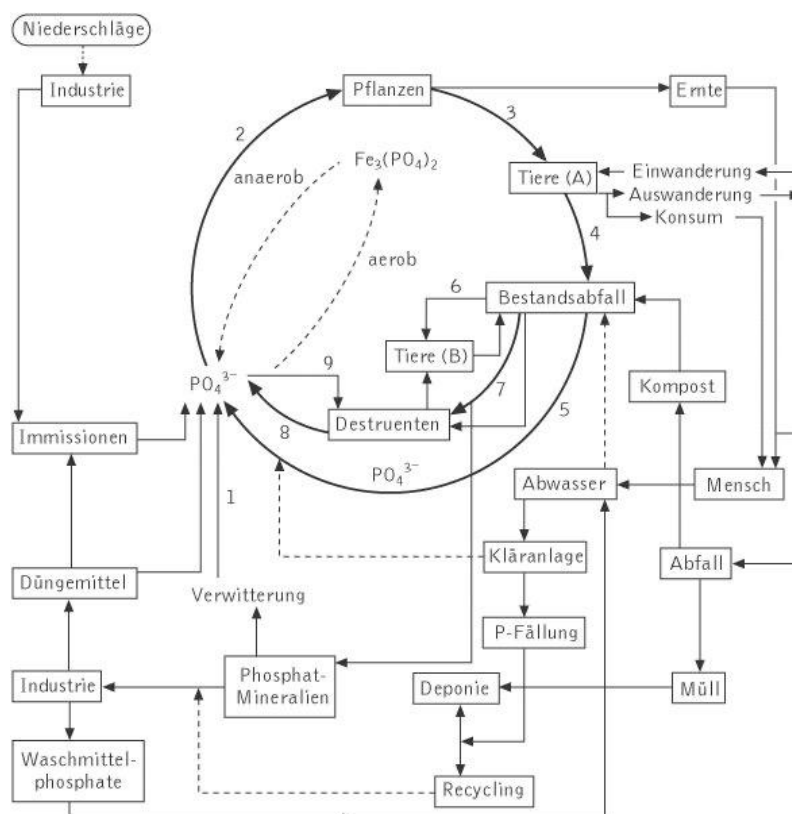
Aus den Ergebnissen der vorangegangenen Durchführung des Feldversuchs und der zuvor dargelegten Relevanz des Einflusses verschiedener P-Düngerarten auf die Zusammensetzung der P-Fraktionen im Oberboden unter Mais, steht folgende Versuchsfrage im Vordergrund:

- Wird durch die Düngung die Zusammensetzung der P-Fraktionen im Boden geändert?

## 2 Literaturübersicht

### 2.1 Der Phosphorkreislauf in der Biosphäre

Der ursprünglich von Mineraldüngern unabhängige Phosphorkreislauf wird mit anhaltender Industrialisierung und Urbanisierung durch die Gesellschaft unterbrochen. Die phosphorhaltigen Ausscheidungen von Menschen und Tieren gehen dem natürlichen P-Kreislauf zum Teil verloren. Diese entstammen phosphorhaltigen Nahrungsmitteln, die sowohl der Mensch als auch das Tier zu sich nehmen. Rückführend bilden die Ausscheidungen Beider die Vollendung des Kreislaufs. Bezogen auf den Menschen, werden nahezu 100% des aufgenommenen Ps durch die Exkremente ausgeschieden (JÖNSSON et al. 2004). Die Installation zentraler Abwasserkanäle führte zum Ausschluss der menschlichen Ausscheidungen (Abb. 1). Somit ist der Kreislauf an dieser Stelle unterbrochen und das P dieser Ausscheidungen ist für die Landwirtschaft nicht mehr nutzbar (Pinnekamp 2002).



**Abb. 1: Phosphor-Kreislauf.** Ohne Destruenten 1-5. Destruenten-Saprophagen-Nahrungskette 6-8. Phosphorkreislauf - Kompaktlexikon der Biologie (spektrum.de)

Phosphor liegt in der Natur nur in der Form von Phosphaten oder in organisch gebundener Form vor. Diese Phosphate stammen beispielsweise aus der Verwitterung von phosphorhaltigem Gestein (Apatit) oder aus phosphorhaltigem Bestandsabfall (POHLING 2015). P unterscheidet sich im Boden vorkommend, in den Formen der Stabilität und der Pflanzenverfügbarkeit. Der im Boden gelöste P ist überwiegend unmittelbar pflanzenverfügbar. Dieser Teil macht jedoch nur 0,1% des Gesamt-P-Gehalts eines Bodens aus (AMELUNG et al. 2018). P wird bei einem

pH-Wert  $> 7$  als Ca-Phosphat fixiert. In einem pH-Bereich  $< 7$  und in tonhaltigen Böden wird P hingegen als Al- bzw. Fe-Phosphat fixiert. P ist im Gegensatz zu Stickstoff (N) nicht mobil im Boden. Die Mobilisierung erfolgt durch die Ausscheidung von Wurzelexsudaten und Mikroorganismen (POHLING 2015).

## 2.2 Phosphor (P) als essentielles Nährelement

Phosphor ist neben sechs Makro- sowie sieben Mikronährstoffen eins der drei wichtigsten Makronährstoffe und ein essentielles Nährelement für den Menschen, das Tier und die Pflanze. Damit ist P essentiell für die Produktion pflanzlicher Rohstoffe und von Nahrungs- sowie Futtermitteln. Die Notwendigkeit des Elementes ist durch folgende Kriterien definiert:

- Das Auftreten von typischen Mangelsymptomen ist durch die Zufuhr des betreffenden Elementes zu beheben.
- Das Element darf nicht durch ein anderes Element vollständig ersetzbar sein.
- Das Element muss mindestens eine Funktion im Stoffwechsel des Menschen oder der Pflanze ausüben (FROSSARD et al. 2016).

Dabei stellt das nicht ersetzbare Element Phosphor eine limitierte Ressource dar, dessen natürliche Quellen in naher Zukunft ausgeschöpft sein werden (WAIDE 2011).

Die Pflanze nimmt vorwiegend Phosphat-Anionen, Dihydrogen- ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) oder Hydrogenphosphat ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ) in gelöster Form aus der Bodenlösung auf. Diese werden enzymatisch als Phosphatester in Biomolekülen gebunden (AMELUNG 2018). Zusätzlich ist P Bestandteil der Phospholipide (P-haltige Lipide) der Zellmembran und des Nucleinsäuren-Rückgrats der DNA- sowie RNA und damit erforderlich für den Zellteilungsprozess. Die Phosphatester des Adenosintriphosphats (ATP) dienen als universeller Energieträger und Regulator für Zellstoffwechsellvorgänge (MEYER & STEINMETZ 2013).

In den gemäßigten Breitengraden liegt der P-Gehalt auf schluffig, tonigen und lehmigen Böden bei 200-800 mg  $\text{kg}^{-1}$  (AMELUNG 2018).

Kommt es zu einem P-Mangel, äußert sich dieser durch eine Wachstumshemmung von Wurzel, Spross und Blatt der Pflanze, sowie durch eine erhöhte Bildung von Anthocyan, vorwiegend in den älteren Blättern. Dies hat eine Rotfärbung der Blätter zur Folge (AMELUNG 2018). Das bedeutet, dass eine bedarfsgerechte und ausreichende Nährstoffversorgung nötig ist, um eine optimale Pflanzenentwicklung zu gewährleisten und um wirtschaftliche Erträge zu erzielen.

### 2.3 Phosphor als Dünger in der Landwirtschaft

Landwirtschaftlich genutzte Böden haben im Vergleich zu naturbelassenen Böden, bezogen auf den P-Kreislauf einen regelmäßigen P-Austrag in Form der Abfuhr der Ernte. Die in landwirtschaftlichen Systemen entstehenden hohen P-Entzüge können durch natürliche Nachlieferungsprozesse in den meisten Fällen nicht gedeckt werden. Dadurch kommt es langfristig zu einer P-Verarmung der Böden (FILIPPELLI 2017). Bei den landwirtschaftlich ungenutzten Böden ist der P-Kreislauf weitestgehend geschlossen und weist vereinzelte Austräge durch Erosionen auf (AMELUNG 2018). In der Landwirtschaft sollen höchstmögliche Erträge pro Fläche sowie die Deckung des jeweiligen Nährstoffbedarfs der Kultur erzielt werden. Sowohl der Ertrags-, als auch der Nährstoffbedarf ist abhängig von den Ansprüchen der Kultur, den Eigenschaften des Bodens, den klimatischen Bedingungen und der Art der Bewirtschaftung (ökologisch oder konventionell). Um eine bedarfsgerechte Düngung ausbringen zu können, muss zu Beginn der Vegetationsperiode der bestehende Nährstoffversorgungsstand des Bodens ermittelt werden. Diese Ermittlung kann mit Hilfe der Calcium-Acetat-Lactat-Methode (CAL-Methode) durchgeführt werden. Hierbei wird durch ein quantitatives Extraktionsverfahren das potentiell zur Verfügung stehende pflanzenverfügbare P im Boden ermittelt (SCHÜLLER 1969). Aus den Ergebnissen der CAL-Methode (angegeben in  $P_2O_5$ ) kann, mit Hilfe der Richtwerte der Gehaltsklassen nach VDLUFA, die Düngeempfehlung errechnet werden (Tab. 1). Dabei wird in fünf Gehaltsklassen (A-E) unterschieden. „A“ steht repräsentativ für eine „sehr niedrige P-Versorgung“ und weist somit eine P-Unterversorgung auf. Eine „sehr hohe P-Versorgung“ und somit eine P-Übersorgung wird durch die Gehaltsklasse „E“ ausgedrückt. In der konventionellen Landwirtschaft wird die Versorgungsstufe „C“ angestrebt, in der eine Erhaltungsdüngung ausgebracht wird. Die Erhaltungsdüngung entspricht der Nährstoffabfuhr vom Feld durch das Erntegut und durch Ernterückstände (VDLUFA 2018). Der ökologische Landbau hingegen strebt die Versorgungsstufe „B“, auf Grund der geringeren Erträge und somit geringeren Abfuhrmengen, an (KOLBE 2010).

**Tab. 1: Gehaltsklassen für Acker- und Grünland nach VDLUFA-NRW.** S = Sand, IS = lehmiger Sand, sU = sandiger Schluff, ssL = stark sandiger Lehm, IU = lehmiger Schluff, sL = sandiger Lehm, uL = schluffiger Lehm, L = Lehm, utl = schluffiger toniger Lehm, tL = toniger Lehm, T = Ton.

Nutzung	Bodenart	Nährstoffgehalt in mg/100 g				
		A sehr niedrig	B niedrig	C anzustreben	D hoch	E sehr hoch
Acker- & Grünland	S, IS, sU, ssL, IU, sL, uL, L utL, tL, T, flachgründiger Sand	bis 3	4 – 9	10 – 18	19 – 32	ab 33
		bis 5	6 – 13	14 – 24	25 – 38	ab 39

Auf Grund der geringen Löslichkeit von P ist sowohl das Auswaschungspotenzial als auch die Verfügbarkeit für die Pflanze vglw. niedrig. Ersteres bedingt, dass es selten zu einer Verunreinigung der Trinkwasservorräte kommt (ROWELL 1994). Den Effekt des geringen Auswaschungspotenzials nutzt die Landwirtschaft, um P als Dünger mit Langzeitwirkung zu nutzen. Im Ersten Jahr nach der Ausbringung ist die Verfügbarkeit von P am höchsten. „Der schnellen Adsorption des Phosphats an Partikeloberflächen folgt eine langsamere Umwandlung in schlecht verfügbare Formen wie mineralische Phosphate“ (ROWELL 1994). Es werden durchschnittlich 10-20% des ausgebrachten Ps im ersten Jahr aufgenommen und der übrige Teil geht im Boden in verschiedene Fraktionen mit unterschiedlicher Pflanzenverfügbarkeit über (FARDEAU 1996). Die Speicherwirkung bei mehrjährigen Kulturen ist nach ROWELL (1994) auf die gleichmäßige Verteilung von P im kompletten Wurzelsystem zurückzuführen. In diesem besteht durch die geringe Auswaschung und die hohe Speicherwirkung eine gleichmäßige Verteilung von P um die Wurzeln. In Abb. 2 wird die Speicherwirkung von P-Düngern graphisch dargestellt.

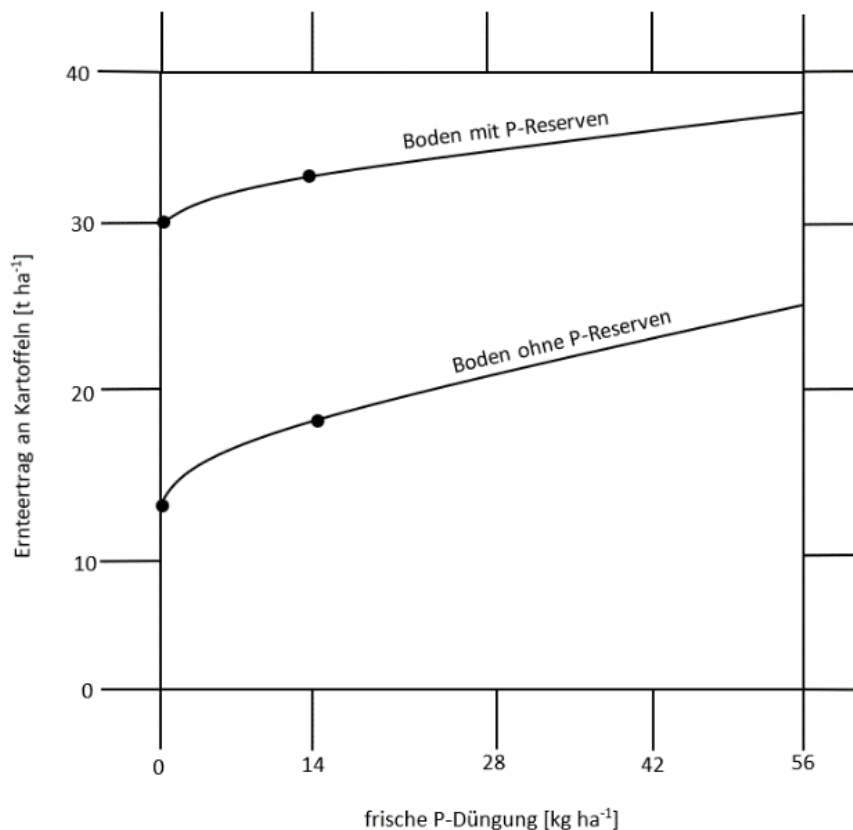


Abb. 2: Speicherung von P-Düngern in Agdell Field, Rothamsted Experimental Station 1960 (JOHNSTON et al. 1970), abgeändert.

Die Ertragsfähigkeit am Beispiel Kartoffeln liegt bei Böden mit P-Reserven deutlich höher und wird mit der Speicherwirkung und der geringen Löslichkeit von frisch ausgebrachtem P begründet. Dieser verteilt sich, bei einer Ausbringung in Form von Granulat, in einem kleinen Bodenvolumen rund um die Granulate (ROWELL 1994).

Ein Großteil der im Ackerbau angebauten Kulturen wird in der Human- und Tierernährung verwendet. Die Nährstoffe aus der Tiernahrung werden über die Nutzung von organischen Düngern auf das Feld zurückgeführt, wohingegen es in der Humanernährung zum Anfall von Klärschlamm kommt. Dieser wird meist thermisch verwertet, oder auf Deponien gelagert. Dabei gehen Nährstoffe verloren und können nicht in die Landwirtschaft zurückgeführt werden.

Der Nährstoffkreislauf zeigt zudem einen Verlust an Phosphat, durch die Abfuhr der Ernte und Erntereste. Einen weiteren P-Austrag stellt der Konsum tierischer Produkte durch den Menschen dar. Für den ökologischen Landbau ist der P-Kreislauf im besonderen Maße relevant. Dadurch, dass Phosphat im Boden nicht mobil ist, profitieren bis heute viele der in Deutschland ökologisch wirtschaftenden Betriebe, welche gemäß der EU-Öko-Verordnung keinen hochlöslichen Mineraldünger, wie TSP verwenden dürfen (EUR-LEX 2021), von den langen Perioden der intensiven P-Düngung der konventionellen Landwirtschaft. Sowohl die Nutzung der Rezyklate als auch die der Bodenreserven spiegeln den Gedankengang des ökologischen Landbaus wider, indem eine Wiederverwendung von bereits genutzten Ressourcen stattfinden soll. Die gleichen Ziele werden mit der Verwendung von Recycling-Düngern verfolgt.

## 2.4 P-Management im Ökolandbau

Der Anteil der ökologisch bewirtschafteten Flächen in Deutschland, hat sich nur im letzten Jahrzehnt um etwa 69% von 941.500 ha im Jahr 2010 auf ca. 1,6 Millionen ha im Jahr 2020 entwickelt. Dieser Anteil entspricht ungefähr 10% der gesamten landwirtschaftlich bewirtschafteten Fläche auf der Welt (DESTATIS 2021). Das System des ökologischen Landbaus beruht auf einem ganzheitlichen Bewirtschaftungskonzept mit nahezu geschlossenen innerbetrieblichen Nährstoffkreisläufen. Dadurch kann weitestgehend auf externe Betriebsmittel verzichtet werden (KOLBE 2016). Im Laufe der Zeit sequestrieren labile Formen des Ps zu stabilen, schwer löslichen und nicht pflanzenverfügbaren Formen (SCHNUG & HANEKLAUS 2016) (Abb. 3). Neben der Düngung wird die Versorgung jedoch auch durch die individuelle evolutionäre Anpassung der Pflanzen beeinflusst. Bei P-Mangel bilden an P-Mangel angepasste Pflanzen vermehrt Wurzelhaare, deren Effizienz bezüglich der Absorbierung von P höher ist als der von Haupt- und Seitenwurzeln (JUNGK & CLAASSEN 1988). Je nach Grad der Verarmungszone, ist eine Ausbildung eines lateralen Wurzelsystems für die Pflanze von Vorteil (RUBIO et al. 2003). Dadurch wird die Wurzeloberfläche und somit die P-Aufnahme vergrößert (POWELL 1974). Zusätzlich führt eine Absonderung von verschiedenen Wurzelexsudaten, die u.a. aus Phosphatasen und organische Säuren bestehen, zu einer Senkung des pH-Wertes und somit zu einer höheren P-Freisetzung aus der festen Bodenphase (DAKORA & PHILLIPS 2001). Auch die Bildung von Symbiosen mit Mykorrhizapilzen an den Wurzeln durch eine erhöhte Aufnahmeoberfläche und durch die Ausscheidung von Phosphatasen durch die Pilze zu einer erhöhten P Aufnahme führen (SMITH & READ 2008).



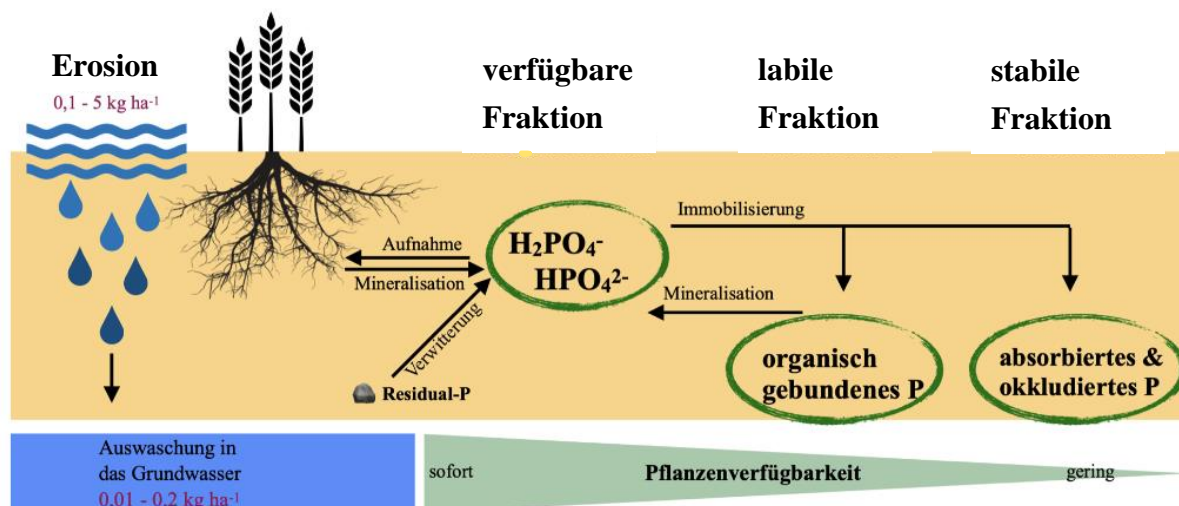


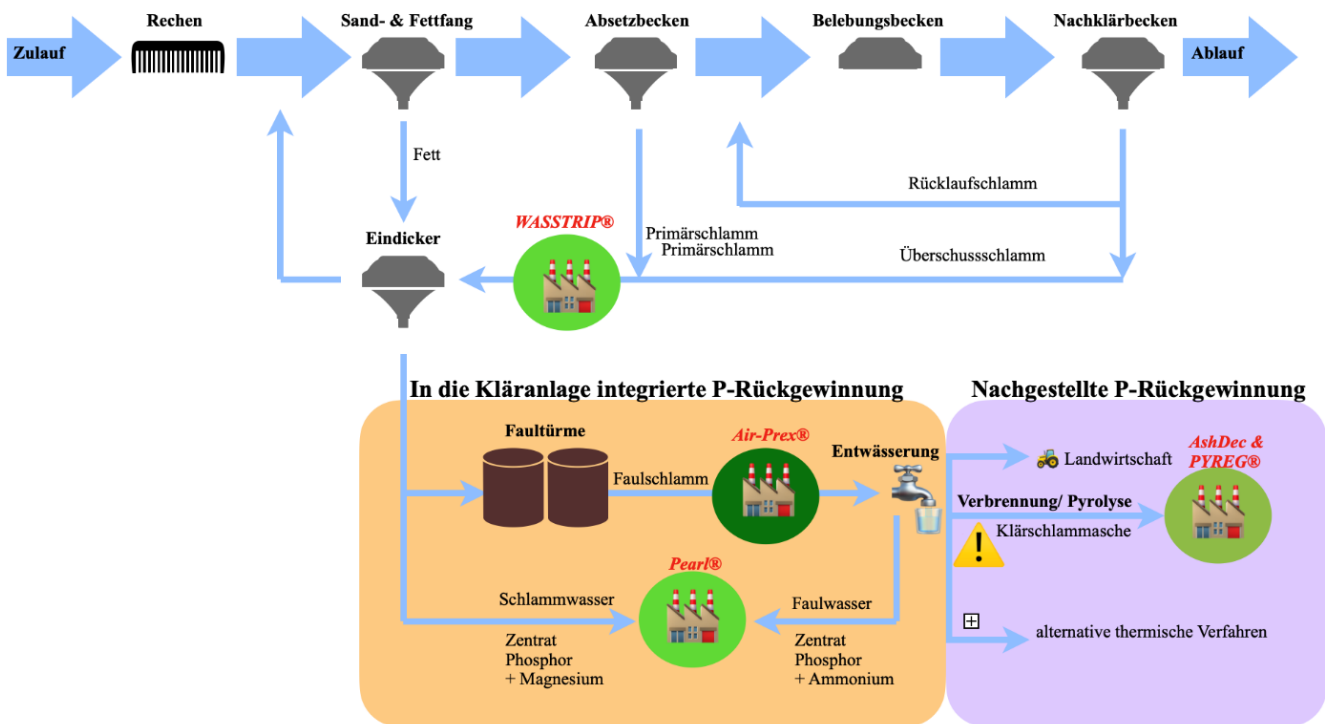
Abb. 3: Die P-Verfügbarkeit im P-Kreislauf in nicht landwirtschaftlich genutzten Böden. Angaben des P-Flusses in kg ha<sup>-1</sup>. (Modifiziert nach AMELUNG et al. 2018).

Nicht nur die Wurzelmorphologie der Pflanze kann zu der P-Verfügbarkeit beitragen. Auch die Wahl der Fruchtfolge ist ein entscheidendes Element auf, das der ökologische Landbau aufbaut. Mit einer effektiven Wahl der Fruchtfolgegestaltung kann es zu einer Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit kommen. Durch den gezielten Anbau von Leguminosen in der Fruchtfolge kann durch die Stickstofffixierung der Knöllchenbakterien, den sogenannten Rhizobien, ein großer Vorrat N für die folgende Kultur bereitgestellt werden. Die Rhizobien können atmosphärischen Stickstoff ( $\text{N}_2$ ) fixieren und für die Pflanze nutzbar machen (JACOB et al. 2022). Des Weiteren unterstützt die Fruchtfolge die Beikrautregulierung und dient der Vorbeugung von Krankheits- und Schädlingsbefall (KOLBE 2008).

Der P-Bedarf einer Pflanze wird durch die P-Aufnahmeeffizienz und nicht, wie oft angenommen, durch die P-Verwertungseffizienz bestimmt. Hierbei bestimmt die Zuflussrate und das Verhältnis von Wurzel und Spross über die Aufnahme (FÖHSE et al. 1988). Ein Beispiel für eine Kultur mit hohen Ansprüchen an die P- bzw. Nährstoffversorgung ist der Mais (*Zea mays*). Dieser wird meist nach mehrjährigen Leguminosen angebaut (DÖRING 2018). Zur Förderung der P-Versorgung können in der Jugendphase der Pflanze auch verschiedene Zwischenfrüchte verwendet werden. Dazu zählen beispielsweise: Buchweizen (*Fagopyrum esulentum*), Phacelia (*Phacelia tanacetifolia*) und Serradella (*Ornithopus sativus*). Diese dienen der P-Mobilisierung im Boden und der Bindung des Ps in der Biomasse. Nach der Einarbeitung der Gründüngung, wird der zuvor mobilisierte P für die Folgefrucht frei und kann eine ähnliche Wirkung wie eine organische Düngung hervorbringen (EICHLER-LÖBERMANN et al. 2008). Den Richtlinien der EU-Öko-Verordnung (EG Nr. 848/ 2018) nach, darf nur eine begrenzte Menge organisches Düngemittel oder Rohphosphat aus externen Quellen verwendet werden. Die organische Düngung besteht dabei primär aus Wirtschaftsdüngern wie Mist, Gülle und Jauche. Hierbei ist eine reine P-Düngung nicht umsetzbar, da Wirtschaftsdünger „Mehrnährstoffdünger“ sind und weitere Nährstoffe wie N und K beinhalten. Diese

Zusammensetzung ist sowohl abhängig von der Tierart, der Fütterung und dem Haltungssystem als auch von der Lagerung (SCHAAF 1998). Wird als P-Quelle mineralische Dünger gewählt, ist die Ausbringung ausschließlich in einer Form von weicherdigem Rohphosphat möglich. Jener ist für die Pflanze bei einem pH-Wert größer 6 kaum verfügbar (STEFFENS et al. 2005).

Um eine wichtige Lücke des P-Kreislaufs zu schließen, wird zunehmend das Verfahren der P-Rückgewinnung aus Klärschlämmen als Alternative praktiziert. Dabei handelt es sich um die Gewinnung von phosphorhaltigen Sekundärrohstoffdüngern aus der Abwasserreinigung (WAIDE 2011). Diese weisen im Vergleich eine geringere Schadstoffbelastung auf. Es werden verschiedene Verfahren zur Gewinnung von P-Recycling-Düngern, im Vergleich zu herkömmlichen Düngemitteln, untersucht. Dabei wird zwischen der integrierten und nachgeschalteten Rückgewinnung in der Kläranlage unterschieden. Das im Folgenden zuerst erläuterte Struvit CG liegt dem integrierten Verfahren zu Grunde. Das im Anschluss besprochene Rezyklat AD entsteht durch das nachgestellte Verfahren (Abb. 4).



**Abb. 4:** Schematischer Aufbau einer dreistufigen Kläranlage inklusive der Unterteilung in die integrierte und nachgestellte P-Rückgewinnung. Die P-Schöpfungsquellen sind mit grünen Kreisen markiert. WASSTRIP®- und Pearl®-Verfahren (Crystal Green), Air-Prex®-Verfahren (Berliner Pflanze). Modifiziert nach AMELUNG (2018), KRAUS et al.

## 2.5 P-Recycling-Dünger

Als eine mögliche Alternative zu herkömmlichen Düngemitteln werden durch verschiedene Verfahren aus Klärschlämmen, Schlachtabfällen und Essenresten P-Recycling-Dünger hergestellt, die auch als P-Rezyklate bezeichnet werden (OHTAKE & TSUNEDA 2019). Eine direkte Ausbringung von Klärschlamm auf landwirtschaftlichen Nutzflächen ist wegen der hohen Arzneimittelbelastung nicht möglich, so das UBA (2018). P-Rezyklate weisen hingegen eine deutlich geringere Belastung an Arzneimitteln als Klärschlämme auf. Auf Grund dessen werden verschiedene Verfahren zur Gewinnung von P-Rezyklaten angewendet. Hierbei liegt der Fokus, nach der neuen Klärschlammverordnung, auf der Rückgewinnung aus Klärschlämmen. Die Klärschlammverordnung sieht vor, dass ab einem Einwohnerwert von 50.000 bzw. 100.000 ab den Jahren 2032 bzw. 2029 die P-Konzentrationen des Klärschlammes um mindestens 50% gesenkt oder auf 20 g P pro kg TM reduziert werden muss (AbfKlärV 2017). Von der Verordnung sind ca. 500 der deutschlandweit aktiven 9.300 Kläranlagen betroffen. Als Voraussetzung zur Etablierung im ökologischen Landbau zählt nicht nur die gesetzliche Zulassung, sondern ebenso die Akzeptanz innerhalb der Landwirtschaft (KRAUS et al. 2019).

Im Folgenden werden die ausgewählte P-Recycling-Düngemittel *Crystal Green*® und *AshDec*® und das jeweilige zugrunde liegende P-Rückgewinnungsverfahren, sowie deren Düngewirkung vorgestellt.

### 2.5.1 Crystal Green

*Crystal Green*® (CG) zählt zu den Mehrnährstoffdüngern auf Struvit-Basis. Die Ausgangssubstanz des Düngers besteht aus den Zentraten des Schlamm- und Faulwassers.

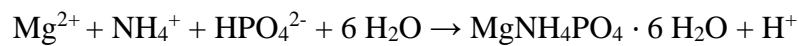
Das zugrunde liegende P-Rückgewinnungsverfahren wird seit 2005 von dem kanadischen Unternehmen Ostara Nutrient Recovery Technologies Inc. praktiziert, vermarktet und basiert auf zwei in den Kläranlagen integrierte Reaktoren. Hergestellt wird der Struvit durch das Kristallisationsverfahren im Haupt- oder Nebenstrom der Kläranlage. Hierfür ist eine biologische P-Eliminierung Voraussetzung.

Dieses Verfahren diente ursprünglich der Vermeidung von verstopften Rohren, sowie aufwendigen und kostspieligen Reinigungen durch Ablagerungen von Struvit in der Kläranlage. Hierzu werden Chemikalien zu dem Schlammwasser aus der Klärschlammmentwässerung gegeben. Als Fällmittel können Calciumchlorid ( $\text{CaCl}_2$ ), Calciumhydroxid ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) oder alternativ Magnesiumchlorid ( $\text{MgCl}_2$ ) verwendet werden. Die P-Rückgewinnungsrate wird durch den anaeroben *Wasstrip*<sup>1</sup>-Reaktor® erhöht. Dazu wird aus dem eingedickten

---

<sup>1</sup> Waste Activated Sludge Stripping to Remove Internal Phosphorus

Überschussschlamm, aus der biologischen Behandlung bzw. der erweiterten biologischen P-Elimination vor der Faulung, eine Rücklösung des mikrobiellen Polyphosphats forciert. Je nach Form des Reaktors ist eine Zufuhr des Abwassers aus der Primärschlamm-Eindickung möglich, um leicht abbaubare Kohlenstoffverbindungen einzubringen und dadurch die Abgabe der Polyphosphate durch Mikroorganismen zu begünstigen. In einem weiteren Schritt wird der Überschussschlamm weiter eingedickt und das Zentrat mit Orthophosphaten abgeleitet. Im Faulturm wird der Überschussschlamm zusammen mit dem Primärschlamm einer Faulung unterzogen, in der Ammonium ausgefällt wird. Das entstehende Zentrat aus der Entwässerung und der Überschussschlamm-Eindickung wird in den zweiten Reaktor, den *Pearl-Reaktor*®, einem Hydrozyklon, geleitet. Hier wird der pH-Wert durch die Zugabe von Natronlauge (NaOH) erhöht. Abhängig vom Fällmittel bilden sich Calcium- oder Magnesiumphosphatverbindungen.



Die sich bildenden orthorhombischen Gittersysteme sinken auf den Boden und können nach Erreichen der gewünschten Größe separiert und getrocknet werden (KRAUS & KRABBE 2017).

Hierbei liegt der Nährstoffprozentatz für Stickstoff bei 5% und von Magnesium bei 10%. Der P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Gehalt beträgt 28% (OSTARA 2016). Die P-Rückgewinnungsrate beträgt 12-22%, bezogen auf den Klärschlamm. Um die Anforderungen der neuen Klärschlammverordnung zu erfüllen, reicht der Prozentatz jedoch nicht aus (VODEGEL & MÜLLER 2017). Das Verfahren wird weltweit in 50 Anlagen durchgeführt. Die größte Anlage befindet sich in Chicago, USA (OSTARA 2016).

Struvite sind im Gegensatz zu anderen Produkten nicht wasserlöslich, sondern werden durch Wurzelexsudate aktiviert. Eine Auswaschung, sowie der Oberflächenabfluss wird dadurch verringert, dass die Nährstoffe P, Mg und N über die gesamte Vegetationsperiode freigesetzt werden, wenn die Pflanze diese benötigt. Trotz dessen, dass CG ein Langzeitdünger ist und dieser einen langen Zeitraum im Boden verweilt, kommt es nicht zu einer Bindung an Fe- und Al-Hydroxiden, wodurch P nicht pflanzenverfügbar ist. Ein weiterer Vorteil des Verfahrens ist die Vermeidung von Struvitablagerungen in den Faulräumen von etwa 90% (OSTARA 2016). Dadurch können die Instandhaltungs- und Betriebskosten gesenkt werden. Des Weiteren wird eine Belastung durch Schwermetalle oder organische Schadstoffe verringert (KRAUS et al. 2019). Die einfache Handhabung der Struvite durch die Form des Granulats, sowie die bereits stattgefundenene Empfehlung (bislang keine finale Verabschiedung) zur Aufnahme in die EU-Öko-Verordnung spricht für das Verfahren (LKW-NRW).

Da die Rückgewinnungsrate noch niedrig ist, gelten die geringen Produktionsmengen als Nachteil. Diese kommen zustande, da das Verfahren nur in Kläranlagen mit biologischer P-Eliminierung einsetzbar ist. Häufig wird ein chemisches Fällungsmittel verwendet.

### 2.5.2 AshDec

Die Herstellung von *AshDec*® basiert auf einer thermischen Behandlung von Klärschlammaschen und anderen phosphatreichen Biomasseaschen. Dazu zählen Hühnerstreu, Gülle und Reste aus der anaeroben Faulung oder aus Schlachtabfällen (HERMANN 2016). Diese Aschen weisen nach der Monoverbrennung neben einem P-Gehalt von 8-13% auch Schadstoffe auf. Zudem ist das vorhandene P kaum pflanzenverfügbar. Um die Verfügbarkeit und die Schadstoffbelastung zu reduzieren, wurde das *AshDec*-Verfahren zur Nachbehandlung der Aschen entwickelt. Dafür wird die Asche mit Additiven wie Ca- oder Mg-chloriden versetzt und in einen Drehrohrofen bei 850-950 °C erhitzt. Durch die Erhitzung geht ein Großteil der Schadstoffe in einen gasförmigen Aggregatzustand über. Durch ein Abgasreinigungssystem werden diese Gase von der Asche getrennt. Übrig bleibt ein Feststoff, indem sich P-Verbindungen wie Mg-Ca- und Mg-phosphate bilden. Diese Verbindungen sind besser verfügbarer als Al-Phosphate (ADAM & KRÜGER 2013).

Das ursprüngliche Verfahren wurde einer Modifikation unterzogen. Im Rahmen des modifizierten Verfahrens werden K- und Na-Salze als Additive verwendet. Diese bilden durch Hitze das pflanzenverfügbare Calcium-Natrium-Phosphat ( $\text{CaNaPO}_4$ ), das auch als Rhenaniaphosphat bezeichnet wird. Im Folgenden wird die Reaktionsgleichung mit dem zuvor schwer pflanzenverfügbaren Whitlockit (kaum verfügbareres P) aus der Asche angegeben.



Der Nährstoffgehalt in der thermisch behandelten Klärschlammasche *AshDec*, beträgt etwa 12% Silizium, 9,6% Calcium, 7,4% Kaliumoxid, 3,5% Schwefel, 1,4% Magnesium, 6,8% Natrium, 5,6% Aluminium und 6,2% Eisen. Der  $\text{P}_2\text{O}_5$ -Gehalt liegt bei 16,7% (HERMANN & SCHAAF 2019). Es wird eine P-Rückgewinnungsrate von > 95% durch das *AshDec*-Verfahren erwartet (VODEGEL & MÜLLER 2017).

Zu den Vorteilen der thermischen Behandlung zählen die langfristige Wirkung sowie die Möglichkeit zur Herstellung großer Aschemengen. Ebenso entspricht es den Anforderungen der Klärschlammverordnung. Jedoch ist die Ausbringung der Asche technisch anspruchsvoll und durch die hohen Temperaturen werden die Pflanzennährstoffe, wie z.B. Stickstoff, vernichtet. Zudem sind die Energiekosten so hoch, dass der aktuelle Marktpreis für die konventionelle Landwirtschaft zum jetzigen Zeitpunkt nicht wirtschaftlich ist (HERMANN 2016).

## 3 Material und Methoden

In diesem Kapitel wird sowohl der Versuchsaufbau an zwei unterschiedlichen Standorten erläutert als auch die Versuchsdurchführung im Labor. Das Ziel der Arbeit besteht darin, die in den Bodenproben enthaltenen P-Fractionen mit Hilfe von zunehmender Extraktionsintensität zu ermitteln.

Das Projekt „Alternative Phosphordüngung (P-Rezyklate) zur Ertragssteigerung von Leguminosen und Getreide im ökologischen Landbau“ (Kurzbezeichnung: „Öko-P“) wird von der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (NRW) in Zusammenarbeit mit der Professur Agrarökologie und Organischer Landbau (AOL) des Instituts für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz im Zeitraum vom 01.03.2020 – 31.10.2022 durchgeführt. Das Ziel des im Rahmen einer Europäischen Innovationspartnerschaft (EIP) durchgeführten Projektes ist es, die Wirksamkeit, sowie die Schadstoffbelastung der P-Rezyklat-Dünger unter den Bedingungen des ökologischen Landbaus zu prüfen (LWK NRW 2020). Im Zuge dessen wurden sowohl vor der Düngung als auch nach der Maisernte Bodenproben aus 0-30cm Oberboden gezogen und wie im weiteren Verlauf beschrieben, analysiert.

### 3.1 Feldversuch

#### 3.1.1 Versuchsstandorte

Die Feldversuche wurden auf drei Praxisbetrieben an unterschiedlichen Standorten in NRW durchgeführt. Auf dem Betrieb „Weber-Berres GbR“ in Warstein-Suttrop, dem Betrieb „Kroll-Fiedler“ in Warstein Belecke und dem Betrieb „Künsemöller“ in Halle (Westfalen). Die Betriebe Weber-Berres GbR (W) und Kroll-Fiedler (K) waren Gegenstand der vorliegenden Untersuchung. Die beiden Betriebe trennt eine Luftlinie von 5,8 km. Sowohl K als auch W werden nach den Richtlinien des Anbauverbandes Bioland e.V. bewirtschaftet. Einige Flächen der zwei Betriebe wiesen zum Zeitpunkt der ersten Probennahme einen P-Mangel auf (LUFA NRW).

Der Milchviehbetrieb Weber-Berres GbR (Standort: 51°27'42"N 8°22'15"O und 364 m über NN) hat den Betrieb 2001 von einer konventionellen Haltung auf ökologische Bewirtschaftung und Tierhaltung nach Bioland-Richtlinien umgestellt. Die 125 ha landwirtschaftliche Nutzfläche sind in Grünland und Ackerland unterteilt und werden zum Anbau von Futter-, Getreide- und Hülsenfruchtkulturen genutzt. Auch die 90 Kühe der Rasse Rotbuntes Niederungsrind werden auf dem Betrieb W durch eigene Futterherstellung versorgt. Der Boden zählt zu einem schluffigen Lehm (Lu) und hat 47 Bodenpunkte. Der Schlag, auf dem der Versuch angelegt wurde, fiel durch Analysen der LUFA in die P-Gehaltsklasse A und zeigte ein hohes P-Nachlieferungspotenzial bei einem durchschnittlichen pH-Wert von 5,3 (Tab. 2).

Der Betrieb Kroll-Fiedler (Standort: 51°30'26"N 8°19'43"O und 318 m über NN) wird seit 1989 nach den Bioland-Richtlinien bewirtschaftet und hält seit über 60 Jahren Milchvieh. Im Jahre 2021 setzte sich der Milchviehbestand aus etwa 80 Kühen der Rasse Rot- und Schwarzbuntes Niederungsrind und deren Kälbern zusammen. Die 85 ha große Nutzfläche teilt sich in Grün- und Ackerland auf. Zusätzlich zu den Futterkulturen werden Backgetreide wie Dinkel, Weizen, Hanf, Schälhafer und Lupinen für den Naturkostmarkt angebaut (Kroll-Fiedler 2021). Der Boden des Standortes K ist an der Versuchsfläche ein schluffiger Lehm (Lu) und weist 42 Bodenpunkte auf. Nach Analysen der LUFA ergab sich eine P-Gehaltsklasse von B. Somit war das P-Nachlieferungspotenzial niedrig bis mittel, bei einem durchschnittlichen pH-Wert von 6,3 (Tab. 2).

**Tab. 2: Blockgenaue und durchschnittliche Bodeneigenschaften der Versuchsstandorte in 30 cm Tiefe (WANTULLA 2022)** bestimmt durch die Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt Nordrhein-Westfalen; Bodenproben vom 02.12.21 (Kroll-Fiedler) und 01.04.22 (Weber);  $N_{\text{gesamt}}$  nach DIN EN 16168, P-Nachlieferungspotenzial nach FLOSSMANN & RICHTER (1982) bestimmt; alle anderen Parameter nach Methodenhandbuch I der VDLUFA (VDLUFA, 1999) bestimmt.

		pH	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> [mg]	K <sub>2</sub> O 100 g <sup>-1</sup>	MgO [Boden]	N <sub>gesamt</sub> [%]	C <sub>org</sub> [%]	C/N	Humus [%]	P- Nachlieferungs- potenzial
Kroll - Fiedler	Block A	6,5	6,6	16,3	7,9	0,2	2	10	3,4	niedrig
	Block B	6,2	7,1	14,3	7,8	0,2	2	11	3,4	mittel
	Block C	6,2	4,1	15,9	7,9	0,2	1,8	9	3,1	mittel
	Block D	6,2	5	16,1	8,4	0,2	2	11	3,4	niedrig
	<b>Mittelwert</b>	<b>6,3</b>	<b>5,7</b>	<b>15,7</b>	<b>8</b>	<b>0,2</b>	<b>2</b>	<b>10</b>	<b>3,3</b>	<b>---</b>
Weber	Block A	5,4	2	3,3	5,6	0,2	2	9	3,4	hoch
	Block B	5,3	2	3,5	5,8	0,2	2	9	3,4	hoch
	Block C	5,2	2	3,1	5,8	0,2	2	9	3,4	hoch
	Block D	5,4	2,4	3,5	5,4	0,3	2,3	9	4	hoch
	<b>Mittelwert</b>	<b>5,3</b>	<b>2,1</b>	<b>3,4</b>	<b>5,7</b>	<b>0,2</b>	<b>2,1</b>	<b>9</b>	<b>3,6</b>	<b>---</b>

### 3.1.2 Versuchsaufbau

Die 30 x 54 m = 1620 m<sup>2</sup> (~ 0,16 ha) große Versuchsfläche, wurde an beiden Standorten, als randomisierte Blockanlage, mit dem Prüffaktor Düngung, auf 3 x 12 m = 36 m<sup>2</sup> großen Parzellen angelegt. Der Schlag war in vier Wiederholungen unterteilt (Block A-D), in denen sich jeweils acht Parzellen nebeneinander befanden. Zwischen den untereinander liegenden Blöcken betrug der Abstand zwei Meter. Links und rechts von den Blöcken befanden sich drei Meter Abstand zum Rand des Ackerschlag (Abb. 5).

54 m									30 m
14 m		14 m		14 m		12 m			
12 m	2 m	12 m	2 m	12 m	2 m	12 m			
Block A		Block B		Block C		Block D		3 m	
Knochenkohle+		Rohphosphat		Triplesuperphosphat		Berliner Pflanze		3 m	
Crystal Green		AshDec		Crystal Green		Pyreg		3 m	
Triplesuperphosphat		Pyreg		Kontrolle		Rohphosphat		3 m	
Berliner Pflanze		Crystal Green		AshDec		Triplesuperphosphat		3 m	
Rohphosphat		Triplesuperphosphat		Knochenkohle+		Kontrolle		3 m	
Kontrolle		Berliner Pflanze		Pyreg		Knochenkohle+		3 m	
Pyreg		Kontrolle		Rohphosphat		AshDec		3 m	
AshDec		Knochenkohle+		Berliner Pflanze		Crystal Green		3 m	
								3 m	

**Abb. 5: Aufbau des Düngerversuchs in Form einer randomisierten Blockanlage auf 1620 m<sup>2</sup> mit Maisanbau während der Vegetationsperiode 2021:** Beispielhafte Darstellung für den Standort K (Darstellung um 180° gedreht).

Die acht Varianten wurden unterteilt in fünf P-Rezyklate und drei Kontrollen. Die P-Rezyklate wurden in Struvite und Ascheprodukte aufgeteilt. Zu den Struviten zählen: „*Crystal Green*“ = CG und „*Berliner Pflanze*“ = BP. Zu den Ascheprodukten zählen: „*Pyreg*“ = PY, „*AshDec*“ = AD und „*KnochenkohlePlus*“ = KK. Als Positivkontrollen wurde eine Parzelle mit Triplesuperphosphat = TSP, eine mit Rohphosphat = RP und als Negativkontrolle eine Parzelle ohne P = P0 gedüngt. In der vorgelegten Arbeit wurden nur die Varianten CG, AD, TSP und die negative Kontrollvariante P0 untersucht.

An beiden Standorten wurde die frühreife Mais-Sorte *Crosbey* des Züchters Deutsche Saatveredelung AG (DSV) mit einer Siloreifezahl von 220 verwendet. Diese weist eine geringe Anfälligkeit für Krankheiten auf.



### 3.1.3 Versuchsdurchführung

Nachdem eine Analyse der parzellengenauen Bodenproben (0-30 cm) (K: 02.12.2020, W: 01.04.2021) durch die Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt Nordrhein-Westfalens (LUFA NRW) stattgefunden hat (Abb. 6) und mit Hilfe der ermittelten Daten die benötigte Düngemenge berechnet wurde, erfolgte die Ausbringung der P-Düngemittel. Die Ausbringung erfolgte sowohl am Standort K (11.05.2021), als auch am Standort W (14.05.2021) händisch. Zusätzlich fand eine Ausbringung von Gärresten ( $2 \text{ kg m}^{-2}$ ) statt. An Standort K wurde Gülle ausgebracht mit einer Zusammensetzung von  $38,89 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ , davon  $18,9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ NH}_4$  und  $15,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}$ . Die Böden der Standorte K und W wurden am 12. bzw. 14.05.2021 mittels Grubber und Kreiselegge bzw. Grubber und Walze für die Aussaat vorbereitet. Am 14.05.2021 erfolgte ebenfalls an beiden Standorten die Aussaat des Mais durch einen Lohnunternehmer mit einer sechsreihigen und pneumatischen Einzelkornsämaschine. Das Unkrautmanagement erfolgte nach Notwendigkeit und variiert sowohl zwischen dem händischen oder maschinellen Hacken als auch dem maschinellen Striegeln. Abschließend wurden erneut Bodenproben gezogen. An Standort K am 26.11.2021 und an Standort W am 25.11.2021. Die Bodenproben wurden in einem Trockenschrank bei  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  getrocknet und vermahlen. Die fertigen Bodenproben kamen anschließend in das Labor der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn mit der Anschrift: Auf dem Hügel 6 53121 Bonn. Dort wurde eine Laboranalyse durchgeführt.

#### Kroll-Fiedler

##### Standort

FF1: Fruchtfolgeversuch 1 (Kleegras)

FF2: Fruchtfolgeversuch 2 (Mais)

<b>Korngrößenverteilung</b>	<b>%</b>
%Ton (<0,002 mm)	27,1
%Schluff (0,002 - 0,063 mm)	59
%Sand (0,063 - 2,0 mm)	10



schluffiger Lehm (Lu)

<b>Schwermetalle (mg/kg TS)</b>	<b>Grenzwert BBodSchG (Lehm)</b>	<b>Fläche</b>
Kupfer	40	9
Zink	150	76
Blei	70	33
Cadmium	1	0,48
Chrom	60	24
Nickel	50	16
Quecksilber	0,5	0,07

Abb. 6: Auszug aus dem Bodenprüfbericht des Standortes Kroll-Fiedler nach der LUFA (FISCHER 2022).

## 3.2 Sequentielle P-Extraktion

### 3.2.1 Laboranalyse

Das Ziel der Laboranalyse war es, die P-Dynamik im Boden zu ermitteln. Die Zusammensetzung der P-Fraktion kann sich, in Abhängigkeit des Ausgangsgesteins und des pH-Wertes innerhalb von kurzer Zeit deutlich verändern. Die P-Fraktionierung aus dem Oberboden wurde basierend auf der sequentiellen P-Extraktion nach TIESSEN & MOIR (1993) durchgeführt (Abb. 7).

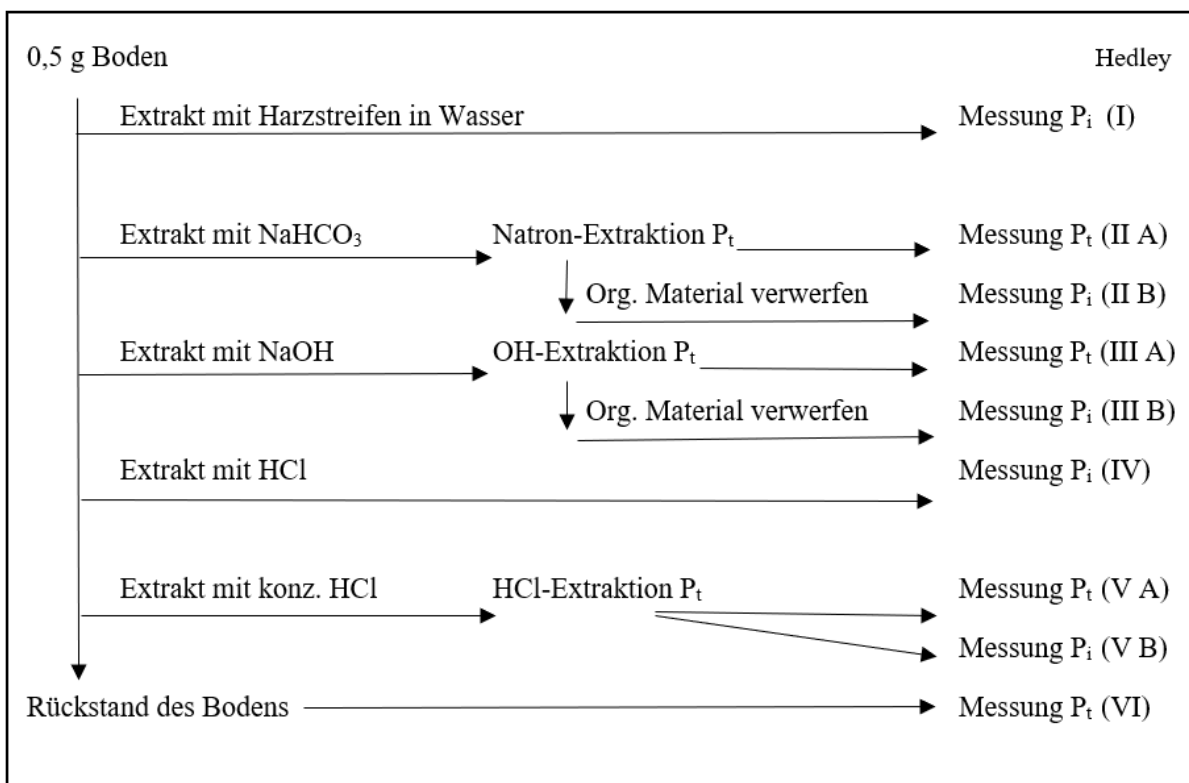


Abb. 7: Flussdiagramm der sequentiellen P-Extraktion nach TIESSEN & MOIR von 1993, abgeändert.

Das Phosphat in den jeweiligen Fraktionen wird gemäß den Messungen von MURPHY & RILEYS (1962), nach der Phosphor-Molybdänblau Methode ermittelt. Für die Messungen wird das Prinzip der photometrischen Messung, des blauen Farbstoffs, bei 900 nm genutzt. Der blaue Komplex (Molybdänblau) entsteht aus Orthophosphat Ionen, die mit Molybdat und Ascorbinsäure reagieren. Kaliumantimonyltartrat dient als Katalysator. Dieser kann die Reaktionsgeschwindigkeit einer chemischen Reaktion erhöhen. Dies geschieht durch die Senkung der energetischen Barriere, genannt Aktivierungsenergie. Der Katalysator verbraucht sich dabei nicht selbst. Für die Durchführung der sequentiellen P-Extraktion, wurden Anionenaustauscherharzstreifen und fünf Lösungen hergestellt.

### 3.2.2 Herstellung der Lösungen für die Extraktion

Es wurden fünf Lösungen für die Extraktion hergestellt: 0,5 M Salzsäure (HCl), 0,5 M Natriumhydrogencarbonat (NaHCO<sub>3</sub>) mit einem pH-Wert von 8,5, 5 M Natriumhydroxid (NaOH), 0,1 M NaOH und 1 M HCl.

Für die 0,5 M HCl-Lösung wurden in einem 2 Liter Messkolben 88,5 ml konzentrierte Salzsäure (HCl) in 1,5 Liter vorgelegtes Millipore gegeben und auf 2 Liter mit Millipore aufgefüllt. Um die 0,5 M NaHCO<sub>3</sub>-Lösung herzustellen, wurde 84 g NaHCO<sub>3</sub> und 1,4 g NaOH in einem 2 Liter Messkolben mit 1,5 Liter Millipore unter Rühren zusammengegeben und gelöst. Der pH-Wert wurde, unter Rühren, von ca. 8,3 durch eine tropfenweise Zugabe von 5 M NaOH auf 8,5 erhöht. Aus 40 g NaOH-Pellets, die in einem  $\geq 200$  ml Becherglas unter Rühren in 150 ml Millipore aufgelöst und nach dem Abkühlen auf 200 ml aufgefüllt wurden, wurde 5 M NaOH hergestellt. 0,1 M NaOH wurde hergestellt, indem in einen 2 Liter Messkolben 8 g NaOH unter Rühren in 1,7 Liter Millipore gegeben und gelöst worden ist. Danach mit Millipore auf 2 Liter aufgefüllt. Zum Schluss wurde für 1 M HCl in einem 2 Liter Messkolben 177 ml konzentrierte Salzsäure mit 1,5 Liter Millipore verdünnt und danach auf 2 Liter aufgefüllt.

### 3.2.3 Herstellung der Anionenaustauscherharzstreifen

Mit Hilfe von Anionenaustauschern, wurden die sich in der Lösung (Hedley I) befindenden P-Ionen separiert. Hier handelt es sich um frei austauschbares Phosphat. Die in 9 x 62 mm große Streifen geschnittenen Anionenaustauscherharzstreifen wurden regeneriert und konditioniert. Zur Regenerierung der Streifen, wurden diese drei Tage, unter genauer Stundendokumentation, in 0,5 M HCl eingelegt. Für ein gleichmäßiges Ergebnis hat die Regenerierung in einem Braunglas auf der Schüttelplatte stattgefunden. In den drei Tagen wurde die HCl-Lösung sechs Mal gewechselt. Für die Konditionierung wurden die Streifen weitere drei Tage, unter Schütteln, in 0,5 M NaHCO<sub>3</sub>, bei einem pH-Wert von 8,5 gebadet. Hierbei gilt: Stunden Regenerierung = Stunden Konditionierung. Zuletzt wurden die Streifen drei Mal in Folge mit Millipore gespült und in Millipore für die weitere Verwendung gelagert. Der zeitliche Ablauf wird in Tab. 3 dargestellt.

**Tab. 3: Schema zur Herstellung der Anionenaustauscherharzstreifen** HCl = Salzsäure, NaHCO<sub>3</sub> = Natriumhydrogencarbonat.

Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag
<b>9 Uhr</b> In HCl geben	9 Uhr HCl wechseln	9 Uhr HCl wechseln	9 Uhr In NaHCO <sub>3</sub> geben	9 Uhr In NaHCO <sub>3</sub> geben
<b>13 Uhr</b> HCl wechseln	13 Uhr HCl wechseln	13 Uhr In NaHCO <sub>3</sub> geben	13 Uhr In NaHCO <sub>3</sub> geben	13 Uhr In NaHCO <sub>3</sub> geben
<b>17 Uhr</b> HCl wechseln	17 Uhr HCl wechseln	17 Uhr In NaHCO <sub>3</sub> geben	17 Uhr In NaHCO <sub>3</sub> geben	17 Uhr Mit Millipore spülen

### 3.2.4 Durchführung der sequenziellen P-Extraktion

Die sequentielle P-Extraktion besteht aus sechs Schritten, mit den dazugehörigen Fraktionen. Die erste Fraktion des frei austauschbaren  $P_i$  wurde mit Anionenaustauscherharzstreifen extrahiert. Mit 0,5 M  $\text{NaHCO}_3$  wurde die Fraktion des schwach absorbierten Phosphats extrahiert. Hier wurde zwischen dem pflanzenverfügbaren  $P_i$  und dem pflanzenverfügbaren  $P_o$  unterschieden. Die labile P-Fraktion wurde mit 0,1 M  $\text{NaOH}$  extrahiert. Hier waren  $P_i$  und  $P_o$  mäßig verfügbar für die Pflanze. Die vierte Fraktion bestand aus säurelöslichem P und wurde mit 1 M  $\text{HCl}$  extrahiert. Dabei war  $P_i$  stabil an Calcium gebunden. Mit konzentrierter  $\text{HCl}$  wurde stabiles  $P_i$  und  $P_o$ , welches an Fe- und Al-Hydroxide gebunden war extrahiert und das im Boden für die Pflanze nicht verfügbare P wurde frei (Abb. 8).

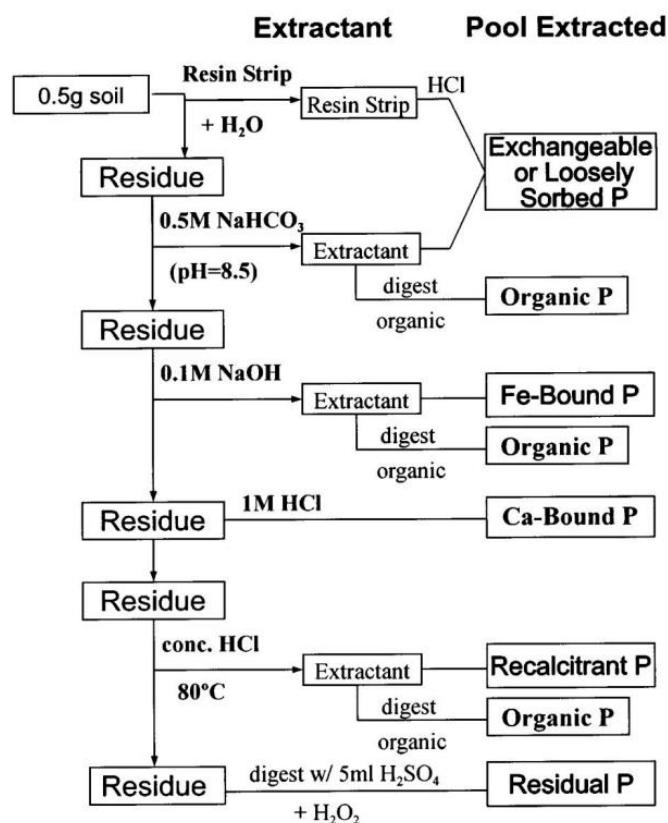


Abb. 8: Schema der Phosphorfraktionierung von HEDLEY et al. (1982). Modifiziert von TIESSEN & MOIR (1993).

Von jeder Probe wurden Doppelbestimmungen gemacht, welche mit „a“ und „b“ gekennzeichnet waren. Es wurden 0,5 g der getrockneten Bodenprobe der verschiedenen Standorte in ein 50 ml Falcon eingewogen (Abb. 9) und anschließend 30 ml Millipore zugegeben. Zu jeder Probe wurden zwei Anionenaustauscherharzstreifen hinzugefügt. Die Falcons wurden verschlossen und für 16 Stunden auf dem Überkopfschüttler geschüttelt (Tab. 4). Zusätzlich wurden zwei Blankwerte zur Kontrolle der Anionenaustauscherharzstreifen erstellt, die das gleiche Verfahren ohne Bodenprobe durchlaufen. Nach 16 Stunden wurden die Harzstreifen entnommen, mit Millipore abgespült und in 20 ml 0,5 M  $\text{HCl}$  (Hedley I) gegeben. So wurde  $P_i$  (am leichtesten bioverfügbarer P) bestimmt. Die Lösung wurde in der Zentrifuge

für 20 Minuten bei 20 °C zentrifugiert. Der Überstand wurde verworfen, mit 30 ml 0,5 M NaHCO<sub>3</sub> (Hedley II) aufgefüllt und für 16 Stunden auf dem Überkopfschüttler (30 rpm) geschüttelt und danach zentrifugiert. Danach wurde der Überstand gefiltert und P<sub>i</sub> (leicht pflanzenverfügbarer an Eisen (Fe) und Aluminium (Al) gebundener P) und P<sub>t</sub> wurden bestimmt. Im nächsten Extraktionsschritt wurde der Lösung 30 ml 0,5 M NaOH (Hedley III) zugefügt. Anschließend wurde die Lösung 16 Stunden geschüttelt und anschließend zentrifugiert. Erneut wurde der Überstand gefiltert und P<sub>i</sub> (mittelmäßig pflanzenverfügbarer, stärker an Fe- und Al-gebundener P) wurde bestimmt. Im nächsten Schritt wurden der Lösung 30 ml 1 M HCl (Hedley IV) hinzugefügt. Nach 16 Stunden schütteln und erneutem Zentrifugieren wurde die Lösung gefiltert. Anschließend wurde P<sub>i</sub> (an Calcium gebundener P mit geringer Verfügbarkeit) gemessen. Im weiteren Verlauf wurde der überschüssige Boden mit 10 ml konzentrierter HCl (Hedley V) verrührt. Anschließend im Wasserbad für 10 Minuten bei 80 °C erhitzt, unter ständigem Rühren auf Raumtemperatur abgekühlt und zentrifugiert. Der Überstand wurde dekantiert. Die jeweiligen Überstände wurden fusioniert und der darin enthaltende P<sub>i</sub>- (sehr stabiler Fe- gebundener P) und P<sub>t</sub>-Gehalt ermittelt. Im Folgenden Schritt wäre eine Analyse der Hedley VI vorgenommen worden. Diese wurde auf Grund von technischen Problemen nicht durchgeführt. Theoretisch wäre der Boden über Nacht im Trockenschrank bei 50 °C getrocknet und in Aufschlussgläser eingewogen worden. Dieses wäre mit 7 ml H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> versetzt worden. Im letzten Schritt wären dem Boden 10,5 ml HCl und 3,5 ml HNO<sub>3</sub> hinzugefügt worden. Die Lösung wäre aufgeschüttelt, in die Gerhardt-Apparatur gestellt, bei 360 °C aufgeschlossen und gefiltert worden. Zuletzt hätte P<sub>i</sub> (sehr stabiler und eingeschlossener P) bestimmt werden können. Hedley VI beschreibt die residuale P-Fraktion im Boden. Diese bildet den Rückstand im Boden und ist nicht verfügbar.



Abb. 9: Einwiegen der getrockneten und gemahlten Bodenproben auf einer Feinwaage (THO SEETH 2022).

Die gesamte Sequenzielle P-Extraktion dauerte zwei Wochen (Tab. 4). Danach erfolgte die photometrische Messung der Proben.

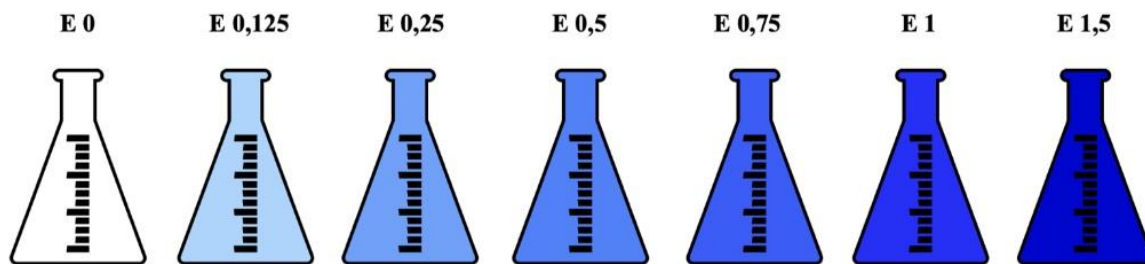
Tab. 4: Ablaufschema der Sequenziellen P-Extraktion.

WOCHE 1:				
Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag
Vormittags				
	9 Uhr	9 Uhr	9 Uhr	9 Uhr
<p><b>Falcon 1 (50 ml):</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ + 0,5 g Boden einwiegen</li> </ul>	<p><b>Falcon 2:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ + Harzstreifen aus Falcon 1</li> <li>(Boden mit Millipore in F1 zurücksülen)</li> <li>▶ + 20 ml 0,5 M HCl</li> <li>▶ + 1 h geöffnet stehen lassen</li> <li>▶ Falcon verschließen</li> </ul> <p><b>Falcon 1:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Zentrifugieren (2500 xg, 20 min, 20 °C)</li> <li>▶ Überstand verwerfen</li> </ul>	<p><b>Falcon 2:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Harzstreifen entfernen (mit Millipore gespült in Braunglas)</li> <li>▶ <b>P messen (Hedley I)</b></li> </ul> <p><b>Falcon 1:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Zentrifugieren (2500 xg, 20 min, 20 °C)</li> <li>▶ Überstand durch Filter (MN640 m, Ø125 mm) in Falcon 3 dekantieren</li> </ul> <p><b>Falcon 3:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ <b>P messen (Hedley II)</b></li> </ul>	<p><b>Falcon 1:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Zentrifugieren (2500 xg, 20 min, 20 °C)</li> <li>▶ Überstand durch Filter in Falcon 4 dekantieren</li> </ul> <p><b>Falcon 4:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ <b>P messen (Hedley III)</b></li> </ul>	<p><b>Falcon 1:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Zentrifugieren (2500 xg, 20 min, 20 °C)</li> <li>▶ Überstand durch Filter in Falcon 5 dekantieren</li> <li>▶ Boden in Trockenschrank bei 50 °C</li> </ul> <p><b>Falcon 5:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ <b>P messen (Hedley IV)</b></li> </ul>
Nachmittags				
17 Uhr	17 Uhr	17 Uhr	17 Uhr	
<p><b>Falcon 1:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ + 30 ml Millipore</li> <li>▶ + 2 Harzstreifen</li> <li>▶ 16 h Überkopfschüttler</li> </ul>	<p><b>Falcon 1:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ + 30 ml 0,5 M NaHCO<sub>3</sub></li> <li>▶ Boden resuspendieren</li> </ul> <p><b>Falcon 1 und 2:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 16 h Überkopfschüttler</li> </ul>	<p><b>Falcon 1:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ + 30 ml 0,1 M NaOH</li> <li>▶ 16 h Überkopfschüttler</li> </ul>	<p><b>Falcon 1:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ + 30 ml 1 M HCl</li> <li>▶ 16 h Überkopfschüttler</li> </ul>	<p><b>Falcon 1:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ aus Trockenschrank und verschließen</li> </ul>
WOCHE 2:				
Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag
<p><b>Falcon 1:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ + 10 ml konz. HCl, vortexen</li> <li>▶ Deckel lösen</li> <li>▶ in Wasserbad auf 80 °C erhitzen</li> <li>▶ 10 min bei 80 °C kochen</li> <li>▶ aus Wasserbad nehmen</li> <li>▶ + 5 ml konz. HCl, vortexen</li> <li>▶ 1 h auf Raumtemp. kühlen</li> <li>▶ Zentrifugieren</li> <li>▶ Überstand in 50 ml Messkolben geben</li> <li>▶ Boden 2x behandeln: <ul style="list-style-type: none"> <li>- + 10 ml Millipore vortexen</li> <li>- zentrifugieren (5 min)</li> <li>- Überstand in Messkolben</li> </ul> </li> <li>▶ Rückstand in Trockenschrank trocknen</li> </ul> <p><b>50 ml Messkolben:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ mit Millipore auffüllen</li> <li>▶ filtern</li> <li>▶ <b>P messen (Hedley V)</b></li> </ul>	<p><b>Falcon 1:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Rückstand in Aufschlussgläser einwiegen</li> <li>▶ + 7 ml H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> aufschütteln</li> </ul>	<p><b>Aufschlussgläser:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ + 10,5 ml HCl</li> <li>▶ + 3,5 ml HNO<sub>3</sub></li> <li>▶ 6 h in Gerhardt-Apparatur</li> </ul>	<p><b>Aufschlussgläser:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ In 100 ml Messkolben überführen</li> <li>▶ Aufschlussgläser mehrfach mit Millipore spülen</li> <li>▶ auf 100 ml auffüllen</li> <li>▶ filtern</li> <li>▶ <b>P messen (Hedley VI)</b></li> </ul>	

## 3.3 Photometrische Messung

### 3.3.1 Herstellung der Standards

Die sieben Standards (Abb. 10) wurde als eine Referenzmenge angesetzt. Dabei steigt die Intensität der Blaufärbung im Idealfall linear. Zusätzlich wurde die Steigungsgerade zur Berechnung der P-Prozent-Gehalte der Folgenden Auswertung benötigt.



**Abb. 10: Standardreihe** Die Extinktion (E) beschreibt das Ergebnis der Messung mit dem Photometer. Die Zahlenwerte geben die Konzentration  $c = \text{mg P L}^{-1}$  an (THO SEETH 2022).

Es wurden fünf Lösungen zur Bestimmung von P in den Bodenproben hergestellt.

Für die Standard-Phosphat-Maßlösung:  $c(\text{P}) = 1000 \text{ mg L}^{-1}$  wurden in einen 250 ml Messkolben 1,0985 g Kaliumhydrogenphosphat und 200 ml Millipore geben. Nachdem die Lösung gut durchmischt war, wurde diese auf 250 ml aufgefüllt. Um eine 5 M Schwefelsäure ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) herzustellen, wurden in einen 1000 ml Messkolben 140 ml konzentrierte  $\text{H}_2\text{SO}_4$  und 600 ml Millipore langsam zusammengegeben. Nach dem Abkühlen wurde die Lösung auf 1000 ml aufgefüllt. Das Molybdat-Reagenz besteht aus 40 g Ammoniummolybdat und 1000 ml Millipore. Die Lösung wird 20 Minuten bei  $60^\circ\text{C}$  auf einem Magnetrührer gerührt, bis die trübe Lösung klar wurde. Zur Herstellung von Antimon-Reagenz wurde 0,2743 g Kaliumantimon(III)oxidtartrate in einem 100 ml Messkolben mit 40 ml Millipore gelöst. Die Lösung wurde geschüttelt, bis sich das Pulver gelöst hat und anschließend auf 100 ml aufgefüllt. Die P-Blau-Lösung, welche zur Blaufärbung für die folgende photometrische Messung diente bestand aus 1000 ml 5 M  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 300 ml Molybdat-Reagenz und 100 ml Antimon-Reagenz.

### 3.3.2 Bestimmung von $\text{P}_i$ in den Extrakten

Es muss beachtet werden, dass die Standards exakt so gehandhabt werden müssen, wie die Proben. Das heißt, es wird das gleiche Volumen der Extraktionslösung verwendet, wie beim ansetzen der zu messenden Probenlösungen der Proben.

Um  $\text{P}_i$  zu bestimmen, wurden alle Proben am Photometer bei 900 nm gemessen.

### 3.3.2.1 Bestimmung von $P_i$ in Hedley I (0,5 M HCl)

Tab. 5: Schema zum Ansetzen der Standards zur Bestimmung von  $P_i$  in den Hedleys I (bis V).

Standard mg L <sup>-1</sup>	Extraktionslösung 0,5 M HCl (ml)	Maßlösung ( $\mu$ l)	Mischung P-Blau und Ascorbinsäure (ml)	Millipore
0	} 10 }	0	} 8 }	auf 50ml auffüllen
0,125		6,25		
0,25		12,5		
0,5		25		
0,75		37,5		
1		50		
1,5		75		

Für die Probe wurde in einen 50 ml Messkolben 10 ml Probenlösung pipettiert. Dazu wurde 8 ml P-Blau-Lösung gegeben und mit Millipore auf 50 ml aufgefüllt. Die geschüttelte Probe wurde verschlossen 60 Minuten stehengelassen. Anschließend erfolgte die Messung mit dem Photometer.

### 3.3.2.2 Bestimmung von $P_i$ in Hedley II (0,5 M NaHCO<sub>3</sub>)

Tab. 6: Hedley II HCl = Salzsäure, NaHCO<sub>3</sub> = Natriumhydrogencarbonat.

Standard mg L <sup>-1</sup>	Extraktionslösung 0,5 M NaHCO <sub>3</sub> (ml)	1 M HCl (ml)	Maßlösung ( $\mu$ l)	Mischung P-Blau und Ascorbinsäure (ml)	Millipore
0	} 5 }	} 5 }	0	} 8 }	auf 50ml auffüllen
0,125			6,25		
0,25			12,5		
0,5			25		
0,75			37,5		
1			50		
1,5			75		

Es wurden 5 ml Probe und 5 ml 1 M HCl in einen 50 ml Messkolben pipettiert und über Nacht stehengelassen. Am nächsten Tag wurde zu der Probe und den Standards jeweils 8 ml P-Blau gegeben und der Messkolben mit Millipore aufgefüllt. Bis zur Messung wurde die Lösung 60 Minuten verschlossen stehen gelassen.



### 3.3.3.3 Bestimmung von $P_i$ in Hedley III (0,1 M NaOH)

**Tab. 7: Hedley III** HCl = Salzsäure, NaOH = Natriumhydroxid.

Standard mg L <sup>-1</sup>	Extraktionslösung 0,1 NaOH (ml)	1 M HCl (ml)	Maßlösung ( $\mu$ l)	Mischung P-Blau und Ascorbinsäure (ml)	Millipore
0	5	3	0	8	auf 50ml auffüllen
0,125			6,25		
0,25			12,5		
0,5			25		
0,75			37,5		
1			50		
1,5			75		

Um das  $P_i$  in Hedley III zu messen, wurden in einen 50 ml Messkolben 5 ml Probe, 3 ml 1 M HCl und 8 ml P-Blau pipettiert. Anschließend wurde der Messkolben auf 50 ml aufgefüllt und bis zu der photometrischen Messung 60 Minuten stehen gelassen.

### 3.3.3.4 Bestimmung von $P_i$ in Hedley IV (1 M HCl)

**Tab. 8: Hedley IV** HCl = Salzsäure.

Standard mg L <sup>-1</sup>	Extraktionslösung 1 M HCl (ml)	Maßlösung ( $\mu$ l)	Mischung P-Blau und Ascorbinsäure (ml)	Millipore
0	5	0	8	auf 50ml auffüllen
0,125		6,25		
0,25		12,5		
0,5		25		
0,75		37,5		
1		50		
1,5		75		

5 ml Probe und 8 ml P-Blau wurden in einen 50 ml Messkolben pipettiert, um  $P_i$  in Hedley IV zu bestimmen. Die Lösung wurde mit Millipore auf 50 ml aufgefüllt, bevor diese 60 Minuten stehengelassen wurde.

### 3.3.3.5 Bestimmung von $P_i$ in Hedley V konzentrierter HCl

Für die Extraktionslösung aus Hedley V wurden 15 ml konzentrierte HCl (37%) in 35 ml Millipore verdünnt.

**Tab. 9: Hedley V NaOH = Natriumhydroxid.**

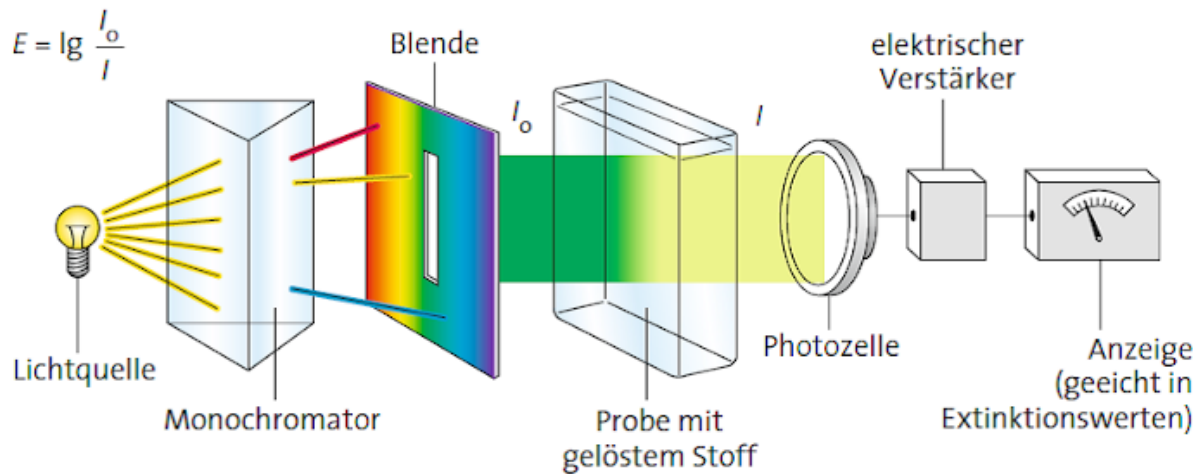
Standard mg L <sup>-1</sup>	Extraktionslösung (ml)	5 M NaOH (ml)	Maßlösung ( $\mu$ l)	Mischung P-Blau und Ascorbinsäure (ml)	Millipore
0	} 2 }	} 2 }	0	} 8 }	auf 50ml auffüllen
0,125			6,25		
0,25			12,5		
0,5			25		
0,75			37,5		
1			50		
1,5			75		

Für die letzte Probe wurden 2 ml Probe und 8 ml P-Blau in einen 50 ml Messkolben pipettiert, aufgefüllt und 60 Minuten stehengelassen.



**Abb. 11: Extrahierte Proben in Falcons (1), 50 ml Messkolben zum Ansetzen der im Photometer zu messenden Lösungen (2), Pipetten mit dazugehörigen Pipettenspitzen (3) (THO SEETH 2022).**

Für jede Messung wurde das Photometer (Perkin Elmer, Lambda 35) genutzt, um die „Blaufärbung“ der Probe genau zu ermitteln (Abb. 12). Anschließend wurden die Extinktionswerte in P% umgerechnet.



**Abb. 12: Veranschaulichung der Funktion eines Photometers.** Die Proben werden mit einer Lichtstärke von 900 nm gemessen. (Chemiemitlicht.uni-wuppertal.de) [https://chemiemitlicht.uni-wuppertal.de/fileadmin/Chemie/chemiemitlicht/images/QR\\_images/7\\_3/photometer\\_schematisch.png](https://chemiemitlicht.uni-wuppertal.de/fileadmin/Chemie/chemiemitlicht/images/QR_images/7_3/photometer_schematisch.png) (zuletzt zugegriffen 03.08.2022).

### 3.3.3 Berechnung der Extinktionswerte

Die Messwerte, die durch das Photometer ermittelt wurden, wurden mit Excel® (Microsoft) verarbeitet. Zuerst wurde eine Steigungsgerade mit den Werten der sechs Standards angelegt (Der Wert von E1,5 wurde vernachlässigt, da ein zu großer Abstand zwischen E1 und E1,5 lag). Dabei wurde der Extinktionswert (y-Achse) in Abhängigkeit von P in  $\text{mg L}^{-1}$  (x-Achse) graphisch dargestellt. Aus der Geraden ergab sich eine Steigungsformel  $y = m \cdot x + n$  ( $y = 0,7257x + 0,0072$ ). Diese wurde nach x umgestellt ( $x = \frac{y - 0,0072}{0,7257}$ ). Der Regressionswert ( $R^2$ ) lag möglichst nahe bei einem Wert von 1 ( $R^2 = 0,9996$ ). Als Ziel galt es aus den gemessenen Extinktionswerten den P-Gehalt in Prozent zu berechnen (Abb. 13). Die Beispielrechnungen beziehen sich auf die Probe P445, KF, CG, 58a und -b. Um den P-Gehalt in  $\text{mg L}^{-1}$  zu ermitteln, wurde der Extinktionswert (E) für y in die umgestellte Steigungsformel eingesetzt ( $x = \frac{0,078 - 0,0072}{0,7257} \Leftrightarrow x = 0,06808 \text{ mg P L}^{-1}$ ). Da mit 50 ml Messkolben gearbeitet wurde, musste der Wert von einem Liter (1000 ml) in 50 ml umgerechnet werden. Dafür wurde der P-Gehalt in  $\text{mg L}^{-1}$  durch 20 geteilt. Es ergaben sich  $0,06808/20 = 0,0034 \text{ mg P in 50 ml}$ . Da die Einwaagen der Bodenproben minimal von dem Zielwert (0,5 g) abwichen, wurden diese für jede Probe eingetragen und von g in mg umgerechnet ( $0,499 \text{ g} \cdot 1000 = 499 \text{ mg}$ ). Um P% zu ermitteln, wurde der Wert in  $\text{mg L}^{-1}$  mit 100 multipliziert und durch die Einwaage in mg dividiert ( $0,06808 \text{ mg L}^{-1} \cdot 100/499 \text{ mg} = 0,013643 \text{ P}\%$ ). Es wurden für jede Probe zwei Messungen angelegt und im Anschluss wurde der Mittelwert aus den Proben 58a

und 58b ermittelt ( $[0,013643+0,0212881]/2 = 0,017466$  P%). Zuletzt wurde der Variationskoeffizient berechnet. Dafür wurde die Standardabweichung von P% mit 100 multipliziert. Das Ergebnis wurde im Anschluss durch den Mittelwert von P% dividiert (Standardabweichung  $(0,013643;0,00212881) \cdot 100$ / Mittelwert  $(0,013643;0,00212881 = 30,9)$ ). Schlussendlich wurden die Werte für P% in ppm P umgerechnet. Um die in Prozent angegebenen Extinktionswerte anzugeben, wurde die Methode parts per million (ppm) gewählt (1% = 10.000 ppm).

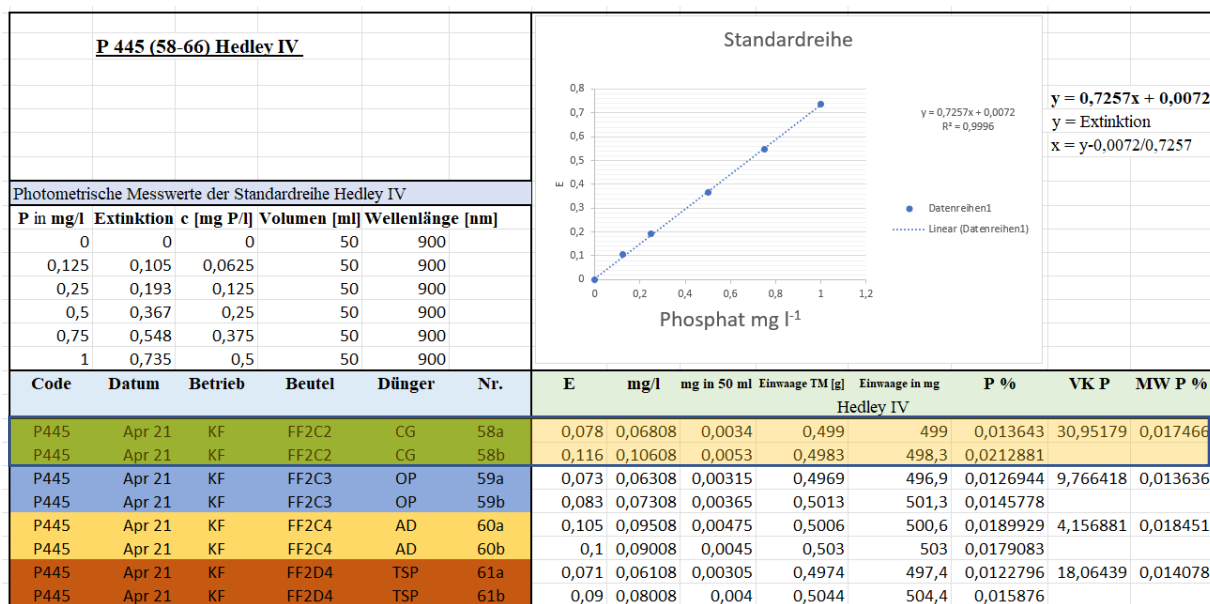


Abb. 13: Auszug aus der Auswertung der Extinktionswerte in Hedley IV (THO SEETH 2022).

### 3.4 Statistische Auswertung

Die Labordaten wurden mit dem Statistikprogramm SAS Version 9.4 varianzanalytisch ausgewertet. Die Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Varianten wurden mit dem Tukey-Test dargestellt. Dabei lag die Irrtumswahrscheinlichkeit des Testes bei  $\alpha = 0,05$ . Zusätzlich diente der Shapiro-Wilk-Test zur Überprüfung der Normalverteilung der Analysedaten.

Insofern keine signifikante Interaktion zwischen den beiden Prüffaktoren Düngevariante und Standort festgestellt werden konnte, wurden die Analysedaten der Standorte zusammen ausgewertet.

Für die weitere Datenverarbeitung und -visualisierung wurde das Programme Microsoft® Excel® Microsoft 365 MSO (Version 2207) verwendet. Das Programm Microsoft® Word Microsoft 365 MSO (Version 2207) wurde für die Textverarbeitung genutzt.

## 4 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Laboranalyse der Bodenproben der Standorte K und W beschrieben und graphisch dargestellt. Dabei wurde der P-Gehalt in ppm in Abhängigkeit des Prüffaktors der Düngevariante und des Standortes ermittelt. Auf Grund dessen, dass es in keiner Hedley-Fraktion zu einer signifikanten Interaktion zwischen den Prüffaktoren Düngevariante und Standort gekommen ist, werden die Daten beider Standorte gemeinsam ausgewertet.

### 4.1 P-Gehalt der Bodenproben

Der P-Gehalt des frei austauschbaren Phosphats im Boden war nach der Ernte bei den Rezyklaten CG und AD (153,7 bzw. 150,3 ppm P) mehr als sechsmal so hoch, als in der Ausgangssituation vor der Düngung (24,3 bzw. 31,1 ppm P). Bei der Kontrollvariante P0 ist ein viermal so hoher Gehalt mit 93 ppm P als vor der Düngung mit 27,6 ppm P zu verzeichnen. Für TSP ist im Gegensatz zu den übrigen Düngevarianten vor der Düngung mit einem Wert von 220,7 ppm P ein höherer Anteil gemessen worden als nachher mit einem Wert von 134,5 ppm P. Die Rezyklate und die Kontrollvariante K0 lagen vor der Düngung in einem Bereich von 24 - 31 ppm P. Im Gegensatz dazu ist TSP mit 93 ppm P dreimal so hoch. Die Düngung beeinflusste den P-Gehalt, der Hedley I, im Boden signifikant. Dabei hatten CG und AD nach der Ernte signifikant höhere durchschnittliche P-Gehalte, als die Kontrollvariante P0 (153,7 und 150,3 bzw. 93,1 ppm P). Somit ergeben sich ähnliche Werte für die beiden Rezyklate. Tripelsuperphosphat, welches vor der Düngung den höchsten P-Gehalt erreicht hatte, unterschied sich mit 134,5 ppm P signifikant von den anderen Düngervarianten.

An Standort K wurden 135,6 ppm P vor der Düngung gemessen. An Standort W hingegen ein Wert von 16,3 ppm P. Die durchschnittlichen P-Gehalte bei K und W unterschieden sich nach der Ernte mit Werten von 179,4 bzw. 86,4 ppm P signifikant voneinander. An beiden Standorten steht nach der Düngung und Ernte mehr pflanzenverfügbare P zur Verfügung (Abb. 14).

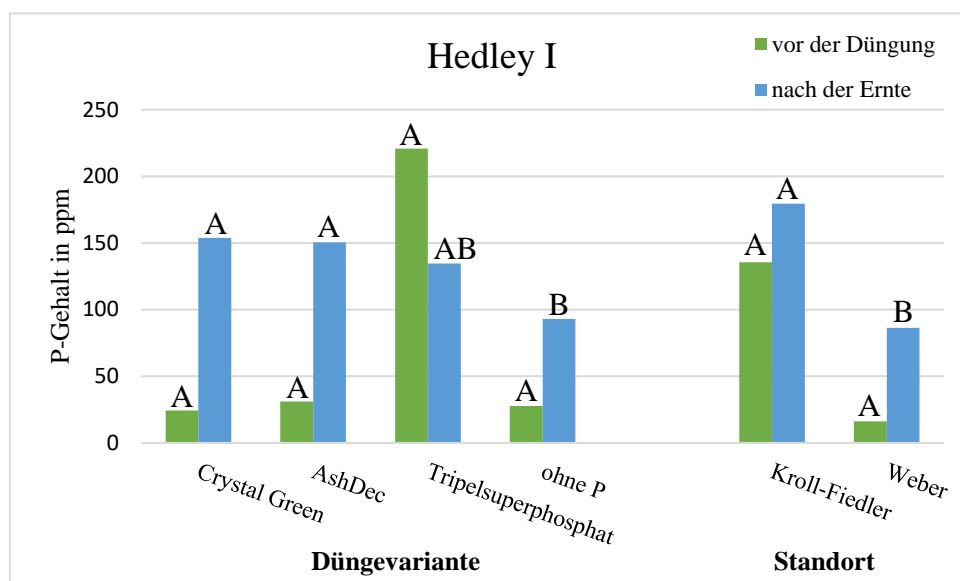


Abb. 14: P-Gehalt [ppm] der Fraktion „Hedley I“ (bis Hedley V B) zur Probennahme 02.12.2020 und 26.11.2021 an Standort K bzw. 01.04.2021 und 25.11.2021 an Standort W in Abhängigkeit der Düngevariante und dem Standort; Die Säulen sind unterteilt in die Probennahme vor der Düngung (grün) und nach der Ernte (blau). Die Säulen desselben Prüffaktors mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich statistisch signifikant (Tukey-Test,  $\alpha = 0,05$ ).

Für beide Prüffaktoren konnte eine Steigerung der P-Gehalte von vor der Düngung zu nach der Ernte ermittelt werden. Bei allen vier Düngevarianten ist der Gehalt in Hedley II P<sub>t</sub>, an totalem Phosphat, nach der Ernte höher als vor der Düngung. Der P-Recycling-Dünger AD zeigte hierbei die größte Differenz mit 97,5 ppm P vor der Düngung und 346 ppm P nach der Ernte auf. Auch der höchste gesamte P-Gehalt konnte bei AD nach der Ernte ermittelt werden. Jedoch konnte kein signifikanter Unterschied in Bezug auf die Düngevariante festgestellt werden.

Auch an den Standorten W und K ist eine Steigerung des P-Gehalts nach der Ernte ersichtlich. In Hedley II P<sub>t</sub> ist der durchschnittliche P-Gehalt, im Gegensatz zu Hedley I, an Standort W nach der Ernte mit 365,3 ppm P signifikant höher als an Standort K mit 248,4 ppm P (Abb. 15).

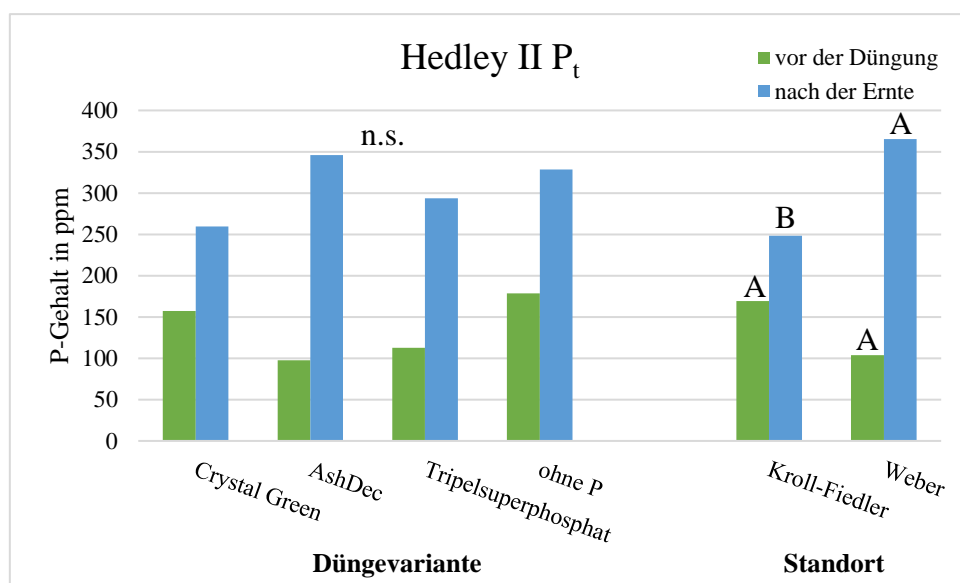


Abb. 15: Hedley II P<sub>t</sub>.

Im Gegensatz zu Hedley II P<sub>i</sub>, war der P-Gehalt von P<sub>i</sub>, bezogen auf beide Prüffaktoren, vor der Düngung höher als nach der Ernte. Die Kontrollvariante zeigte vor der Düngung verhältnismäßig den höchsten Gehalt mit einem Wert von 185,5 ppm P. Bei der Düngevariante AD konnte der geringste Wert mit 116 ppm P ermittelt werden. Bezogen auf den Prüffaktor Düngevariante konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden.

Auch die Standorte K und W zeigten mit Werten von 127,2 bzw. 155,8 ppm P einen höheren Gehalt vor der Düngung als nach der Ernte (60,6 bzw. 71,6 ppm P). Identisch zu der Düngevariante konnte für den Prüffaktor Standort kein signifikanter Unterschied ermittelt werden (Abb. 16).

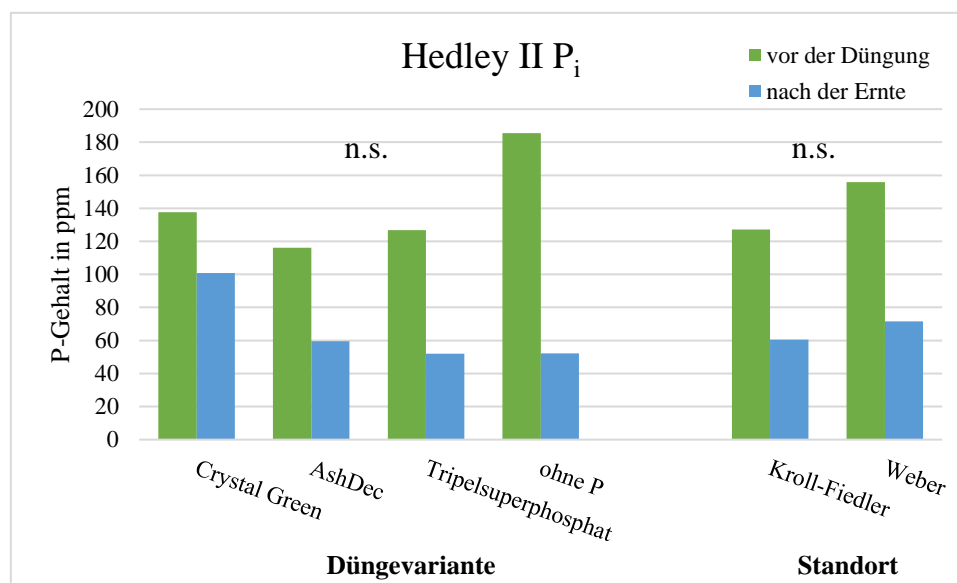
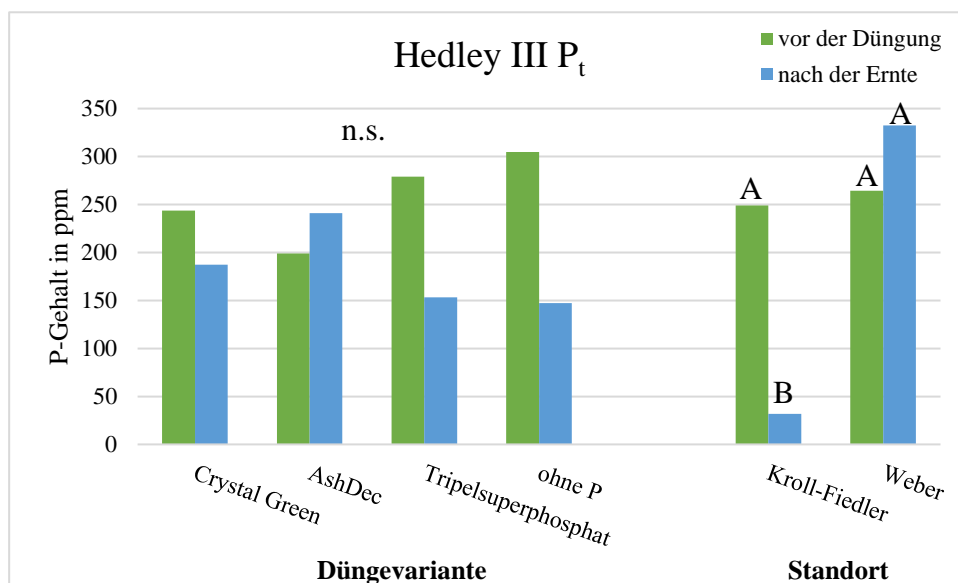


Abb. 16: Hedley II P<sub>i</sub>.

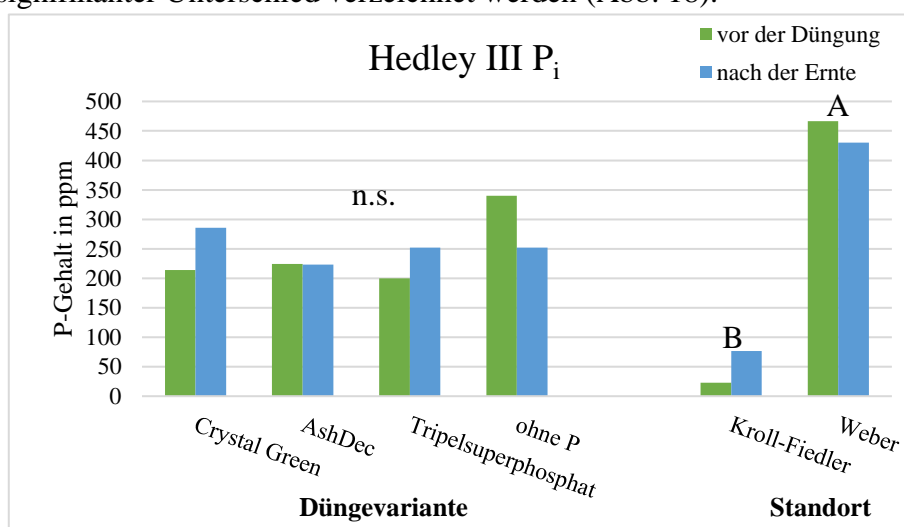
*AshDec* zeigte, in der Hedley III P<sub>i</sub>, als einzige Düngevariante einen höheren P-Gehalt nach der Ernte als vor der Düngung auf. Zusätzlich ergab sich für AD nach der Ernte der vglw. höchste Wert von 241 ppm P. Der höchste Wert vor der Düngung konnte bei K0 mit einem Wert von 304,8 ppm P ermittelt werden. Die beiden Kontrollvarianten TSP und K0 wiesen einen ähnlichen P-Gehalt nach der Ernte auf (153,2 bzw. 147,2 ppm P). Bei den P-Rezyklate CG und AD konnten nach der Ernte vglw. höhere P-Gehalte dargestellt werden (187,3 und 199 ppm P). Für den Prüffaktor Düngevariante konnte jedoch kein signifikanter Unterschied nachgewiesen werden.

Der P-Gehalt an Standort K war vor der Düngung siebenmal so hoch, wie nach der Ernte. Jedoch unterschieden sich die Werte von K und W vor der Düngung nur gering (248,9 bzw. 264,5 ppm P). Mit 332,4 ppm P war der ermittelte Wert von Standort W nach der Ernte der vglw. höchste P-Gehalt. Es konnte innerhalb des Standorts K eine signifikante Differenz verzeichnet werden. Ebenso zeigt sich, dass der Prüffaktor Standort nach der Ernte einen signifikanten Einfluss auf den P-Gehalt hat (Abb. 17).

Abb. 17: Hedley III P<sub>t</sub>.

In Hedley III P<sub>i</sub> konnten für die Rezyklate CG bzw. AD und die Kontrollvariante TSP ähnliche Werte für den P-Gehalt vor der Düngung ermittelt werden (214 bzw. 224,2 und 200,1 ppm P). Die negative Kontrollvariante P<sub>0</sub> bildete den höchsten Gehalt vor der Düngung mit einem Wert von 339,9 ppm P. Jedoch zeigte P<sub>0</sub> alleinig eine Differenz von 88,1 ppm P nach der Ernte. Die größte Differenz bezogen auf die Düngevariante konnte CG erzielen mit 214 bzw. 285,7 ppm P. Das Rezyklat AD blieb identisch nach der Ernte zur Ausgangssituation (224,5 ppm P). Bezogen auf die Düngevariante konnte kein signifikanter Unterschied ermittelt werden.

Der P-Gehalt vor der Düngung von W war zwanzigmal so hoch, wie jener von K (466,3 bzw. 22,9 ppm P). Auch nach der Ernte konnte W ein sechsmal so hohes Ergebnis erzielen (429,9 bzw. 76,4 ppm P). Innerhalb des Standortes konnte sowohl vor der Düngung als auch nach der Ernte, ein signifikanter Unterschied verzeichnet werden (Abb. 18).

Abb. 18: Hedley III P<sub>i</sub>.

Hedley IV zeigte die gleiche Verteilung in Bezug auf vor der Düngung und nach der Ernte, wie Hedley II P<sub>i</sub>. Die gemessenen P-Gehalte waren vor der Düngung höher als nach der Ernte. Dabei



konnte für K0 der höchste Wert mit 321,9 ppm P vor der Düngung gemessen werden. Die Kontrollvariante TSP zeigte im Vergleich den geringsten Wert mit 219,3 ppm P. Die Rezyklate CG und AD hatten nach der Ernte die höchsten Ergebnisse mit 190,9 und 187,5 ppm P. Den geringsten Wert nach der Ernte verzeichnete TSP mit 171 ppm P. Jedoch konnte kein signifikanter Unterschied in Bezug auf die Düngevariante dargestellt werden.

Auch die Standorte K und W wiesen höhere Daten vor der Düngung als nach der Ernte auf. Dabei ist W mit 321 ppm P vor der Düngung der höchste Gehalt. Im Gegensatz zu dem Prüffaktor Düngevariante konnte für die Standorte ein signifikanter Unterschied zwischen K und W vor der Düngung verzeichnet werden (Abb. 19).

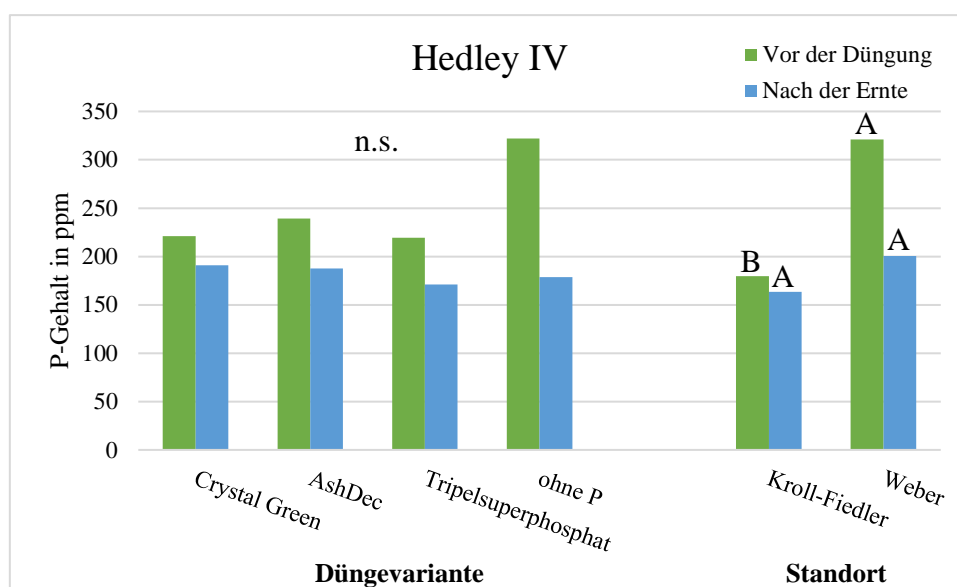


Abb. 19: Hedley IV.

Bezogen auf die Düngevarianten, in Hedley V  $P_t$ , waren die Werte vor der Düngung niedriger als nach der Ernte. Die Ausgangswerte waren ähnlich und deckten einen Bereich von 29,3 – 30,9 ppm P ab. Nach der Ernte war der P-Gehalt der Variante AD am höchsten (68,6 ppm P). Der niedrigste Wert für P nach der Ernte lag bei CG mit 26,1 ppm P. Trotz des hohen Gehaltes bei AD konnte keine signifikante Differenz ermittelt werden.

An Standort K wurde ein höherer P-Gehalt vor der Düngung, als nach der Ernte ermittelt (50,1 ppm P). Standort W konnte jedoch nur einen Gehalt von 9,7 ppm P zeigen. Die Gehalte nach der Ernte unterschieden sich mit nur 5,1 ppm P. Standort K zeigte den höheren mit 44,1 ppm P und W 39 ppm P). Zwischen den Standorten konnte vor der Düngung ein signifikanter Unterschied gezeigt werden. Ebenso unterscheidet sich W vor der Düngung signifikant von nach der Ernte (Abb. 20).

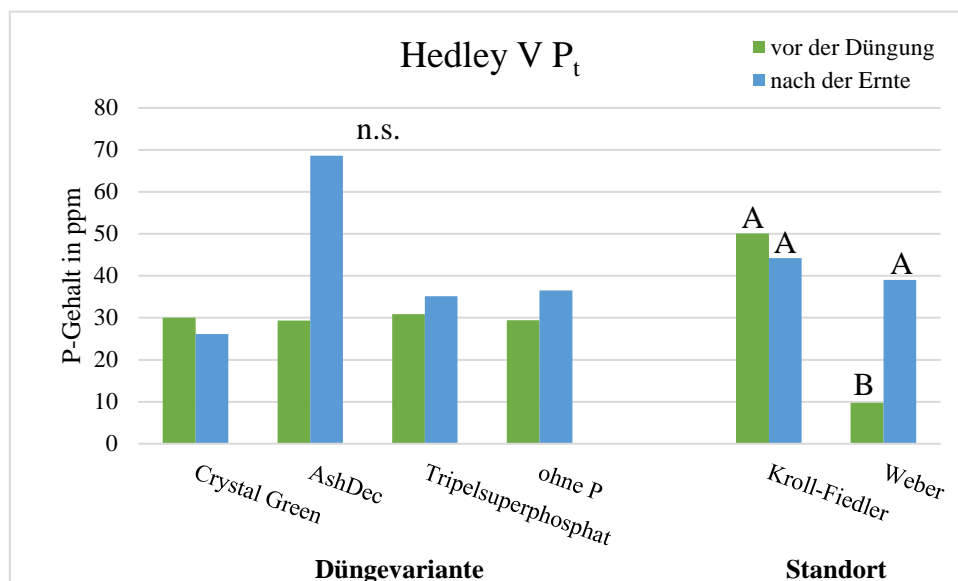


Abb. 20: Hedley V P<sub>t</sub>.

Der anorganische P-Gehalt in Hedley V lag bei den Varianten CG und TSP vor der Düngung am höchsten (38,4 und 38,3 ppm P). Dahingegen nahm der Gehalt nach der Ernte ab auf 21,7 und 26,5 ppm P. Die Kontrollvariante zeigte als alleinige Variante eine Steigung nach der Ernte von 22,3 auf 34,6 ppm P. Es konnte kein signifikanter Unterschied in Bezug auf die Düngevarianten festgelegt werden.

Standort K zeigte vor der Düngung einen höheren Gehalt als W (33,7 bzw. 29,7 ppm P). Hingegen sank der Wert bei K auf 17,2 ppm P ab und stieg bei W auf 49,7 ppm P. In Bezug auf die Standorte konnte zwischen K und W ein signifikanter Unterscheid ermittelt werden (Abb. 21).

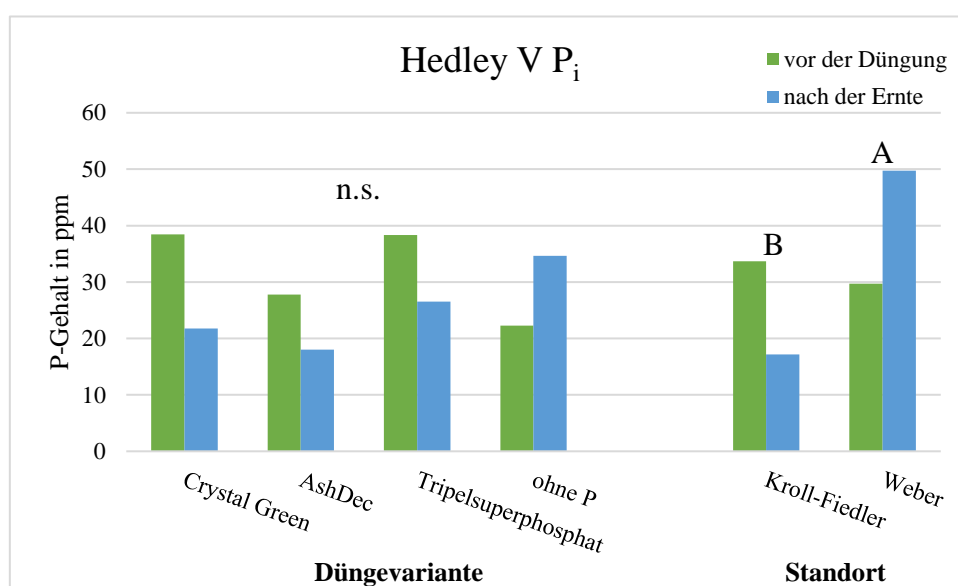
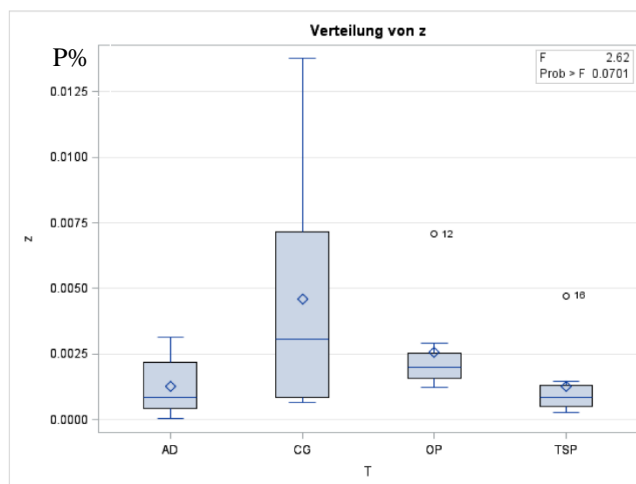


Abb. 21: Hedley V B.

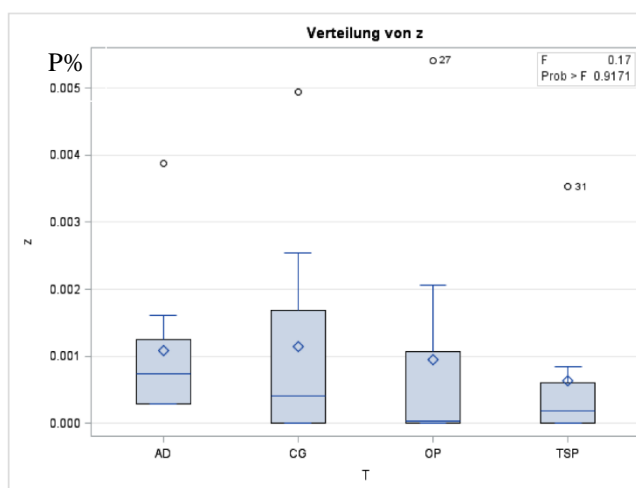
## 4.2 Z-Verteilung der Düngevarianten

Wird die Z-Verteilung der Hedley I nach der Ernte betrachtet, kann ermittelt werden, dass die Varianz von CG am größten war. Auch die Spannweite war bei CG am größten. Die Kontrollvarianten TSP und K0 zeigten die geringsten Varianzen auf, wiesen jedoch einzelne Ausreißer auf. Die Mittelwerte der von AD und TSP sind am niedrigsten. Der von CG am höchsten (Abb. 22).



**Abb. 22: Z-Verteilung der Düngevarianten aus Hedley I nach der Ernte.** F-Statistik = 2,62; Pr > F = 0,0701; AD = AshDec, CG = Crystal Green, OP = ohne P, TSP = Tripelsuperphosphat.

Auch die Z-Verteilung der Hedley V nach der Ernte zeigte für die Düngevariante CG die größte Varianz und Spannweite auf. Dahingegen konnte für TSP die geringste Varianz ermittelt werden. Der Mittelwert von AD ist am höchsten. Der von K0 ist am niedrigsten (Abb. 23).



**Abb. 23: Z-Verteilung der Düngevarianten aus Hedley V nach der Ernte.** F-Statistik = 0,17; Pr > F = 0,9171; AD = AshDec, CG = Crystal Green, OP = ohne P, TSP = Tripelsuperphosphat.

## 5 Diskussion

Der Ertrag ist ein Kriterium für einen erfolgreichen Pflanzenbau und somit für den Landwirt:in von großem Interesse. Auf Grund dessen, dass P einer der drei wichtigsten Makronährstoffe von insgesamt sechs- Makro und sieben Mikronährstoffen ist, wird bei einer Zugabe von P in einem Defizitbereich eine große Wirkung auf den Ertrag erwartet. Als nicht zu vernachlässigen, gilt hier die zusätzliche Abhängigkeit von mehreren Umweltfaktoren, wie: Temperatur (größer als 14 °C), Bodenart (lockere und tiefgründige Struktur), pH-Wert (Optimum: pH 6), Wurzeltiefe und weiteren Faktoren. Um eine hohe Phosphataufnahme der Pflanze gewährleisten zu können, wird die P-Verfügbarkeit, die wiederum von der P-Löslichkeit der Düngemittel im Boden abhängig ist, betrachtet (RÖMER 2013). Zur Bewertung der Wirkung und Verfügbarkeit von P-Recyclingdüngern sind Feld- bzw. Topfversuche unerlässlich. Die Verfügbarkeit und die zuvor aufgestellte Hypothese zur Veränderung der Fraktionen im Oberboden durch die Zugabe von P-haltigen Düngern wird in dem zuvor erläuterten Versuch ermittelt. Um diese zu bestätigen oder zu widerlegen, werden die Ergebnisse im Folgenden diskutiert. Abschließend wird anhand einer Methodenkritik darauf eingegangen, wie die Versuchsdurchführung im Labor für weitere Analysen effizienter gestaltet werden kann.

In dem auszuwertenden Versuch konnte nur für vereinzelte der geprüften Düngemittel ein signifikant erhöhter P-Gehalt im Boden nachgewiesen werden. Es konnte weder ein signifikanter Unterschied bei den Rezyklaten CG und AD noch bei der Düngung mit zertifiziertem Tripelsuperphosphat festgestellt werden, dessen Wirksamkeit bereits durch zahlreiche Studien belegt ist. Das Ergebnis des TSPs war auf Grund dessen unerwartet, da dieser als Standortfaktor unabhängig gilt und im Gegensatz zu den Rezyklaten nicht erst nach der Abgabe von organischen Säuren freigesetzt wird. Da der in TSP enthaltene P zu etwa 93% wasserlöslich ist, liegt eine gute Pflanzenverfügbarkeit vor (RICHNER 2017).

### 5.1 Effekte der Standorte

Der P-Gehalt unterscheidet sich an beiden Standorten, unter Betrachtung der P-Fraktionen im Boden, voneinander. Dies ist auf die unterschiedlichen P-Gehaltsklassen der Böden zurückzuführen. Somit bedarf Standort K nur eine Erhaltungsdüngung und Standort W eine zusätzliche Düngung, um die angestrebte Gehaltsklasse B zu erreichen. Auf Grund der verschiedenen Ausgangssituationen ist ein direkter Vergleich nur bedingt möglich und der Gehaltsklassenunterschied darf in der Auswertung nicht vernachlässigt werden. Der pH-Wert ist an Standort K mit einem Wert von durchschnittlich 6,3 ideal, damit P für die Pflanze im Boden verfügbar ist. Der Standort W weist einen pH-Wert von 5,3 auf. Dadurch kann an Ca gebundenes P, wie es in Rohphosphat und AD vorkommt, besser aufgeschlossen werden. Es ist anzunehmen, dass der totale P-Gehalt der Hedleys II und III auf Grund der Abweichung des

pH-Wertes nach der Ernte bei W signifikant höher ist als bei K. Auch der totale P-Gehalt in Hedley V erzielt im Gegensatz zu vor der Düngung eine signifikante Erhöhung nach der Ernte in Bezug auf den Standort W.

Der Gehalt des pflanzenverfügbaren Ps ist sowohl vor als auch nach der Ernte an Standort K signifikant höher, wobei die Spannweite bei W größer ist als von K. Das könnte unter anderem auf die niedrige P-Gehaltsklasse von Standort W zurückgeführt werden. Hier bedarf es einer höheren P-Menge, um das P-Defizit aufzufüllen.

In Hedley II liegt vor der Düngung an Standort K im Gegensatz zu nach der Ernte ein signifikant höherer Gehalt an totalem P vor. Als nicht zu vernachlässigen, gilt die Varianz an Standort K. Diese ist vor der Düngung größer als nach der Ernte. Aus Sicht der Landwirte:innen ist eine kleine Varianz erstrebenswert, da diese eine präzise P-Düngung möglich macht.

Im Boden finden häufige Umschichtungen und Veränderungen der Zusammensetzungen statt (LEVY 1999). Die analysierten Proben geben nur Aufschluss über einen bestimmten Zeitpunkt, an dem die Proben gezogen wurden. Darüber wie sich die Fraktionierung kurz vorher und danach verändert, kann in dieser Arbeit kein Aufschluss gegeben werden.

Als zu beobachten, gilt ebenfalls der steigende P-Gehalt an Standort W in den Hedleys III-V. Der niedrige pH-Wert von 5,3 ermöglicht die Freigabe von P-Fraktionen, die unter Idealwerten eines pH-Wertes von 6 nicht verfügbar wären. Die hohe Wirksamkeit von CG kann in diesem Boden mit der oftmals beobachteten höheren Verfügbarkeit der Magnesiumphosphate begründet werden (RÖMER 2017).

## 5.2 Effekte der Düngevariante

Die Untersuchung zeigt, dass in Hedley I der verfügbare P-Gehalt des Rezyklats CG nach der Ernte signifikant höher ist als bei den Kontrollvarianten. Jedoch weist CG eine größere Varianz auf, das für Landwirte:innen unvorteilhaft ist. Der Verbraucher benötigt ein Düngemittel mit einer genauen Angabe der P-Versorgung, um seinen Pflanzenbestand optimal versorgen zu können.

Nicht zu vernachlässigen ist die Inhomogenität der Produkte. Zahlreiche Studien bestätigen, dass sich die Zusammensetzung der Rezyklate in Abhängigkeit von verschiedenen Faktoren unterscheiden. Dazu zählt die zeitliche und räumliche Variabilität des Ausgangsmaterials Klärschlamm. Zugleich zählt die variable Produktionsbedingung mit unterschiedlichen Recyclinganlagen dazu. Auch die Variabilität der Korngröße kann einen Einfluss auf die P-Fraktionierung im Boden haben (KRATZ 2018).

Diese Annahme bestätigt Abb. 14. Die Rezyklate CG und AD weisen nach der Ernte einen höheren P-Gehalt auf. Dieses Ergebnis ist gleichzusetzen mit den Informationen zu der Wirkungsweise der Rezyklate. Diese werden erst nach der Abgabe der Wurzelexsudate der

Pflanze freigegeben. Die Referenzdüngung TSP zeigt dagegen vor der Düngung einen höheren P-Gehalt als nach der Ernte. Das ist ein Hinweis darauf, dass TSP zum größten Teil aus wasserlöslichem P besteht und es keiner Freisetzung durch Wurzelexsudaten bedarf. Diese Eigenschaft bedingt ein höheres Auswaschungspotenzial. Das ist auch ein potenzieller Hinweis auf den niedrigeren P-Gehalt nach der Ernte. Das lösliche P kann einerseits durch das hohe Auswaschungspotenzial, andererseits durch die Aufnahme und der anschließenden Abfuhr der Pflanze verloren gegangen sein (LEVY 1999).

Einer der wichtigsten Einflussfaktoren auf die Freisetzung und Verfügbarkeit von P ist der pH-Wert des Bodens. Die höchste Löslichkeit von Struviten ist in sauren Böden nachweisbar. Bei pH-Werten  $> 9$  kommt es zu einer Fällung (HERTZBERGER et al. 2020). Der pH-Wert kann durch die Pflanze beeinflusst werden. Die Pflanze kann die Effizienz bezüglich der Absorption von P durch die Bildung von Wurzelhaaren erhöht. Die Wurzelhaare, sondern Phosphatasen und organische Säuren ab, um den pH-Wert zu senken und P verfügbar zu machen. Ein besonderes Merkmal für CG ist die erstmalige Freigabe von P nach der Absonderung der organischen Säuren der Pflanzenwurzeln (OSTARA 2016). Dadurch kommt es zu einer nahezu verlustfreie P-Absonderung. Eine Auswaschung bei Niederschlägen wird somit reduziert (HERTZBERGER et al. 2020). Infolgedessen konnten zahlreiche Studien darlegen, dass von Struviten eine geringere kumulative N- und P-Auswaschung im Gegensatz zu herkömmlichen Düngemitteln ausgeht (AHMED et al. 2016). Diese Eigenschaft von CG könnte ein Indiz für die höhere Verfügbarkeit des freien Ps im Vergleich zu TSP sein. Ein weiteres Kriterium in Bezug auf die Freisetzungsgeschwindigkeit ist die Ausbringungsart und die Größe des Granulats. Viele kleine Granulate weisen im Gesamten eine größere Oberfläche auf als wenige große. Dadurch kann eine grobe Granulierung zu einer Reduzierung der Verfügbarkeit führen. Ebenso darf die Applikation nicht unbeachtet gelassen werden. Eine Applikation auf der Erdoberfläche weist eine geringere Freisetzungsrates auf als eine pulverisierte Einarbeitung des Düngemittels (HERTZBERGER et al. 2020).

Der Stand der derzeitigen Methoden kann nicht uneingeschränkt zur Bewertung von Rezyklaten verwendet werden. Die herkömmlichen Extraktionsmethoden bieten nicht die Möglichkeit die im Boden stattfindenden Prozesse darzustellen. Dazu zählen die Festlegung und Freisetzung von Rezyklaten durch die Wirkung von Wurzelexsudaten. Als zukünftige Lösung wird die P-Senken-Methode in Betracht gezogen (KRATZ 2018).

Da Mais (*Zea mays*) zu den anspruchsvollen Kulturen, in Bezug auf Phosphor- und Nährstoffversorgung gehört, wird dieser oft nach mehrjährigen Leguminosen angebaut (DÖRING 2018). An den Standorten K und W stand jeweils drei Jahre zuvor ein Kleegrasbestand, welche zu den kleinkörnigen Leguminosen zählt. Im Gegensatz zu der Pflanzenernährung im konventionellen Landbau ist die zusätzliche N-Versorgung im ökologischen Landbau limitiert (RÖMER 2013). Auf Grund dessen nutzt der ökologische Landbau die natürlichen Eigenschaften der Knöllchenbakterien der Leguminosen. Die

natürliche N-Fixierung der Leguminosen wird mit der Ausbringung von Struviten reduziert, da jenes N beinhaltet. Dieses Kriterium kann gegen den Einsatz von Struviten im ökologischen Landbau angewendet werden. Jener verfolgt das Ziel einer vollständigen Nutzung der gegebenen Ressourcen.

Die Wasserlöslichkeit und gleichzeitig die Verfügbarkeit von P in *AshDec* (AD) kann durch die thermische Klärschlammbehandlung und die Zugabe der Additive erhöht werden. Dieser Effekt wird in Hedley I damit bestätigt, dass der P-Gehalt nach der Ernte bei AD signifikant höher ist als bei TSP und der Kontrolle K0. Wobei TSP den höchsten Anteil an wasserlöslichem P beinhaltet. Auch in Hedley II  $P_t$  weist AD den höchsten P-Gehalt nach der Ernte auf.

Der anorganische und totale P-Gehalt vor der Ernte aus der Fraktion Hedley III weist sowohl bei den Rezyklaten als auch bei der Positivkontrolle niedrigere Werte als bei der Negativkontrolle ohne P-Düngung auf. Dies kann ein Hinweis darauf sein, dass in den Düngern viel pflanzenverfügbares Phosphat beinhaltet ist und in der Fraktion aus Hedley III hingegen nicht. Dass ein hoher Gehalt von P in der Negativkontrolle gemessen wurde, zeigt das ausreichend P im Boden vorhanden ist, aus beispielsweise vorherigen Düngungen. Dieser ist jedoch nur zu 0,1% für die Pflanze nutzbar und zeigt somit den höchsten P-Gehalt, im Vergleich zu den übrigen Düngern, in Hedley III (AMELUNG et al. 2018). Hingegen ist der Gehalt von totalem P nach der Ernte in Hedley III bei der Düngung von AD am höchsten und in der Negativkontrolle am niedrigsten. Dieses Ergebnis ist darauf zurückzuführen, dass P bei AD in einer Ca-P Verbindung vorliegt und diese in Hedley III nachweisbar ist. Somit ist der Gehalt bei AD vor der Ernte niedriger als nachher, da für die Freisetzung die Pflanzenwurzeln benötigt werden. Dieses Phänomen spiegelt sich in den Hedleys IV und V wider und bestärkt die vorherige Schlussfolgerung.

Die Hypothese ob durch die Düngung die Zusammensetzung der P-Fractionen im Boden geändert werden kann, kann bestätigt werden. Es darf nicht vernachlässigt werden, dass nicht nur die pflanzenverfügbaren Fraktionen verändert wurden, sondern auch die P-Gehalte in den nicht verfügbaren Fraktionen gestiegen sind. Letztendlich ist der Einfluss der Rezyklate und auch von TSP stark abhängig von verschiedenen natürlichen Faktoren in der Produktion und der Nutzung in der Landwirtschaft.

Auf Grund dessen, dass es häufiger Studien über die Ertragssteigerung von P gib, als von der P-Fraktionierung im Boden, müssen weitere Versuche erfolgen, um die festgestellten Ergebnisse zu untermauern.

### 5.3 Methodenkritik

Bestimmte Aspekte der Laboranalyse sind kritisch zu betrachten und können sich auf die Ergebnisse des Versuchs ausgewirkt haben. Die Bodenproben wurden getrocknet und vermahlen, bevor die Laboranalyse stattgefunden hat. Dadurch wurden feste Bodenaggregate zerkleinert und die natürliche Ausgangssituation des Bodens verändert. Als Ziel galt es den pflanzenverfügbaren P zu ermitteln. Die Pflanzenwurzeln nehmen unter natürlichen Bedingungen kein P aus vermahlenem Boden auf. So lässt sich vermuten, dass Ergebnisse mit nicht gemahlenem Boden repräsentativer sind. Ebenso muss beachtet werden, dass zu den Messungen, an verschiedenen Tagen, immer neue Lösungen angesetzt wurden, da die Lösungen zum einen nicht so lange haltbar sind und zum anderen nicht in so großen Mengen hergestellt und aufbewahrt werden können. Auch wenn die Lösungen immer nach der gleichen Rezeptur angesetzt werden, kommt es zu minimalen Unterschieden. Diese Unterschiede können sowohl von den Außentemperaturen als auch von minimal abweichenden Mengen der Komponenten abhängen. Ein kritisches Beispiel hierfür ist das Ansetzen der Lösung „P-Blau“. Die Lösung kann nur wenige Tage aufbewahrt werden. Diese ist jedoch unerlässlich für die typischen Blaufärbung der Proben und damit den P-Gehalt in den Proben photometrisch messen zu können. Liegt ein Fehler beim Ansetzen der Lösung vor, werden die Ergebnisse verfälscht.

Die Proben der verschiedenen Standorte wurden also mit Lösungen aus verschiedenen Ansätzen untersucht. Da die ersten Proben des zweiten Standortes zur ersten Messreihe (des ersten Standortes) geordnet wurden, um die erste Messreihe aufzufüllen, somit wurde zudem innerhalb eines Standortes und einer Hedley mit Lösungen aus verschiedenen Ansätzen gemessen.

Für weitere Versuchsdurchläufe ist es ratsam im Vorfeld eine geeignete Standardreihe zu wählen und diese beizubehalten. Auf Grund unterschiedlicher Standardreihen in dem oben ausgeführten Versuch mussten ausgewählte Messreihen wiederholt werden. Dafür mussten Ressourcen, wie die Zinnfolie in doppelter Menge verwendet werden.



## 6 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es die P-Recycling-Dünger *Crystal Green* und *AshDec* im Vergleich zu herkömmlichen Düngemitteln wie Tripelsuperphosphat zu untersuchen. Hierbei wurde die Wirkung auf die P-Fraktionierung im Boden im ökologischen Landbau ermittelt. Dafür wurde im Frühjahr 2021 zwei Öko-Mai-Feldversuche angelegt. Dabei handelte es sich um eine randomisierte Blockanlage auf zwei ökologisch bewirtschafteten Betrieben in Warstein.

Insgesamt konnten in den unterschiedlichen P-Fractionen signifikante Unterschiede für die Standorte festgestellt werden. Hingegen konnte für den Prüffaktor Düngevariante nur für den pflanzenverfügbaren P ein signifikanter Unterschied zwischen den Rezyklaten und den beiden Kontrollen festgestellt werden.

Phosphor-Recycling-Dünger beinhalten verschiedene P-Formen mit unterschiedlicher Löslichkeit, Pflanzenverfügbarkeit und chemischer Struktur. Die Unterschiede sind nicht nur auf die verschiedenen Herstellungsverfahren zurückzuführen, sondern ebenso auf die Unterschiede innerhalb eines Produkttypens. Die Löslichkeit ist abhängig von den Ca-, Fe- und Al-Gehalten im Boden. Des Weiteren ist die Düngewirkung abhängig von der Qualität des Düngemittels, als auch von den Umweltfaktoren, wie pH-Wert, Bodenart und Witterung. Auf Grund dessen ist eine Studie unter natürlichen Bedingungen schwierig auszuwerten, im Gegensatz zu einem Topfversuch unter identischen Laborbedingungen.

Bezogen auf die Löslichkeit und Pflanzenverfügbarkeit konnten die Rezyklate CG und AD teilweise höhere Wert als TSP erreichen. Die Schwermetallbelastung wird für CG als gering eingeschätzt. Zugleich spricht die nachhaltige Produktion von Struviten für den Einsatz im Ökolandbau. Das zugrunde liegende Verfahren der biologischen P-Elimination kann dazu in etwa 30% der Kläranlagen in Deutschland integriert werden. Dadurch besteht nur ein geringes Potenzial des P-Recyclings. Dieses bedingt die Nichterfüllung der Vorgaben der Klärschlammverordnung. Für das Struvit CG ist die P-Rückgewinnungsrate zum jetzigen Zeitpunkt zu gering.

*AshDec* konnte in Bezug auf die Löslichkeit nicht eindeutig beurteilt werden. Nicht nur in Hedley I konnte AD höhere Werte erzielen, sondern auch in den höheren Fraktionen (Hedley V). Zahlreiche Studien weisen auf eine standort- und kulturspezifische Düngewirkung hin. Hier müssen in Zukunft weitere Versuche durchgeführt werden. Zukünftig könnte die Wirksamkeit der verschiedenen Additive Gegenstand einer Forschung sein.

Damit der P-Recyclingdünger im ökologischen Landbau etabliert werden kann, muss eine entsprechende Zulassung im konventionellen Landbau erfolgen. Die Schadstoffbelastung wird als gering und die Wirksamkeit auf die Pflanzenverfügbarkeit als hoch eingeschätzt. Jedoch ist die Rentabilität umstritten und muss in weiteren Studien erforscht werden.

Letztlich stellt sich die Frage, ob die P-Rezyklate den Grundzügen des ökologischen Landbaus entsprechen und ob eine Zulassung erfolgen wird.

Schlussendlich liegt ein großes Potenzial für P-Rezyklate aus Klärschlammen vor. Diese müssen in weiteren Studien auf ihre Wirksamkeit und Effizienz getestet werden, um in Zukunft für den ökologischen Landbau eine potenzielle P-Ressource verfügbar zu machen.

## 7 Literaturverzeichnis

- ADAM C.; KRÜGER O. (2013): Wertstoffpotential in deutschen Klärschlammaschen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hg.): Energie aus Abfall. 10 Bände. Neuruppin: TK-Verl., S. 997–1014.
- AHMED S.; KLASSEN T. N.; KEYES S.; DALY M.; JONES D. L.; MAVROGORDATO M. (2016): Imaging the interaction of roots and phosphate fertiliser granules using 4D X-ray tomography. In: *Plant and Soil* 401 (1-2), S. 125–134.
- ATV-DVWK (2002): Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, *ATV-DVWK-Bundestagung: 18./19. September 2002 in Weimar*, GFA, Ges. zur Förderung der Abwassertechnik, Hennef.
- AMELUNG W.; BLUME H.-P.; FLEIGE H.; HORN R.; KANDELER E.; KÖGEL-KNABNER I. (2018): Kapitel 9. Böden als Pflanzenstandorte. Phosphor. In: Amelung W., Blume H.-P., Fleige H., Horn R., Kandeler E., Kögel-Knabner I. (Hg.): Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde. Unter Mitarbeit von Thomas Gaiser, Jürgen Gauer, Nina Stoppe, Sören Thiele-Bruhn und Gerhard Welp. 17. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag GmbH, S. 491–581.
- BOCKHOLT K. (2020): Agrar Heute Ziel der Düngeverordnung (DüV) ist es, neben Nitrat- auch Phosphoreinträge in Gewässer zu senken. Wir zeigen, wie eutrophierte Gebietskulissen ausgewiesen werden und welche Auflagen dort gelten.
- CARTER M.R.; GREGORICH, E.G. (2008): *Soil sampling and methods of analysis*, 2nd ed, Canadian Society of Soil Science; CRC Press, [Pinawa, Manitoba]: Boca Raton, FL.
- DAKORA F.D.; PHILLIPS D.A. (2001): Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments. *Plant and Soil* 245. 35-47.
- DESTATIS-STATISTISCHES BUNDESAMT (2021): Deutlicher Zuwachs an Ökobetrieben und ökologisch bewirtschafteten Flächen im letzten Jahrzehnt (Pressemitteilung Nr. N040). Online [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/06/PD21\\_N040\\_41.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/06/PD21_N040_41.html), zuletzt geprüft am 16.09.2022.
- DÖRING T. (2018): Steckbriefe der Ackerfrüchte. In: Wachendorf, M., A. Bürkert und R. Graß: ökologische Landwirtschaft. Eugen Ulmer KG, Stuttgart (Hohenheim).
- EICHLER-LÖBERMANN B.; KÖHNE S.; KOWALSKI B.; SCHNUG E. (2008): Effect of catch cropping on phosphorus bioavailability in comparison to organic and inorganic fertilization. *Journal of Plant Nutrition* 31. S. 659-676.
- EUR-LEX (2021): Durchführungsverordnung (EU) 2021/1165 vom 15. Juli 2021. Zugriff: 24.08.2022, URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32021R1165>.
- FARDEAU J.C. (1996): Dynamics of phosphate in soils. An isotopic outlook. *Fertilizer Research* 45, 91-100.
- FILLIPELLI, G. M. (2017): The global phosphorus cycle. In: Lal, R.; Stewart, B. A. (Hg.): *Soil phosphorus*. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group (Advances in soil science), S. 1–21.
- FÖHSE D.; CLAASSEN N.; JUNGK A. (1988): Phosphorus efficiency of plants. In: *Plant and Soil* 110 (1), S. 101–109. DOI: 10.1007/BF02143545.
- FREDE HG.; BACH M. (2003) Heutiger und künftiger Beitrag der Gülle bei der Phosphorversorgung der Böden.
- FROSSARD E.; BÜNEMANN E. K.; GUNST L.; OBERSON A.; SCHÄRER M.; TAMBURINI F. (2016): Fate of Fertilizer P in Soils—The Organic Pathway. In: Schnug, E.; Kok, L. J. de (Hg.): *Phosphorus in Agriculture: 100 % Zero*. Dordrecht: Springer Netherlands, S. 41–61.

- HAWKESFORD M.; HORST W.; KICHEY T.; LAMBERS H.; SCHIOERRING J.; MOLLER I.; WHITE P. (2012): Function of Macronutrients. In: Marschner, P.: Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press, London, Waltham, San Diego.
- HEINZMANN B. (2001): Phosphorus recovery in wastewater treatment plants. In: Second international conference on recovery of phosphates from sewage and animal wastes, Noordwijkerhout, Niederlande, 12.-13. März 2001.
- HERMANN L. (2016): Verfahren zur Düngemittelherstellung aus Klärschlammaschen – ASH DEC Prozess (hlnug.de) (zuletzt zugegriffen am 23.09.2022)
- HERMANN L.; SCHAAF T. (2019): Outotec (AshDec®) Process for P Fertilizers from Sludge Ash. In: Ohtake, H.; Tsuneda, S. (Hg.): Phosphorus Recovery and Recycling. Singapore: Springer Singapore, S. 221–233.
- HERTZBERGER, A. J.; CUSICK R.D.; MARGEBOT A. J. (2020): A review and meta-analysis of the agricultural potential of struvite as a phosphorus fertilizer. *Soil Science Society of America Journal* 84, 653-671.
- JACOB I.; WIEß J.; HEILMEIER L. (2022): Viehloser Ökoackerbau: Mit Klee gras Nährstoffe optimal machen. In: *BIOTOPP* (01). Online [https://www.demonet-kleeluzplus.de/mam/cms15/dateien-/2022-1\\_biotopp\\_kleegrasverwertung.pdf](https://www.demonet-kleeluzplus.de/mam/cms15/dateien-/2022-1_biotopp_kleegrasverwertung.pdf), zuletzt geprüft am 13.09.2022.
- JOHNSTON H.; WARREN R.G.; PENNY A. (1970): The value of residues from long-period manuring at Rothamsted and Woburn. IV. The value to arable crops of residues accumulated from superphosphate; V. The value to arable crops of residues accumulated from K fertilisers. Rep. Rothamsted Exp. Stn. for 1969
- JÖNSSON, H.; STINZING A. R.; VINNERAS B.; SALOMON E. (2004): Guidelines on the Use of Urine and Faeces in Crop Production. EcoSanRes, Stockholm Environment Institute, Stockholm.
- KOLBE H. (2010): Phosphor und Kalium im ökologischen Landbau – aktuelle Probleme, Herausforderungen, Düngungsstrategien. In: Bundesarbeitskreis Düngung (BAD) (Hg.): Phosphor- und Kali-umdüngung – brauchen wir neue Düngekonzepte? Frankfurt/Main: Bundesarbeitskreis Düngung (BAD) (Tagung des Verbandes der Landwirtschaftskammern (VLK) und des Bundesarbeitskreises Düngung (BAD), 10), S. 117–137.
- KOLBE H. (2016): Nährstoff und Humusversorgung im Ökolandbau. Der kritische Agrarbericht 2016. AgrarBündnis e.V., Konstanz.
- KRATZ S.; ADAM C.; VOGEL C. (2018): Pflanzenverfügbarkeit und agronomische Effizienz von klärschlamm-basierten Phosphor (P)-Recyclingdüngern
- KRAUS, F.; KABBE C. (2017): Phosphorrückgewinnung in der Praxis - So funktioniert es in den Niederlanden. Korrespondenz Abwasser, Abfall 64, Nr. 2.
- KRAUS F.; ZAMZOW M.; HOFFMANN C.; BESSAI A.-K.; FISCHINGER S. (2019): Abschlussbericht - Einsatzmöglichkeiten für Nährstoffzyklate im Ökolandbau (nurec4org). Hg. v. Kompetenzzentrum Wasser Berlin, Bioland Beratung, Institut für Agrar- und Stadökologische Projekte, P-REX Environment.
- KROLL-FIEDLER C. (2021): Der Hof - Biolandhof Kroll-Fiedler. Hg. v. Biolandhof Kroll-Fiedler. Warstein-Belecke. Online <https://biolandhof-kroll-fiedler.de/der-hof/>, zuletzt aktualisiert am 28.09.2021, zuletzt geprüft am 17.09.2022.
- LEVY E. T.; SCHLESINGER W. H. (1999). A comparison of fractionation methods for forms of phosphorus in soils. *Biogeochemistry*, 47(1), 25-38.
- LWK NRW (LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN) (2015): Düngung mit Phosphat, Kali und Magnesium. Zugriff: 18.09.2021, URL: <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/pdf/phosphat-kalium-magnesium-pdf.pdf>.

- LWK NRW (LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN) (2020): Phosphor-Rezyklierung im Ökologischen Landbau Zugriff: 20.09.2022, URL: <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/oekolandbau/versuche/oeko-p.htm>.
- LWK NRW (LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN) (2021): Düngung mit Phosphat, Kali, Magnesium (landwirtschaftskammer.de)
- MONTAG D.; MONTAG D.M. (2008): Phosphorrückgewinnung bei der Abwasserreinigung: Entwicklung eines Verfahrens zur Integration in kommunale Kläranlagen, Ges. zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen, Aachen.
- MURPHY J.; RILEY J.P. (1962): A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 27, 31-36.
- OSTARA (OSTARA NUTRIENT RECOVERY TECHNOLOGIES INC.) (2016): CrystalGreen® continious release fertilizer 5-28-0 with 10%Mg. Vancouver. Online [http://crystalgreen.com/wp-content/uploads-/2016/01/CrystalGreen\\_Label\\_Technical-Data-Sheet-2000lbs\\_rev-05.pdf](http://crystalgreen.com/wp-content/uploads-/2016/01/CrystalGreen_Label_Technical-Data-Sheet-2000lbs_rev-05.pdf), zuletzt geprüft am 15.09.2022.
- POWELL C. L. (1974): Effect of P fertilizer on root morphology and P uptake of *Carex coriacea*. In: *Plant and Soil* 41 (3), S. 661–667.
- PRADT D. (2003): Rückgewinnung von Phosphor in der Landwirtschaft und aus Abwasser und Abfall: Tagungsband zum Symposium am 06. - 07. Februar 2003 im Hotel Kempinski Bristol Berlin, Berlin.
- RICHNER W.; FLISCH R.; MAYER J.; SCHLEGEL P.; ZÄHNER M.; MENZI H. (2017): 4/Eigenschaften und Anwendung von Düngern. Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz/GRUD, 1-4.
- RÖMER W. (2013): Möglichkeiten der P-Recyclingdüngemittel im Ökologischen Landbau. KTBL-Fachgespräch " Organische Handelsdüngemittel tierischer und pflanzlicher Herkunft für den Ökologischen Landbau". KTBL, Fulda, 23.
- RUBIO G.; LIAO H.; YAN X.; LYNCH J. P. (2003): Topsoil foraging and its role in plant competitiveness for phosphorus in common bean. *Crop Science* 43, S. 598-607.
- SCHAAF T. (1998): Integration von Modellansätzen zur Bodenbearbeitung und Düngung in den Baukasten für Stickstoffs simulationsmodelle EXPERT-N. Dissertation. Hg. v. Zentralstelle für Agrardokumentation und-information (ZADI).
- SCHNUG E.; HANEKLAUS S. H. (2016): The Enigma of Fertilizer Phosphorus Utilization. In: Schnug, E.; Kok, L. J. de (Hg.): *Phosphorus in Agriculture: 100 % Zero*. Dordrecht: Springer Netherlands.
- SCHNUG E.; ROGASIK J.; HANEKLAUS S. H. (2003): Methoden und Probleme der Bestimmung des Ausnutzungsgrades von Nährstoffen in Düngemitteln. *Landbauforsch Völkenrode* S.1-11.
- SCHÜLLER, H. (1969): Die CAL-Methode, eine neue Methode zur Bestimmung des pflanzenverfügbaren Phosphates in Böden. In: *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 123 (1), S. 48–63.
- SMITH S.E.; DEAD D.E. (2008): *Mycorrhizal symbiosis*, 3. Auflage. Academic Press, New York.
- STEFFENS D.; STAMM R.; YAN F.; LEITHOLD G.; SCHUBERT S.; HEB J.; RAHMANN G. (2005): Rohphosphatmobilisierung von Sommerweizen, Weißblupine und Ackerbohne in einer Fruchtfolge. In: *Ende der Nische, Beiträge zur 8. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau*.
- TIESSEN H.; MOIR J.O. (1993): Kapitel 25 Charakterisierung von verfügbarem P durch sequentielle Extraktion. In *Bodenprobenahme und Analysemethoden*. 2. Auflage. Kann. Soz. Bodenkunde, Hrsg. Carter MR, Gregorich EG, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.
- UBA (2018): Arzneimittelrückstände in Rezyklaten der Phosphorrückgewinnung aus Klärschlämmen

- VDLUFA (Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten) (2018): VDLUFA Methodenbuch Band I. Zugriff: 13.08.2021, URL: [https://www.vdlufa.de/Methodenbuch/index.php?option=com\\_content&view=article&id=7&Itemid=108&lang=de](https://www.vdlufa.de/Methodenbuch/index.php?option=com_content&view=article&id=7&Itemid=108&lang=de).
- VODEGEL S.; MÜLLER F. (2017): DBU-Grundsatzstudie: Technologiebewertung thermos-chemischer Konversionsverfahren von Klärschlamm als Alternative zur Verbrennung unter besonderer Berücksichtigung der Potenziale zur Nährstoffrückgewinnung. Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Projektnummer 60 3547.
- WAIDA C. (2011): *Bewertung verschiedener Sekundärrohstoffe aus dem Phosphor Recycling*, Univ., Inst. für Bodenkunde und Bodenerhaltung, Gießen. S. 3-9
- WANTULLA T. (2022): Einfluss von P-Recycling-Düngern auf Ertrag und P-Effizienz von Öko-Mais. Masterarbeit, Bonn

## Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten und nicht veröffentlichten Schriften entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form oder auszugsweise im Rahmen einer anderen Prüfung noch nicht vorgelegt worden.

Bonn, 26.09.2022

---

*Unterschrift der Studierenden*

## **EIP Projekt Öko-P: P-Rezyklate für den Ökolandbau?**

- Ergebnisse und Erkenntnisse aus Feldversuchen mit Mais und Klee gras

03.03.2023, 10 – 12 Uhr, Zoom-Meeting

### **Anforderungen des nationalen und europäischen Düngemittelrechts an P-Rezyklate**

(Vortrag und anschließende Diskussion und Fragen ca. 20 Minuten)

- *Hendrik Rösmann, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV)*

### **Öko-P: Ergebnisse aus Feldversuchen mit Mais und Klee gras unter den Bedingungen des Ökolandbaus** (Vortrag und anschließende Diskussion und Fragen ca. 40 Minuten)

- *Tim Wantulla und Hannah Fischer, Landwirtschaftskammer NRW*

**Kurze Pause** (10 Minuten)

### **Ergebnisse aus andere Forschungsprojekten mit P-Rezyklaten**

**Pyreg** (20 Minuten)

- *Prof. Dr. Thomas Appel, TH Bingen*

**Weitere Forschungsergebnisse** (ca. 20 Minuten)

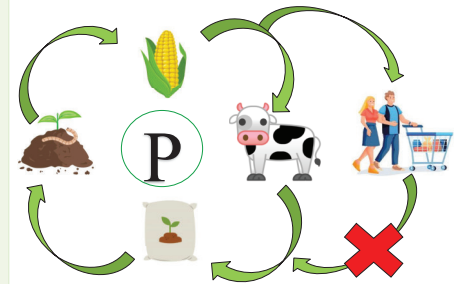
Dierk Koch, LLH

**Diskussion und Abschluss** (ca. 10 – 15 Minuten)



### Hintergrund:

- **P-Mangel** ist ein zunehmendes Problem im Ökolandbau
- Möglichkeiten Defizite auszugleichen auf organische Dünger und **Rohphosphate** begrenzt
- Letztere werden ausschließlich aus EU-Ausland importiert, weisen oftmals hohe Schwermetallbelastungen auf und sind nur gering pflanzenverfügbar
- **mögliche Lösung:** geschlossene Kreisläufe durch das Recycling von Nährstoffen aus Kläranlagen könnten in Deutschland **ca. 40% der P-Mineraldünger ersetzen** (BMEL, 2020)
- Verordnung **verpflichtet** Kläranlagen zur Nährstoffrückgewinnung (AbfKlärV, 2017)



### Ausgewählte P-Rezyklatdünger:

	Struvit		Karbonisat	Asche	Kohle
Name	Crystal Green	Berliner Pflanze	Pyreg	AshDec	KnochenKohle+
Verfahren	Kristallisationsverfahren		Karbonisierung	Thermische Behandlung	Pyrolyse
Ausgangsstoff	Klärschlammwasser	Klärschlamm	Klärschlamm	Klärschlamm-asche	Knochenchips
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -Gehalt	25%	25%	14%	17%	25%

### Versuchsaufbau und -methoden:

- 3 Standorte mit **P-Mangel** (Versorgungsstufe A bzw. B) auf Praxisbetrieben
- **randomisierte Blockanlage** mit 8 Varianten (3 Kontrollen, 5 Rezyklate; siehe Tabelle)
- Düngeeffekt bei **Klee gras** und **Mais** über zwei Jahre:
  - Regelmäßige Bonituren im Mais
  - FM- und TM-Ertrag (dt ha<sup>-1</sup>)
  - Analyse und Berechnung des N- und P-Entzuges (kg ha<sup>-1</sup>)
- sequentielle P-Extraktion der Bodenproben zeigt **Verteilung** und **Pflanzenverfügbarkeit** der P-Fractionen im Boden

### Versuchsfragen:

*Wie wirksam sind verschiedene P-Rezyklate unter den Praxisbedingungen des Ökolandbaus?  
Wie ist der Langzeitudüngeeffekt über eine komplette Fruchtfolge?  
Wie können diese Produkte sinnvoll in einer Fruchtfolge integriert werden?*

### Ergebnisse:

#### Qualität und Sicherheit der Rezyklate:

- **Schadstoffgrenzwerte** (DüMV und AbfKlärV) **eingehalten**
- P liegt je nach Verfahren in unterschiedlichen Formen (Ca-P, MgNH<sub>4</sub>PO<sub>4</sub>, etc.) vor

#### Düngewirkung bei Klee gras und Mais:

- bei **Klee gras** konnte im 1. Versuchsjahr ein **ertragssteigernder Effekt** durch **Crystal Green (Struvit)** erzielt werden
- hohe Erträge auch ohne P-Düngung deuten auf **hohe organische P-Reserven im Boden** hin
- **N-Effekt** der Struvite nicht auszuschließen
- **erhöhte P-Aufnahme** bei **Klee gras** und **Mais** (2021) deuten darauf hin, dass P aus den **Struviten** (auch wenn nicht wasserlöslich) **gut pflanzenverfügbar** ist

Abb. 2: Klee gras TM-Ertrag (dt ha<sup>-1</sup>) 2021

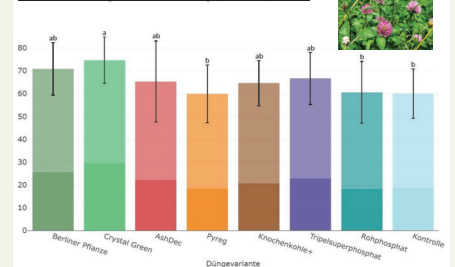
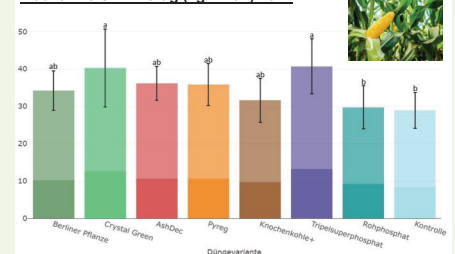


Abb. 3: Mais P-Entzug (kg P ha<sup>-1</sup>) 2021



### Ausblick und Fazit:

- Düngeeffekte auf Boden und Pflanzen sollen weiter beobachtet werden (Langzeitudüngeeffekt der nächsten 5 Jahre)
- **Zulassung** von **Struvit** für den Ökolandbau voraussichtlich nächsten Jahres mit neuer **EU-Öko-Verordnung**
- **Struvit** könnte eine **nachhaltige Alternativ** zu herkömmlichen P-Düngern im Ökolandbau darstellen

#### Projektpartner\*innen:

- Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Professur Agrarökologie und Organischer Landbau
- 3 Praxisbetriebe: Mühlenhof (Halle, Westf.), Kroll-Fiedler (Warstein-Belecke), Weber-Berres GbR (Warstein-Suttrop)

#### Assoziierte Projektpartner\*innen:

- Technische Hochschule Bingen, Professur für Bodenkunde und Pflanzenernährung

# ÖKO-P: RECYCLINGDÜNGER FÜR DEN ÖKOLANDBAU?

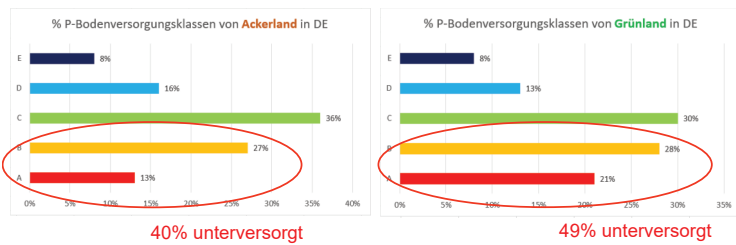
24. Kartoffeltag, 05.01.2023  
- Hannah Fischer -



## Programm

- P-Problematik und Hintergrund des Öko-P Projektes
- P-Recyclingdünger
- Versuchsaufbau und Standorte
- Versuchsergebnisse aus 2021 und 2022
- Fazit und Ausblick

## P-Versorgung im Ökolandbau



➔ Negative P-Bilanzen  
im Durchschnitt -5 kg P/ha pro Jahr

## P-Dünger im Ökolandbau

- Organische Dünger
- Rohphosphate
  - Importe aus dem **EU-Ausland**
  - Hohe **Schwermetallgehalte** (Cadmium und Uran) (Kratz und Schnug, 2005)
  - **Geringe Wirkung** (Schnug et al., 2003)
  - Fossile, **endliche** Rohstoff



## P-Recycling in Kläranlagen



- **Lokale Nährstoffkreisläufe** als P-Quelle nutzen
- könnten in Deutschland bis zu **40% der P-Mineraldüngern** ersetzen (BMEL, 2020)
- Kläranlagen sind verpflichtet Nährstoffe rückzugewinnen (AbfKlarV, 2017)
- Vielzahl an Technologien und Düngeprodukten



## Ausgewählte P-Recyclingdünger

Produkttyp	Struvit		Karbonisat	Asche	Kohle
Ausgangsstoff	Klärschlamm-wasser	Klärschlamm	Getrockneter Klärschlamm	Klärschlamm-asche	Schlachtabfälle (Knochenchips)
Verfahren	Kristallisationsverfahren		Karbonisierung	Thermische Behandlung	Pyrolyse
P-Gehalt	11%	11%	6%	7%	11%
	<b>Crystal Green</b> 	<b>Berliner Pflanze</b> 	<b>Pyreg</b> 	<b>AshDec</b> 	<b>Knochenkohle+</b> 



## Gesetzliche Situation

- Seit Juli 2022 sind in der EU-Düngemittelverordnung:
  - Phosphatsalze („Struvite“)
  - Produkte aus Klärschlammaschen
  - Pyrolysierte/gasifizierte Materialien (ausgenommen Klärschlamm!)
- Voraussetzung für die Zulassung dieser Produkte im Ökolandbau
  - Abstimmung über Aufnahme in Anhang der EU-Ökoverordnung für eine Zulassung von Struviten
  - Weitere Rezyklate (s.o.) sollen weiter geprüft werden
- Unterstützung durch viele wichtige Akteure (FiBL, Bioland etc.)



## Öko-P: Versuchsaufbau

- **3 ökologische Praxisbetriebe** mit Flächen in Versorgungsstufe A und B
  - Jeweils 2 Versuch mit Düngung zu Mais und Kleegras
- Je 8 Varianten
  - Fünf Rezyklate
  - Drei Kontrollen: ungedüngt, Rohphosphat, Tripelsuperphosphat
- **Langzeitdüngeneffekt**
  - Zwei Versuchsjahre
  - Ca. 130 kg P/ha



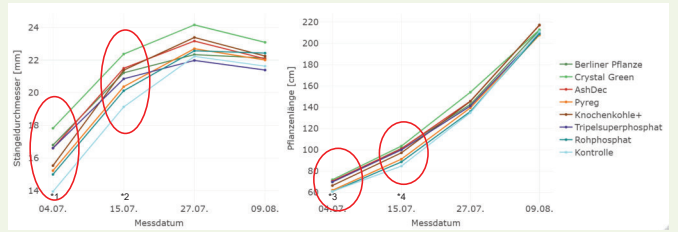
## Standorte

Standort	Halle (Westfalen)	Warstein-Belecke	Warstein-Suttrop
Bodenart	Sandiger Boden (Su2)	Schwerer Boden (Lu)	Schwerer Boden (Lu)
pH	5	6,4	5,3
P-Gehaltsklasse mg P / 100 g	A 1,14	B 2,18	A 0,87
P-Nachlieferungspotenzial	niedrig	niedrig bis mittel	mittel bis hoch



## Mais – 2022 / Warstein

### Pflanzenlängen (links) und Stängeldurchmesser (rechts) zu vier Messterminen



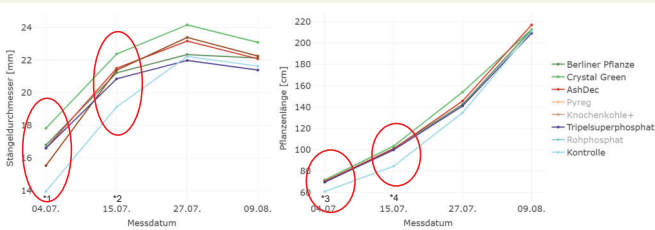
\*1-2: Berliner Pflanze, Crystal Green, AshDec und TSP  
signifikant höher als die Kontrolle

\*3-4: Berliner Pflanze, Crystal Green und AshDec signifikant höher als  
die Kontrolle



## Mais – 2022 / Warstein

### Pflanzenlängen (links) und Stängeldurchmesser (rechts) zu vier Messterminen



\*1-2: Berliner Pflanze, Crystal Green, AshDec und TSP  
signifikant höher als die Kontrolle

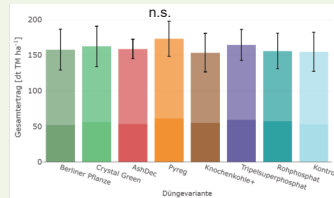
\*3-4: Berliner Pflanze, Crystal Green und AshDec signifikant höher als  
die Kontrolle



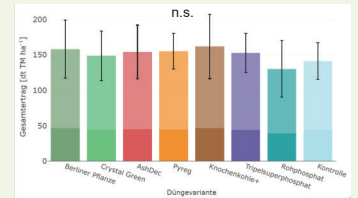
## Mais – 2021/2022 / Warstein

→ Kein signifikanter Effekt der Düngevariante auf den Ertrag

### Maiserträge 2021

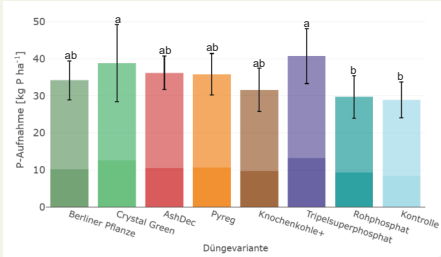


### Maiserträge 2022



## Mais – 2021 / Warstein

### P-Aufnahmen zur Ernte



- Signifikanter Effekt durch **Crystal Green** auf die P-Aufnahme
- zurückzuführen auf höhere P-Gehalte, wobei hier auch **AshDec** signifikant die Kontrolle überstieg
- Im zweiten Jahr nicht mehr nachweisbar

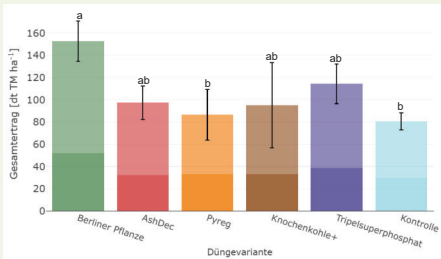
## Mais – 2021 / Halle

### Geringe Bestandesdichten (links), sichtbare Unterschiede in der Pflanzenlänge (rechts)



## Mais – 2021 / Halle

### Gesamterträge zur Ernte



- Signifikanter Effekt durch die **Berliner Pflanze** auf den Ertrag und die P-Aufnahme
- Im zweiten Jahr nicht nachweisbar

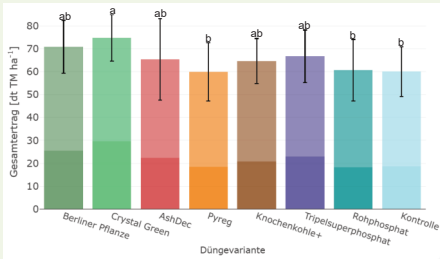
## Kleegras





## Klee gras – 2021 / Warstein

### Kumulierter Gesamtertrag aus zwei Schnitten

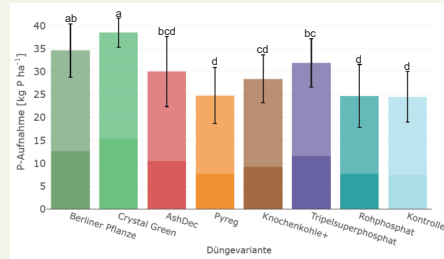


- Signifikanter Effekt durch **Crystal Green** auf den Ertrag
- Effekt im zweiten Jahr nicht mehr beobachtet



## Klee gras – 2021 / Warstein

### Kumulierte P-Aufnahme aus zwei Schnitten



- Signifikanter Effekt durch **Crystal Green** auf die P-Aufnahme
- Zurückzuführen auf Unterschiede in den P-Gehalten, wobei hier auch **AshDec** signifikant die Kontrolle überstieg
- Im zweiten Jahr nicht mehr nachweisbar



## Öko-P: Bodenproben

### Sequentielle P-Extraktion (Tiessen & Moir 1993)

- verschiedene Extraktionsschritte mit steigender Stärke der Lösungsmittel
- Aufteilung des Gesamt-P im Boden auf 5 verschiedene Fraktionen

→ **Recyclingdüngern (Crystal Green und AshDec) haben Effekt auf die pflanzenverfügbaren P-Gehalte der Böden**

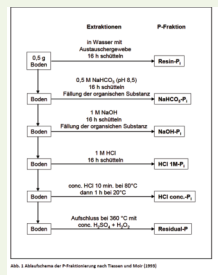


Abb. 1. Abtrennung der P-Fraktionierung nach Tiessen und Moir (1993)



## Zusammenfassung der Ergebnisse

- Im **ersten Versuchsjahr (2021)**
  - signifikante Ertragseffekte von **Crystal Green** bei Klee gras sowie
  - signifikante Effekte der **Struvite** auf die **P-Aufnahmen** und **-Gehalte** bei Mais und Klee gras festgestellt
- Im **zweiten Versuchsjahr (2022)** konnten diese Effekte nicht beobachtet werden
- In **beiden Versuchsjahren**: anfängliche, signifikante Effekte von **Struviten** auf Pflanzenlänge und -durchmesser bei Mais (bei Ernte nicht mehr nachweisbar)
- Hohes Ertragsniveau auch ohne Düngung (Ausnahme: Klee gras im ersten Versuchsjahr) → **P war scheinbar nicht ertragslimitierend**



## Fazit und Ausblick

- Die Versuchsdaten deuten auf
  - eine **gute Pflanzenverfügbarkeit** des P aus **Struviten**
  - einen Einfluss in der **Jugendentwicklung von Mais** hin (Ertragssicherung, nicht –steigerung)
- Diese Effekte konnten bei den anderen Rezyklaten nicht nachgewiesen werden, hier soll der Langzeiteffekt über mehrere Jahre weiter beobachtet werden
- Gängige Analysemethoden (CAL) sollten hinterfragt werden (**organischer P wird nicht erfasst**)
- Bedarf an Praxisversuchen auf tatsächlichen P-Mangelstandorten



## bio-basedPhorN

### Hintergrund

- Struvit könnte eine nachhaltige Alternative zu herkömmlichen P-Düngern im Ökolandbau darstellen
- Menge an Struvit aus Kläranlagen ist begrenzt (nur Kläranlagen ohne chemische Fällmittel)

### Fragestellung und Ansatz

- Kann Struvit aus anderen Ausgangsstoffen, wie Gülle und Gärresten gewonnen werden?
- Vorhandene Technologien zur Gülleaufbereitung untersuchen (P- und N-Rückgewinnung, N-Verluste, Düngewirksamkeit)

### Ziel

- Ungleichverteilung von Nährstoffen durch organische Düngemittel entschärfen
- Transportwürdige und nährstoffreiche Düngemittel aus Gülle und Gärresten gewinnen
- Die Nährstoffeffizienz der Betriebe durch on-farm Rückgewinnung erhöhen



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!





# Phosphorrecyclingdünger für den Ökolandbau

## Grundproblematik:

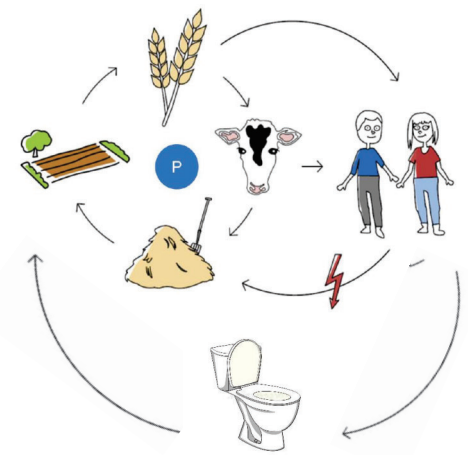
- **P-Defizite** sind vor allem im Ökolandbau ein zunehmendes Problem
- Die Möglichkeiten negative P-Bilanzen auszugleichen sind auf organische Dünger und Rohphosphate begrenzt
- Die **P-Reserven weltweit werden knapp** und verfügbare P-Dünger haben oft eine geringe Düngewirkung und zeigen hohe Schwermetallgehalte
- Es müssen nachhaltige Düngeprodukte gefunden werden, die den Kreislaufgedanken des Ökolandbaus gerecht werden und eine **Alternative zu herkömmlichen Phosphordüngern** darstellen!

## Mögliche Alternative: Phosphorrecycling aus Klärschlamm

- Seit einigen Jahren wird zunehmend an der **Phosphorrückgewinnung aus Kläranlagen** geforscht
- Schließt den Nährstoffkreislauf überbetrieblich
- Es existieren bereits eine Vielzahl an Produkten aus verschiedenen Herstellungsverfahren mit unterschiedlichen Eigenschaften (P-Gehalten, Pflanzenverfügbarkeit, Schadstoffgehalten etc.)
- Bislang wenig praxisnahe Feldversuche unter den Bedingungen des Ökolandbaus bislang rar

## Untersuchte P-Recyclingdünger im Projekt

Produkttyp	Struvit		Karbonisat	Asche	Kohle
Name	Crystal Green	Berliner Pflanze	Pyreg	AshDec	KnochenKohle+
Verfahren	Kristallisationsverfahren		Karbonisierung	Thermische Behandlung	Pyrolyse
Ausgangsstoff	Klärschlammwasser	Klärschlamm	Klärschlamm	Klärschlamm-asche	Knochenchips
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -Gehalt	25%	25%	14%	17%	25%
					



Überbetrieblicher P-Kreislauf (Quelle: Bioland, nurec4org)

## Versuchsaufbau:

- 3 Standorte mit starkem P Mangel (Versorgungsstufe A)
- Einmalige Düngung im Frühjahr 2021
- Klee gras
- Mais

		2020		2021										2022												
		Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Juli	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Juli	Aug	Sep	Okt	
Analyse	Bodenproben	X																X								X
	Pflanzenanalyse								X	X	X							X				X	X	X		
Durchführung	Versuch 1 (FF1)	Zwischenfrucht			Klee gras										Mais											
	Versuch 2 (FF2)	Zwischenfrucht			Mais				?	?	?	?	?	?	?	?	Klee gras									
Düngung						P VF1		P VF2	N VF2																	N VF2

## Versuchsfragen:

Wie können diese Produkte sinnvoll in einer **Fruchtfolge integriert** werden?

Wie ist der **Langzeitdüngeneffekt**?

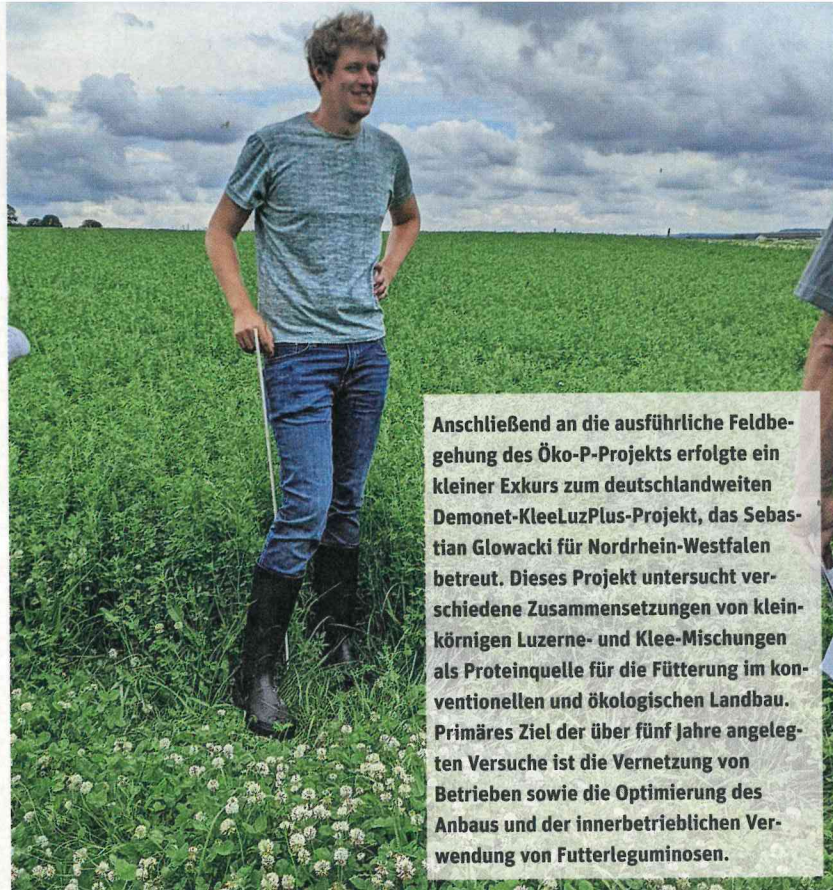
Wie wirkt sich die Düngung auf den **P-Gehalt der Pflanzen** aus?

Wie wird die **N-Fixierung der Leguminosen** durch die Recyclingdünger beeinflusst?





Die P-Rezyklate werden entweder direkt aus dem Klärschlamm, dem durch Entwässerung anfallenden Klärwasser oder der Klärschlamm- asche gewonnen. Dabei unterscheiden sie sich nicht nur anhand des Herstellungsverfahrens, sondern auch durch den Phosphorgehalt und die spätere Pflanzenverfügbarkeit. Für das Projekt wurden die einzelnen Produkte auf Verunreinigungen und Schadstoffe überprüft, sodass ein späteres Zulassungsverfahren als Düngemittel möglich ist.



Anschließend an die ausführliche Feldbe- gehung des Öko-P-Projekts erfolgte ein kleiner Exkurs zum deutschlandweiten Demonet-KleeLuzPlus-Projekt, das Sebastian Glowacki für Nordrhein-Westfalen betreut. Dieses Projekt untersucht ver- schiedene Zusammensetzungen von klein- körnigen Luzerne- und Klee-Mischungen als Proteinquelle für die Fütterung im kon- ventionellen und ökologischen Landbau. Primäres Ziel der über fünf Jahre angeleg- ten Versuche ist die Vernetzung von Betrieben sowie die Optimierung des Anbaus und der innerbetrieblichen Ver- wendung von Futterleguminosen.

## Phosphor-Recycling im Feldversuch

Am 29. Juni fand die erste von mehreren bis in den Herbst hinein geplanten Feldbegehungen des Öko-P-Projekts der Landwirtschaftskammer NRW auf dem Biolandhof von Christian Kroll-Fiedler in Warstein statt.

Seit einigen Jahren wird an der Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm als alternative Phosphor-

quelle für die Landwirtschaft geforscht. Das Öko-P-Projekt der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen testet erstmals praxisnah auf drei Ökolandbetrieben fünf verschiedene Recyclingprodukte, sogenannte P-Rezyklate, hinsichtlich ihrer (Dünge-) Wirksamkeit, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit. Am 29. Juni wurden die einzelnen Düngemittel vorgestellt und

die Versuchsfläche vor Ort besichtigt. Mit dabei waren die Landwirte der drei Bioland-Versuchshöfe Christian Kroll-Fiedler, Hermann Künsemöller und Carsten Weber. Projektmanagerin Hannah Fischer stellte das Projekt, unterstützt von ihren studentischen Hilfskräften Tim Wantulla und Charlotte Klimpel, vor.

*Charlotte Klimpel*

**Christian Kroll-Fiedler erklärte zum Bewuchs der einzelnen Parzellen, dass vor allem kurz nach dem Auflaufen Unterschiede zwischen den einzelnen Parzellen und somit zwischen den Düngemitteln festgestellt werden konnten.**

Fotos: Charlotte Klimpel

Um nicht nur einen oberflächlichen Blick auf den Bestand zu werfen, entnahm Demeter-Landwirt Stefan Bonin einen Erdaushub. Dabei zeigten sich ein aktives Bodenleben und ein gesundes Wurzelwerk. Es wurden weitere Fragen aufgeworfen, unter anderem: Welchen Einfluss haben Mikroorganismen oder der Bodentyp auf die Pflanzenverfügbarkeit von P-Rezyklaten? Einige Fragen werden vermutlich noch durch die geplanten Laboranalysen der Bodenproben, Düngemittel und der P-Fraktionierung im Boden geklärt werden.





## Leitsystem für Wandertouren

### ELER-gefördertes Projekt in Brandenburg

Findlinge und große Feldsteine prägen die Landschaft Brodowins im brandenburgischen Landkreis Barnim. Mithilfe einer ELER-Förderung hat der Verein „[Ökodorf Brodowin e. V.](#)“ ein Besucherleitsystem mit einer vor Ort oder digital erhältlichen Wanderbroschüre realisiert. Runde Metalltafeln auf den Felsen informieren über Natur, Geologie, Ökolandbau, Geschichte und Bewohner der Region im Südosten des Biosphärenreservates Schorfheide-Chorin. Die Broschüre liefert tiefergehende Informationen. Farbige Steinwegweiser [leiten durch fünf unterschiedlich lange Wandertouren](#).

## ZukunftsMUT für die Kinder- und Jugendfeuerwehr Dornbock

### Gemeinschaftsgefühl trotz Corona

Die ehrenamtlichen Mitglieder der Freiwilligen Ortsfeuerwehr Dornbock in Sachsen-Anhalt haben ihre Jugendarbeit während der Corona-Pandemie nicht eingestellt. Digitale Plattformen ermöglichten gemeinsame kreative Nachmittage. Von Tür zu Tür brachten sie Bastelmaterial zu den jungen Mitgliedern. Höhepunkt war ein Sommerlager, bei dem Kinder und Jugendliche des Ortes im Alter von fünf bis 18 Jahren ein [Zeltwochenende in Dornbock](#) erleben konnten. Eine Dorfrallye, ein Lagerfeuer und ein Feuerwehrmuseum weckten das lange vermisste Gemeinschaftsgefühl. Die Deutsche Stiftung für Engagement und Ehrenamt (DSEE) hat dieses Vorhaben der Jugendfeuerwehr im Rahmen des Programms ZukunftsMUT gefördert. Mit den Mitteln finanzierte die Feuerwehr ein Mannschaftszelt, Erinnerungspräsentate und einen Hindernisparcours.

## Innovative Azubi-Mobilität

### Verbundprojekt erprobt neue Konzepte

Im Kreis Coesfeld können Auszubildende Betriebe in ländlichen Regionen durch passgenaue Mobilitätslösungen erreichen. Möglich macht dies das Verbundprojekt des Bundesprogramms Ländliche Entwicklung (BULE) „Steigerung der Azubi-Mobilität durch Innovative Lösungen“ (SAIL). Das Projekt erweitert das Mobilitätsangebot und soll so dazu beitragen, Fachkräfte zu gewinnen und dadurch die regionale Wirtschaftskraft zu fördern. In einem [Online-Leitfaden](#) informiert die „Wirtschaftsförderung Kreis Coesfeld GmbH“ über das Projekt.

## Neue Wege der forstlichen Beratung und Betreuung

### Verbundprojekt soll neuen Bedarf ermitteln

In einem [Forschungsprojekt](#) ermittelt die Arbeitsgemeinschaft Deutscher Waldbesitzerverbände (AGDW) gemeinsam mit der Fachhochschule Erfurt und dem Bundesverband der Freiberuflichen Forstfachverständigen den Bedarf bei der forstlichen Beratung und Betreuung im Privatwald. Forschende befragen dafür Unternehmen und forstwirtschaftliche Zusammenschlüsse nach ihren Bedürfnissen. Die Erkenntnisse bilden die Grundlage für angepasste Konzepte für Beratung (beispielsweise Waldschutz, Naturschutz oder Jagd) und Betreuung (zum Beispiel Maßnahmenplanung, Auszeichnen, Holzaufnahme). Fördermittel für das Projekt stellen das Bundeslandwirtschaftsministerium und die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) zur Verfügung.

## Phosphor-Dünger im Ökolandbau

### EIP-Projekt sucht Alternativen zu Rohphosphaten

Seit einigen Jahren wird intensiv an der Rückgewinnung von Phosphor in der Abwasseraufbereitung geforscht. Die hieraus entstehenden phosphorhaltigen Recycling-Dünger (P-Rezyklate) sollen umstrittene Rohphosphate im Ökologischen Landbau ersetzen und Nährstoffkreisläufe möglichst lokal schließen. Im [Öko-P Projekt](#) erprobt die Landwirtschaftskammer NRW hierfür zusammen mit ökologischen Praxisbetrieben verschiedene Rezyklate aus unterschiedlichen Herstellungspfaden unter Praxisbedingungen. Das Projekt im Rahmen von EIP-Agri wird aus ELER-Mitteln gefördert.

## Impressum

Deutsche Vernetzungsstelle Ländliche Räume (DVS)  
in der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE)  
Deichmanns Aue 29 • 53179 Bonn  
Telefon: 0228 6845-2945 • Fax: 0301810 6845-3361  
E-Mail: [dvs\\_online@ble.de](mailto:dvs_online@ble.de) • [www.landaktuell.de](http://www.landaktuell.de)  
Zuständige Verwaltungsbehörde: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL)

*Zur Gleichbehandlung der Geschlechter bemühen wir uns um eine genderneutrale Schreibweise.*

Bildnachweise: Titelbild: © Fotoline / photocase.de  
In Rubriken verwendete Bilder:  
© photocase.com: [seitenweise/giftgrün](#), [ohbauer/a.gebetsroither](#), [neugkeiten/ibild](#), [im Rampenlicht/n-loader](#), [Oh Bauer.../daumenkino](#).  
© istockphoto.com: [Pavliha](#), [Djapeman](#), [MickeyCZ](#).



## **Versuch der Landwirtschaftskammer NRW – „Phosphor-Rezyklierung im ökologischen Landbau“**

In dem Projekt „Alternative Phosphordünger (P-Rezyklate) zur Ertragssteigerung von Leguminosen und Getreide im ökologischen Landbau“ erproben die Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, die Technische Hochschule Bingen und die Universität Bonn verschiedene P-Rezyklate auf ökologischen Betrieben. In dreijährigen Fruchtfolgen mit Mais und Klee gras soll der Langzeitdüngeneffekt untersucht werden.

Ziel ist es, die Rezyklat-P-Dünger in ein Gesamtkonzept für eine ökologische Fruchtfolge zu integrieren. Das Konzept soll auf seine Wirksamkeit, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit hin überprüft werden. Im Test sind „Struvit“, „Karbonisat“, Asche und Kohle. Die Recycling-Dünger wurden mit unterschiedlichen Verfahren aus den Ausgangsstoffen Klärschlamm, Klärschlamm-Wasser oder Klärschlamm-Asche gewonnen. Eine Ausnahme bildet die Kohle, die aus Knochenchips stammte.

Die vorläufigen Ergebnisse weisen darauf hin, dass die P-Rezyklate insbesondere an Standorten mit deutlichem P-Mangel eine ähnlich gute Düngewirkung zeigen wie Triplesuperphosphat, das im Ökolandbau nicht zugelassen ist. Auch die Ergebnisse der Schadstoffanalysen ergaben, dass die Gehalte an Schwermetallen und organischen Schadstoffen in „Struvit“, „Karbonisat“, Asche und Kohle unter den Grenzwerten lagen.

Projekt: <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/oekolandbau/versuche/oeko-p.htm>, finanziert aus dem Programm der Europäischen Innovationspartnerschaft (EIP), integrativer Bestandteil des NRW-Programms Ländlicher Raum 2014-2020

Kontakt: Hannah Fischer, Tel.: 0221/5340-487, [hannah.fischer@lwk.nrw.de](mailto:hannah.fischer@lwk.nrw.de)

## **Versuch der Landwirtschaftskammer Niedersachsen: „‘Struvit‘ im Praxiseinsatz“**

Die Landwirtschaftskammer Niedersachsen geht seit 2021 in dem Projekt „Einsatz teil- und vollaufbereiteter organischer Nährstoffträger“ der Frage nach, ob und wie sich „Struvit“ für die Praxis eignet. Auf vier Pilotbetrieben wurden Demonstrationsflächen angelegt. Vorweg wurden die Betriebsleiter gefragt, welche Anforderungen sie an den Einsatz von aufbereiteten Düngemitteln wie „Struvit“ haben.

An erster Stelle steht für die Betriebe, dass Recycling-Dünger nicht teurer als handelsüblicher Mineraldünger ist und sich mit der betriebseigenen Technik ausbringen lässt. Auch eine gleichbleibende Qualität ohne schwankende Nährstoffgehalte ist den Betrieben wichtig. Zudem wünschen sie sich Liefersicherheit, keine Rückstände und eine gute Nährstoffverfügbarkeit.

Die im Versuch eingesetzten „Struvit“-Dünger hatten hohe P-Gehalte bei gleichzeitig geringem N-Gehalt, waren streufähig und wiesen nur sehr geringe Mengen an Schwermetallen auf. Die ersten Versuche zeigten auch, dass die Dosierung und Querverteilung mit Schleuderstreuer und Unterfußdüngung funktioniert. Es gab vereinzelt



Mobile Schlachteinheit der OG „Extrawurst“

der ältesten Nutzpflanzen der Erde, den Hanf, etabliert. Dabei stehen Molkereiprodukte, Fasern, Öle, Saatgut und Nüsse im Fokus. Die OG „Hanfanbauer Werra-Meißner“ hat sich zum Ziel gesetzt, den Hanfanbau im Werra-Meißner-Kreis möglichst ganzheitlich aufzusetzen: vom Anbau über die Verarbeitung bis zur Vermarktung. Wirken alle diese Bereiche schon in der Pilotphase zusammen, lassen sich mögliche Hemmnisse besser überwinden. So ermöglichen sie gemeinsam eine nachhaltige Wertschöpfung mit landwirtschaftlichen Produkten in der Region.

### Zu neuen rechtlichen Rahmenbedingungen beitragen

Unterschiedliche Pilotprojekte zeigen, dass EIP-Agri zu Änderungen im nationalen oder sogar im europäischen Recht beitragen kann, was die Situation für Landwirte substantiell verbessert. Ein herausragendes Beispiel hierfür ist die OG „Extrawurst“. Im hessischen Projekt beschäftigten sich die Akteure von 2017 bis 2019 mit dem Schlachtverfahren für Rinder – unter Einhaltung aller Vorschriften der gewerblichen Schlachtung. Dabei legten sie wichtige Grundsteine für die neue EU-Regelung zur „Mobilen Schlachtung im Herkunftsbetrieb“. Diese regelt europaweit die Schlachtung von Rindern, Schweinen und Einhufern unter Nutzung einer mobilen Schlachteinheit. Die OG

entwickelte eine teilmobile Schlachteinheit, um Lebetiertransporte zu vermeiden und Stress bei den Tieren zu reduzieren – indem der Schlachter direkt zum Rind kommt. Ein weiteres zentrales Ergebnis ist die Erstellung einer Leitlinie für die teilmobile Schlachtung von Rindern, die diverse Check- und Kontrolllisten enthält, frei zur Verfügung steht und bundesweit angewandt wird.

Weitere Beispiele für EIP-Projekte, die zur Anpassung rechtlicher Rahmenbedingungen beitragen: die OG „Öko-P“ aus Nordrhein-Westfalen und die OG „Getreidepopulationen“ aus Hessen. Das Team von „Öko-P“ erprobt fünf verschiedene Phosphor-Recyclingprodukte, sogenannte P-Rezyklate, um sie im ökologischen Landbau als Dünger einzusetzen. Die effektivsten Dünger sollen in ein für eine ökologische Fruchtfolge sinnvolles Gesamtkonzept eingehen. Bei positiver Prüfung will die OG die Zulassung von Rezyklat-P-Düngern im Ökolandbau unterstützen (Düngemittelrecht, EG-Öko-Verordnung). Die OG „Getreidepopulationen“ untersuchte die Praxistauglichkeit, die Leistungsfähigkeit und die Akzeptanz von Getreide-Populationen. Dabei analysierte und optimierte sie auch die Methoden zur Entwicklung und züchterischen Verbesserung. Seine Daten stellte das Projektteam für eine fundierte Bewertung der rechtlichen Bestimmungen des EU-Experiments zu Populationen bereit.





# ÖKO-P: PHOSPHOR-REZYKLATE

- eine Alternative für den Ökolandbau?



Europäischer Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums:  
Hier investiert Europa in die ländlichen Gebiete unter Beteiligung des Landes Nordrhein-Westfalen

Landwirtschaftskammer  
Nordrhein-Westfalen

Ministerium für Landwirtschaft  
und Verbraucherschutz  
des Landes Nordrhein-Westfalen



PARTICIPATING IN



eip-agri  
AGRICULTURE & INNOVATION

funded by

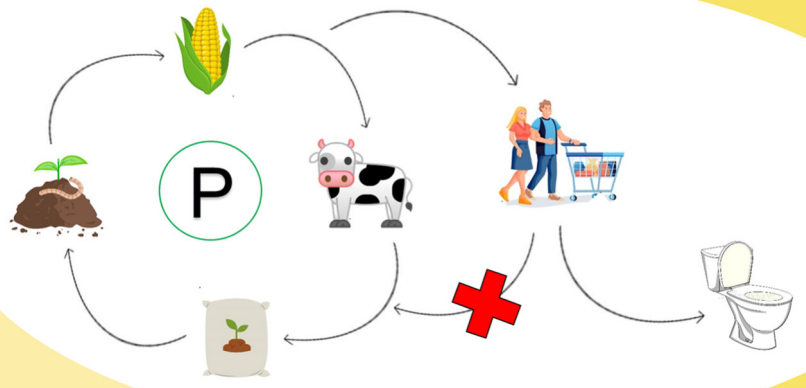




# INHALTSVERZEICHNIS

1	HINTERGRUND.....	2
2	LÖSUNGSANSATZ.....	3
3	P-RÜCKGEWINNUNG AUS ABWASSERN UND KLÄRSCHLAMM .....	4
4	ÖKO-P: PRAXISVERSUCHE IM ÖKOLANDBAU .....	6
	4.1 UNTERSUCHTE P-REZYKLATE.....	7
	4.2 ERGEBNISSE .....	8
	4.3 FAZIT .....	10
5	AUSBLICK .....	11





# 1 HINTERGRUND

Zwar ist es der Kerngedanke des Ökolandbaus, durch eine nachhaltige Wirtschaftsweise Ressourcen zu schonen und betriebsinterne Nährstoffkreisläufe zu stärken, doch insbesondere bei stark spezialisierten Betrieben verlassen mit dem Verkauf von Produkten mehr Nährstoffe den Betrieb als rückgeführt werden und es entstehen negative Nährstoffbilanzen. Insbesondere bei Phosphor (P) ist dies ein zunehmendes Problem.

Zeitgleich ist der Ökolandbau limitiert in seinen Möglichkeiten diese Defizite auszugleichen. Die P-Zufuhr ist hier im Wesentlichen auf Wirtschaftsdünger und weicherdige Rohphosphate begrenzt. Letztere stehen aus verschiedenen Gründen zunehmend in der Kritik. Denn für die Phosphorversorgung der Böden ist die ökologische sowie konventionelle Landwirtschaft in Deutschland vollständig auf Rohphosphat-Importe aus dem EU-Ausland, insbesondere aus Marokko, Russland und Algerien, angewiesen. Mit Blick auf die aktuellen geopolitischen Entwicklungen ist diese Importabhängigkeit problematisch und eine konstante Verfügbarkeit dieses fossilen und somit endlichen Rohstoffs fraglich.

Auch produktionstechnisch ist die Anwendung der Rohphosphate umstritten, da diese eine geringe Pflanzenverfügbarkeit aufweisen und je nach Herkunft beachtliche Mengen an Blei, Cadmium und Uran enthalten können, die mit der Düngung in die Böden eingetragen und von Pflanzen aufgenommen werden.



**Abb. 1:** Abbau von Rohphosphat in einer Phosphatmine  
(Quelle: BrianBrownImages via Getty Images)



# 2 LÖSUNGSANSATZ: P-RECYCLING AUS KLÄRSCHLAMM UND ANDEREN RESTSTOFFEN



(Quelle: Ostara, 2019)



Berechnungen zeigen, dass mit organischen Düngern und Reststoffen ca. 70 % des P-Bedarfs der deutschen Pflanzenproduktion gedeckt werden könnten (siehe Tab. 1). Zeitgleich wird dieser Ansatz durch die Klärschlammverordnung (*AbfKlär 2017*) unterstützt, die Kläranlagen dazu verpflichtet ab 2029 bzw. 2032 Phosphor rückzugewinnen.

Deshalb wird seit einigen Jahren intensiv an der Rückgewinnung von Phosphor in der Abwasseraufbereitung geforscht. Die hieraus entstehenden phosphorhaltigen Recycling-Dünger (P-Rezyklate) entsprechen dem Kreislaufgedanken des Ökologischen Landbaus und können eine nachhaltige Alternative zu dem umstrittenen Rohphosphat darstellen. Nährstoffkreisläufe können somit auf regionaler Ebene über die kommunale Abwasserreinigung geschlossen und Ressourcen geschont werden. Einige dieser Produkte wurden bereits in Gefäßversuchen auf ihre Wirksamkeit getestet, doch praxisnahe Feldversuche unter den Bedingungen des Ökolandbaus sind hierzu bislang rar.

	P(1.000 t)
<b>Bedarf</b>	533 (davon ökologisch: ca. 8,07, bei 30% ökologisch: ca. 25)
<b>Anfall</b>	
Wirtschaftsdünger	202
Gärreste (mit Gülle)	73
Kompost	6
Klärschlämme	16
Tierische Nebenprodukte	9
Erntereste	74
<b>Summe Anfall</b>	380
<b>Saldo</b>	-153

**Tabelle 1:** P-Bedarf der deutschen Pflanzenproduktion und P-Anfall verschiedener Reststoffe (BMEL 2021, Kabbe 2015, DBU 2018)

# 3 P-RÜCKGEWINNUNG AUS ABWASSERN UND KLÄRSCHLAMM

Grundsätzlich gibt es verschiedene Ansatzpunkte in kommunalen Kläranlagen, an denen Phosphor rückgewonnen werden kann. Die daraus entstehenden Produkte unterscheiden sich in ihren P-Gehalten, Pflanzverfügbarkeit, Ressourcenverbrauch und weiteren Eigenschaften. Welche Verfahren sich hier durchsetzen werden ist offen und wird maßgeblich durch die Gesetzgebung und auch durch die Nachfrage und Marktentwicklung beeinflusst. Grob lassen sich die Verfahren jedoch in 4 verschiedene Ansatzpunkte einteilen:

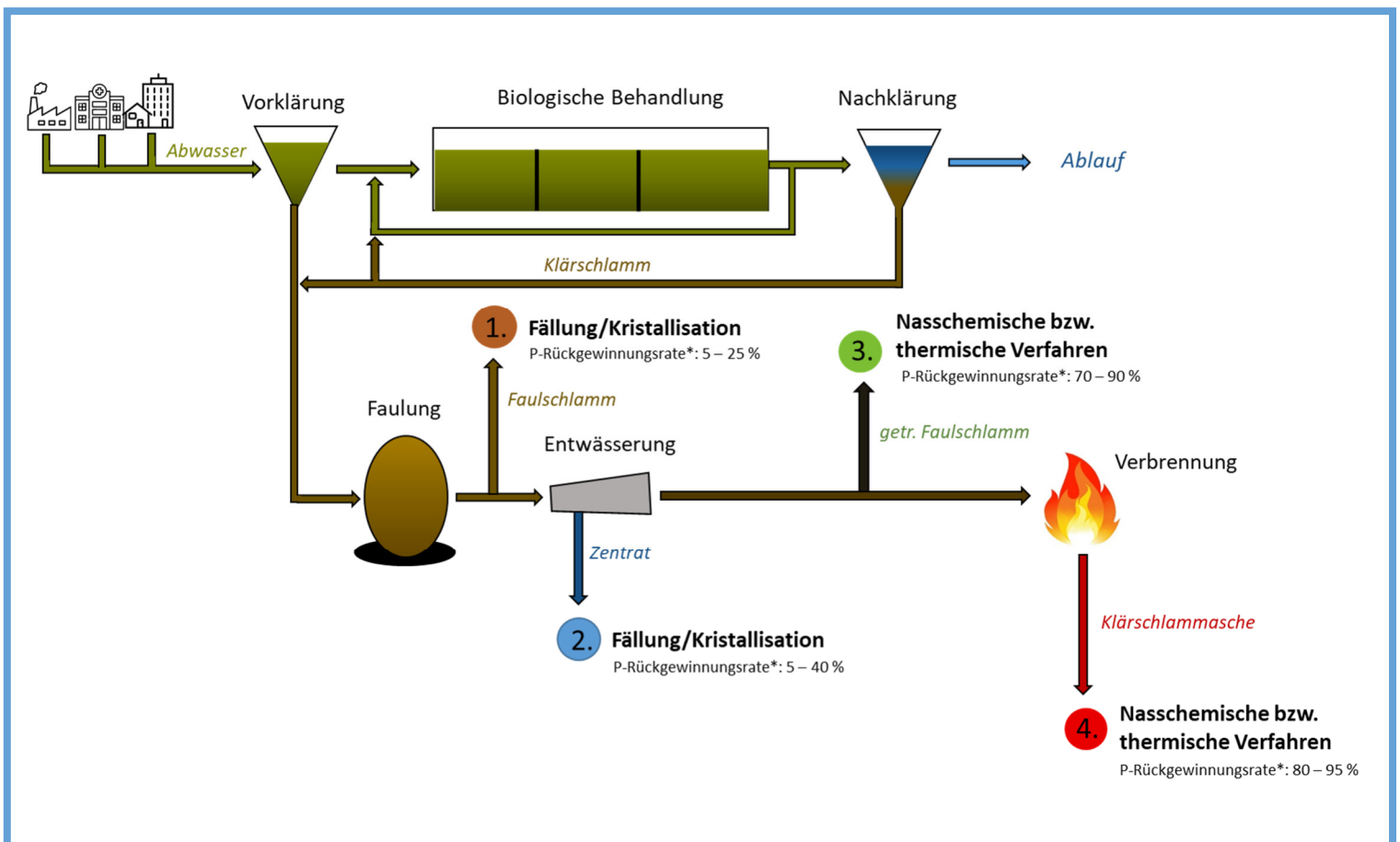


Abb. 2: Ansatzpunkte zur P-Rückgewinnung im Kläranlagenablauf (Öko-P, 2022)

### 1. Klärschlamm:

**Fällung/Kristallisation** von P-Mineralverbindungen (MAP/Struvit oder Ca-P) durch die Zugabe von Salzen (z.B. Mg- oder Ca-Salze); ggf. pH-Anhebung.

Für höhere Rückgewinnungsraten: P-Rüchlösung aus der festen Phase durch anaerobe Behandlung (Faulung), thermische Hydrolyse oder chemische Behandlung möglich.

+ Schwermetalle und andere Schadstoffe verbleiben im Klärschlamm.

+ Verfahren sind leicht integrierbar und beugen Verkrustungen in Kläranlagen vor

- P-Rückgewinnungsrate\* von ca. 5-15%

### 2. Schlammwasser/Zentrat (nach Entwässerung):

Verfahren ähnlich zu 1., allerdings können Additive gezielter hinzudosiert werden.

+ Durchlaufzeit verkürzt

+ P-Rückgewinnungsraten\* höher als bei 1. (5-25%)

### 3. Entwässerter bzw. getrockneter Klärschlamm:

Verschiedene **nasschemische bzw. thermochemische Verfahren.**

Je nach Ausgangsmaterial, Temperaturführung und Additiven in Kläranlagen werden Düngemittel aus mineralischem P in unterschiedlichen Zusammensetzungen gewonnen (Einfluss auf Pflanzenverfügbarkeit und Schwermetallentfrachtung).

+ organische Schadstoffe werden durch hohe Temperaturen vollständig zerstört

- hohe P-Rückgewinnungsraten\* von ca. 70—90%

- andere Nährstoffe werden zerstört

- bei unvollständiger Verbrennung können Schadstoffe entstehen

### 4. Klärschlammasche (nach Mit- bzw. Monoverbrennung):

- Phosphor in Klärschlammaschen ist ohne weitere Verarbeitung/Aufschluss schlecht pflanzenverfügbar.

Verschiedene **nasschemische bzw. thermochemische Verfahren** für Aufschluss nötig.

+ Organische Schadstoffe werden durch hohe Temperaturen vollständig zerstört.

+ Hohe Rückgewinnungsrate von ca. 80—98%

# 4 ÖKO-P: PRAXISVERSUCHE IM ÖKOLANBAU

## Fragestellung:

*Wie wirksam sind verschiedene P-Rezyklate unter den Praxisbedingungen des Ökolandbaus?*

*Wie ist der Langzeitdüngeneffekt über eine komplette Fruchtfolge?*

*Wie können diese Produkte sinnvoll in eine Fruchtfolge integriert werden?*

## Zeitraum:

07/2020 - 12/2022

## Projektpartner und assoziierte Partner:

- 3 ökologische landwirtschaftliche Betriebe in NRW
- Rheinische Friedrich - Wilhelms - Universität Bonn
- Technische Hochschule Bingen

## Versuchsaufbau und –methoden:

- 3 Standorte mit P-Mangel auf Praxisbetrieben
- Vergleich von 5 Rezyklaten zu Mineraldüngern
- Düngeneffekt bei Klee gras und Mais über zwei Jahre: Ertrag und Nährstoffgehalte



# 4.1 ÖKO-P: UNTERSUCHTE P-REZYKLATE

	Struvit		Karbonisat	Asche	Kohle
<b>Name</b>	Crystal Green	Berliner Pflanze	Pyreg	AshDec	KnochenKohle+
<b>Verfahren</b>	Kristallisationsverfahren		Karbonisierung	Thermische Behandlung	Pyrolyse
<b>Ausgangsstoff</b>	Klärschlammwasser	Klärschlamm	Klärschlamm	Klärschlamm- asche	Knochenchips
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Gehalt</b>	25%	25%	14%	17%	25%
					

Tabelle 2: untersuchte P-Rezyklate im Öko-P Projekt, Herstellungsverfahren, Ausgangsstoff und P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Gehalt (Öko-P, 2021)

## Auswahlkriterien für die Untersuchung im Projekt:

- Deutliche Verbesserung zu herkömmlichen Rohphosphaten
  - ⇒ bessere Ökobilanz (kürzere Transportwege, möglichst wenig Energie- und Ressourcenverbrauch in der Herstellung, etc.)
  - ⇒ geringe Schadstoffgehalte
  - ⇒ bessere Wirksamkeit (nachgewiesen durch Gefäßversuche)
  - ⇒ Verfügbarkeit von ausreichenden Mengen



# 4.2 Öko-P:

## ERGEBNISSE

### Qualität und Sicherheit der Rezyklate:

Je nach **Verfahren** und **Ausgangsstoff** liegt Phosphor (P) in den Rezyklaten in unterschiedlichen Formen - als Ca-P, Struvit ( $MgNH_4PO_4$ ), etc. - vor. Diese Verbindungsformen beeinflussen maßgeblich die **Verfügbarkeit** des Phosphors für die Pflanzen.

Das Herstellungsverfahren hat außerdem Einfluss auf die **Schadstoffgehalte** der Rezyklate: Bei thermischen Verfahren werden die Produkte so hoch erhitzt, dass alle organischen Schadstoffe verbrannt werden. Schwermetalle verbleiben auch bei hohen Temperaturen im Produkt und müssen nachträglich entfernt werden. Bei Kristallisations- und Fällungsverfahren dagegen verbleiben die Schwermetalle in den Ausgangsstoffen und gelangen nicht ins Produkt.

⇒ **Alle vorgeschriebenen Schadstoffgrenzen der DüMV und AbfklärV wurden von den hier untersuchten Rezyklaten eingehalten**

### Phosphor im Boden:

Phosphor liegt im Boden in unterschiedlichen **Fractionen** vor: manche Fractionen sind dabei direkt für die Pflanze verfügbar, andere können – je nach Kulturart – durch die Pflanzen mobilisiert werden und wieder andere sind so stark gebunden, dass sie weitestgehend nicht für die direkte Pflanzenernährung genutzt werden können.

Untersuchungen der unterschiedlichen P-Fractionen im Boden nach einer Vegetationsperiode mit Mais nach einer Düngung mit den Rezyklaten zeigten, dass:

- ⇒ **direkt pflanzenverfügbare Reserven im Boden wurden durch die Rezyklate (Crystal Green und AshDec) aufgefüllt**
- ⇒ **P aus wasserlöslichen Mineraldünger hingegen wurde im Boden gebunden und lag nach der ersten Vegetationsperiode in gebundenen Formen vor, die von den Pflanzen mobilisiert werden müssen**



Abb. 3: Öko-P Versuchsflächen (Mais und Klee gras) in Warstein 2021



### Düngeeffekt bei Klee gras:

Untersucht wurde die Entwicklung und der Ertrag im Jahr der Düngung (2021 direkt zu Klee gras) und ein Jahr nach der Düngung (2022 Folgefrucht nach gedüngtem Mais):

- ⇒ insbesondere im ersten Jahr (2021) konnten nach einer direkten Düngung mit Struvit (Crystal Green) signifikant höhere TM-Erträge (dt/ha) erzielt werden (Abb. 4)
- ⇒ auch der P-Entzug nach einer Düngung mit Struvit (Crystal Green) war signifikant höher
- ⇒ die anderen untersuchten Rezyklate hatten keinen signifikanten Einfluss

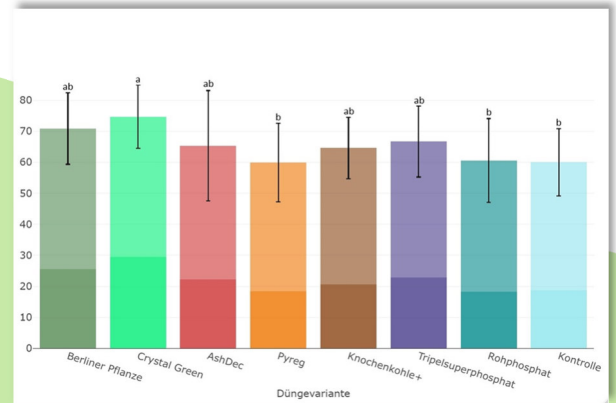


Abb. 4: Klee gras TM-Ertrag (dt ha<sup>-1</sup>) 2021

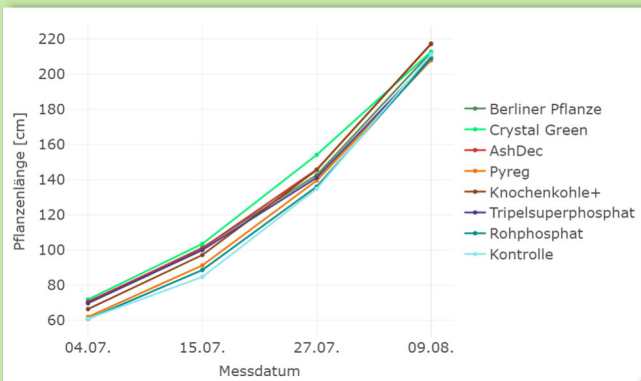


Abb. 5: Pflanzenlänge [cm] während der Vegetationsperiode 2021

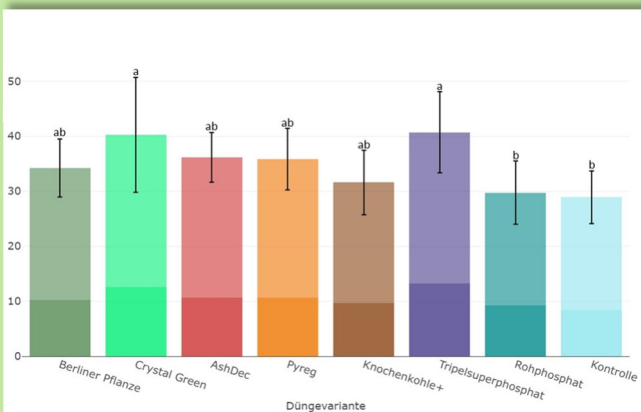


Abb. 6: P-Entzug (kg P ha<sup>-1</sup>) bei Mais 2021

### Düngeeffekt bei Mais:

Untersucht wurde die Entwicklung und der Ertrag im Jahr der Düngung (2021 direkt zu Mais) und ein Jahr nach der Düngung (2022 Folgefrucht nach gedüngtem Klee gras):

- ⇒ während der Jugendentwicklung im Mais konnten in beiden Jahren signifikante Unterschiede in der Entwicklung festgestellt werden (Abb. 5)
- ⇒ zum Zeitpunkt der Ernte waren keine Unterschiede mehr erkennbar, auch die Pflanzen ohne Düngung konnten einen ähnlich hohen Ertrag erzielen
- ⇒ der P-Entzug nach einer Düngung mit Struvit (Crystal Green) war signifikant höher (Abb. 6)





## 4.3 ÖKO-P: FAZIT

- ⇒ in den Versuchen konnten **keine signifikanten ertragssteigernden Effekte für Mais** nachgewiesen werden
- ⇒ der **gesteigerte P-Entzug** im ersten Jahr und der Effekt in der **Jugendentwicklung von Mais** deuten darauf hin, dass der P aus den **Struviten** direkt für die Pflanzen verfügbar ist und aufgenommen werden kann
- ⇒ im **Kleegrass** konnten im ersten Jahr sowohl ein **erhöhter P-Entzug** als auch ein **Ertragseffekt** durch **Struvit** festgestellt werden
- ⇒ auch die Analyse der P-Fractionen im Boden zeigte, dass insbesondere der **direkt pflanzenverfügbare P-Pool im Boden** durch die Düngung mit Struvit aufgefüllt wird
- ⇒ bei den anderen Rezyklaten konnten diese Effekte nicht nachgewiesen werden, hier soll der **Langzeiteffekt** über mehrere Jahre weiter beobachtet werden
- ⇒ obwohl die P-Gehalte im Boden laut Untersuchung (CAL-P) sehr gering waren, deuten die hohen Erträge - auch ohne P-Düngung - darauf hin, dass **P kein limitierender Faktor** war
  - ⇒ Das lässt vermuten, dass mit den gängigen Analysemethoden bestimmte P-Fractionen (insbesondere organischer P) nicht abgebildet werden, aber dennoch zur Pflanzenernährung beitragen





## 5. AUSBLICK

- die Rezyklate werden meist als Depot- bzw. Langzeitdünger beworben, die P über einen längeren Zeitraum freigeben. Deshalb sollen die Versuchsflächen und Folgekulturen in den kommenden Jahren weiter beprobt werden, um den Langezeitdüngeeffekt zu untersuchen
- momentan ist der Anhang der neuen EU-Öko-Verordnung in der Überarbeitung. Hierin wird voraussichtlich die Zulassung von Struvit für den Ökolandbau zugestimmt.

## KONTAKT



Hannah Fischer  
Landwirtschaftskammer NRW  
Ökologischer Land- und Gartenbau  
Gartenstraße 11  
50765 Köln - Auweiler  
[hannah.fischer@lwk.nrw.de](mailto:hannah.fischer@lwk.nrw.de)  
Tel.: 0221/5340 - 487



Tim Wantulla  
Landwirtschaftskammer NRW  
Ökologischer Land- und Gartenbau  
Gartenstraße 11  
50765 Köln - Auweiler  
[tim.wantulla@lwk.nrw.de](mailto:tim.wantulla@lwk.nrw.de)  
Tel.: 0221/5340 - 517