Dachverband
Agrarforschung

DAF

agrar spectrum

Band 52

Phosphoreinsatz in der Landwirtschaft zwischen Knappheit und Überschuss

DLG Verlag

agrarspectrum

Schriftenreihe

des Dachverbandes wissenschaftlicher Gesellschaften der Agrar-, Forst-, Ernährungs-, Veterinär- und Umweltforschung, DAF e.V.

Band 52

Phosphoreinsatz in der Landwirtschaft zwischen Knappheit und Überschuss

Wissenschaftliche Tagung des
Dachverbandes Agrarforschung (DAF) e.V.

am 10. Oktober 2019
in der Vertretung des Landes Hessen beim Bund, Berlin

Herausgeber:
Dachverband Agrarforschung e.V.

DAF

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Schriftenreihe agrarspectrum wird vom Vorstand des Dachverbandes Agrarforschung herausgegeben. Die Vervielfältigung und Übertragung einzelner Textabschnitte, Zeichnungen oder Bilder, auch für den Zweck der Unterrichtsgestaltung, gestattet das Urheberrecht nur, wenn sie mit dem Verlag vorher vereinbart wurden. Im Einzelfall muss über die Zahlung einer Gebühr für die Nutzung fremden geistigen Eigentums entschieden werden. Das gilt für die Vervielfältigung durch alle Verfahren, Scannen der Abbildungen, einschließlich Speicherung, Veränderung, Manipulation im Computer und jede Übertragung auf Papier, Transparente, Filme, Bänder, Platten und andere Medien.

Alle Informationen und Hinweise ohne jede Gewähr und Haftung.

Redaktion: Meike Packeiser, Silke Ausmeier

DAF e.V., Eschborner Landstraße 122
60489 Frankfurt am Main
Telefon: (069) 247 88 302
Telefax: (069) 247 88 114
E-mail: M.Packeiser@dlg.org
Internet: www.agrarforschung.de

© 2019 DLG-Verlag GmbH, Eschborner Landstraße 122
60489 Frankfurt am Main
Telefon: (069) 247 88 0
Telefax: (069) 247 88 484
E-mail: dlg-verlag@dlg.org
Internet: www.dlg-verlag.de

Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier.

Printed in Germany

Inhalt Seite

Vorwort 4
Prof. Dr. Karl H. Mühling, Präsident des DAF, Kiel

Phosphor im System „Boden-Pflanze-Gewässer“: Grundlagen und aktuelle Forschungsprobleme 5
Prof. Dr. Peter Leinweber, Universität Rostock

Phosphordüngung nach Bodenuntersuchung: Modifizierte Richtwerte für die P-Gehaltsklassen im Boden 14
Prof. Dr. Hans-Werner Olfs, Hochschule Osnabrück

Phosphor als Problem für Recht und Politik 29
Prof. Dr. Dr. Felix Ekardt, Forschungsstelle Nachhaltigkeit und Klimapolitik, Leipzig/Berlin

Phosphataneignung verschiedener Kulturpflanzen und Konsequenzen für die Bodenanalytik 30
Prof. Dr. Sven Schubert, Justus-Liebig-Universität, Gießen

Phosphat im Kreislauf führen – Notwendigkeiten, Möglichkeiten, Perspektiven 42
Prof. Dr. Torsten Müller, Universität Hohenheim, Stuttgart

Perspektiven für die verbesserte Nutzung der Mykorrhizierung zur P-Versorgung im Pflanzenbau: Chancen und Grenzen 43
PD Dr. Christel Baum, Universität Rostock

Phosphoreffizienz in der Nutztierernährung 49
Dr. Vera Sommerfeld, Prof. Dr. Markus Rodehutscord, Universität Hohenheim, Stuttgart

Recycling von Phosphor zur P-Versorgung von Pflanzen – Potentiale und Voraussetzungen 56
Prof. Dr. Franz Wiesler, LUFA Speyer

Düngewirkung von Phosphat auf Basis einer Metastudie über langjährige P-Düngungsversuche 67
Dr. Uwe Buczko, Universität Rostock

Verzeichnis der Autoren 83

Vorwort

Prof. Dr. Karl H. Mühling, Präsident des DAF, Kiel

Phosphoreinsatz in der Landwirtschaft zwischen Knappheit und Überschuss

Phosphor übernimmt vielfältige und essenzielle Aufgaben für Pflanzen, Tiere und Menschen und ist damit Teil unserer Lebensgrundlage. Der Umgang mit dem Mineralstoff erfordert Verantwortungsbewusstsein, da die Ressource endlich und deren Einsatz mit Umweltwirkungen verbunden ist. Eine umfassende Bewertung der gegenwärtigen und zukünftigen Phosphor-Stoffströme sowie der Verwertbarkeit bei Pflanze und Tier ist notwendig, um die Ansätze für die wirksame und effiziente Nutzung von Phosphor voranzutreiben.

- Gibt es neue Erkenntnisse bei der P-Düngeempfehlung unter Berücksichtigung von zusätzlichen bodenphysikalischen und pflanzlichen Eigenschaften?
- Wie können bedarfsgerechte, effiziente und P-reduzierte Fütterungskonzepte weiterentwickelt und die damit verbundene Flächenbilanz reduziert werden?
- Wie kann der Einsatz von Phosphor als Sekundärrohstoff aus Recyclingverfahren in der Landwirtschaft praktikabel werden?
- Wie lässt sich der Umgang mit Phosphor politisch regulieren?

Diese Fragen werden von den Referenten in den Mittelpunkt ihrer Ausführungen gestellt.

Der DAF e.V. widmet die diesjährige Tagung dem interdisziplinären Themenkomplex Phosphor und lädt die Akteure aus Forschung, landwirtschaftlicher Praxis, Wirtschaft und Politik ein, Methoden, Ergebnisse, unterschiedliche Sichtweisen sowie neue Ideen zu diskutieren.

Phosphor im System „Boden-Pflanze-Gewässer“: Grundlagen und aktuelle Forschungsprobleme

Prof. Dr. Peter Leinweber, Bodenkunde, Universität Rostock und Leibniz-WissenschaftsCampus “Phosphorforschung Rostock”

Einleitung & Problematik

Phosphor (P) ist bekanntlich ein essentielles Element, dessen Verbindungen in allen Lebensvorgängen notwendig sind und das unersetzbar ist. Aufgrund der umfangreichen Nutzung und Nicht-Substituierbarkeit von P in der landwirtschaftlichen Erzeugung und Nahrungsmittelproduktion einerseits und der begrenzten globalen P-Ressourcen andererseits gab es vor einigen Jahren erhebliche, aus heutiger Sicht vielleicht als etwas alarmistisch einzuschätzende Berichte über den sogenannten „peak phosphorus“, d.h. ein Datum ab dem die globale P-Förderung hinter dem Bedarf zurückbleiben würde, was unweigerlich zu Engpässen in der Versorgung und steigenden Preisen führen würde (z.B. Cordell and White, 2011). Zur Problembeschreibung gehört weiterhin, dass die P-Lagerstätten in nur wenigen Staaten/ Regionen der Erde, vor allem in Nordafrika und dem Nahen Osten, konzentriert sind (BGR, 2013), die als politisch instabil angenommen werden können, so dass die EU das Phosphatgestein in eine Liste der kritischen Rohstoffe aufgenommen hat (EU 2017). Andererseits ist die P-Nutzung immer noch durch einen hohen Grad der Ineffizienz und durch große Verluste entlang der Nutzungs- bzw. Transferkette „Förderung – Produktion – Anwendung (Land- und Nahrungsgüterwirtschaft“ – Umwelt gekennzeichnet. Bei den unerwünschten Umweltwirkungen schlechter P-Nutzung sticht die Eutrophierung aquatischer Ökosysteme und die damit verbundene Verschlechterung des ökologischen Gewässerzustandes besonders hervor.

Diese Entwicklungen – pointiert als „Verschwendung vs. Knappheit“ zu beschreiben – haben dazu geführt, dass zahlreiche Forschungs- und Entwicklungsvorhaben rund um das essentielle Element P initiiert wurden, zumal die Thematik auch außerhalb der Wissenschaft im medialen und politischen Raum Aufmerksamkeit erregt hat. Verwendung des Wortes „Phosphorknappheit“ in einer Internet-Suchmaschine ergibt beispielsweise eine Vielzahl von Treffern mit Überschriften wie „Phosphorknappheit – steht die Menschheit vor dem Ende ...“, „Phosphorknappheit – Das Ende der Menschheit? | COSMO CONSULT“, „Am

Phosphor hängt das Schicksal der Menschheit! (WELT, 2011)“, „Bedeutet die Phosphor-Knappheit das Ende der Menschheit?“, „Der Überlebensstoff Phosphor | DiePresse.com“, „Die Katastrophe, über die niemand spricht – Phosphorknappheit“, um nur einige zu nennen. Neuere Untersuchungen haben allerdings ergeben, dass die statische Reichweite der derzeit wirtschaftlich abbaubaren Phosphatvorkommen den weltweiten Bedarf in der Landwirtschaft noch für über 320 Jahre decken sollte (BGR, 2013). Diese Reichweiten-Angaben sind allerdings dynamisch, weil neue oder mit neuen technologischen Möglichkeiten erschließbare geologische Vorkommen gefunden werden. Es kann somit das Fazit gezogen werden, dass aktuell und in absehbarer Zeit weltweit keine physische Knappheit besteht oder droht, sondern dass eher regionale Verknappungen oder Preisanstiege die sinnvolle Verwendung von P-Düngern mit negativen Auswirkungen auf Erträge und Nahrungsmittelbereitstellung einschränken können (Köhn et al., 2017). Auch die möglicherweise erst längerfristig eintretenden Verknappungen, aber insbesondere die Umweltwirkungen aktuell regional zu hoher landwirtschaftlicher P-Anwendungen und Belastungen der Lagerstättenphosphate mit unerwünschten Begleitstoffen, sprechen dafür, die aktuelle ineffiziente P-Nutzung zu hinterfragen und Anstrengungen zur Kreislaufführung von P zu unternehmen. Forschung und Entwicklung können dabei wichtige Hilfestellungen geben.

Aktuelle Forschungsinitiativen – regional und national

Im Raum Rostock wurde 2014 die Initiative der Leibniz-Gemeinschaft zur Förderung regionaler Verbünde zwischen Leibniz-Instituten und den regionalen Universitäten aufgegriffen und es wurde in einem wettbewerblichen Verfahren die Förderung eines **WissenschaftsCampus „Phosphorforschung Rostock“** eingeworben (https://wissenschaftscampus-rostock.de/). Dieser Campus hat 2018/19 eine zweite Förderperiode bis 2021 gewonnen, die aktuell läuft. Die beteiligten Institute sind das Leibniz-Institut für Katalyse e.V. (LIKAT) an der Universität Rostock, das Leibniz-Institut für Nutztierbiologie (FBN), Dummerstorf, das Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW), das Leibniz-Institut für Pflanzengenetik und Kulturpflanzenforschung (IPK), Teilsammlungen Nord, Groß Lüsewitz sowie das Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie (INP), Greifswald. Seitens der Universität Rostock sind insgesamt 5 Fakultäten beteiligt, so dass die Zahl der beteiligten WissenschaftlerINNEN ca. 100 beträgt. Neben zahlreichen bi- und multilateralen Verbundprojekten zum Thema „Phosphor“ wird ein Hauptteil der gemeinsamen Forschung im Rahmen einer Graduiertenschule von Promovierenden geleistet, die in der nunmehr laufenden zweiten Förderperiode in die Forschungscluster „I. P in der Umwelt – P-Pools

und Mobilisierungspotential im Flachland und in Küstenregionen“, „II. Suffizienz und Effizienz der Phosphornutzung, Phosphorrecycling – landwirtschaftliche P-Recycling-Möglichkeiten“, „III. Phosphor in der Synthese und Katalyse“, „IV. Die Molekularbiologie des P – die zentrale Rolle von P in den Signalwegen und im Metabolismus von der Zelle zum Ökosystem“ sowie das Querschnittsthema „V. P-Governance“ gegliedert ist.

Als weiteres Forschungsprogramm, in dem Phosphor eine gewisse Rolle spielt, ist **„Wetscapes“** zu nennen, ein Programm im Rahmen der Europäischen Fonds EFRE, ESF und ELER über die Landesexzellenzinitiative M-V mit einer Laufzeit von vier Jahren (2017 bis 2021; https://www.wetscapes.uni-rostock.de/). Ziel des gemeinsam von Gruppen aus den Universitäten Greifswald und Rostock bearbeiteten Projektes ist es, wissenschaftliche Grundlagen für die Wiedervernässung von Mooren einschließlich von Bewirtschaftungsoptionen für solche nassen Standorten zu erarbeiten. Phosphor spielt insofern eine Rolle, als dass frühere Untersuchungen ergeben haben, dass die Wiedervernässung ein gewisses Risiko der reduktiven Freisetzung von an pedogenen Oxiden gebundenen Phosphaten birgt (z.B. Meissner et al., 2008). Die aktuellen Untersuchungen an mehreren degradierten und wiedervernässten Standorten deuten jedoch darauf hin, dass nach längeren Perioden der Vernässung und erneuten Torfwachstum oberflächlich stabile P-Formen angereichert werden, die kein Risiko der Gewässereutrophierung bedeuten (Negassa et al., 2020).

Das umfangreichste nationale Forschungsprojekt zum Phosphor ist **InnoSoilPhos**, in dem deutschlandweit neue Ansätze für ein verbessertes P-Management auf allen Skalenebenen von atomar/molekular bis hin zum Landwirtschaftsbetrieb und zur Gesellschaft erarbeitet werden (https://www.innosoilphos.de/). Die Projektstruktur in Abbildung 1 verdeutlicht die verschiedenen Skalenebenen und die in Arbeitspakete (WPs) gegliederten Teilprojekte und Fragestellungen. Daraus werden im folgenden Abschnitt nach einer Übersicht der P-Transfers und -umsetzungen im Agrar- und Umweltsystem (Abb. 2) einige aktuelle Forschungsergebnisse vorgestellt.

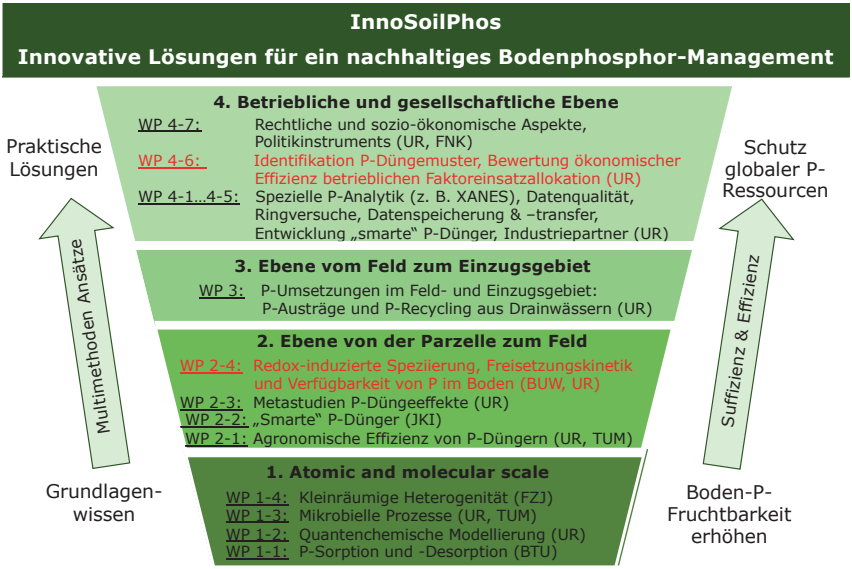


Abbildung 1: Wesentliche Ziele und Projektstruktur von InnoSoilPhos in Phase 2 (2019)

Systemübersicht und Ergebnisbeispiele „Boden – Pflanze – Gewässer"

Zentral für die landwirtschaftliche Produktion im traditionellen Sinne ist der Boden; in Bezug auf P also der Boden-P-Haushalt, und in ihm der Gehalt an anorganischen (Pi) und organischen (Po) Phosphorverbindungen in der Bodenlösung (Abb. 2). Organisch bedeutet dabei anders als in der reinen Chemie nicht nur direkte P-C-Verbindungen, sondern auch Phosphate in jeglichen Kombinationen mit organischen Verbindungen, z.B. Phospholipide und Zuckerphosphate. Der Boden erhält P aus der Verwitterung von P-haltigen Mineralen, durch Einträge mit Pflanzenrückständen und Düngern sowie aus der Atmosphäre. Neueste Untersuchungen beziffern atmosphärische Einträge auf 0,2 bis 0,7 kg Pt ha^{-1} a^{-1} was für die P-Ernährung der Kulturpflanzen zwar vernachlässigbar klein ist, aber für die aquatischen Ökosysteme eine erhebliche Belastung darstellt (Berthold et al., 2019). Bei den sonstigen beabsichtigten P-Einträgen durch Düngung (E2) stehen derzeit Recyclingdünger im Mittelpunkt des Forschungsinteresses. Die Bodenkunde in Rostock bearbeitet dabei das Recyclingmaterial Knochenkohle intensiv und führt den Nachweis bodenchemischer Umsetzungen und der Düngewirkung einer mit Schwefel angereicherten Knochenkohle (Zimmer et al., 2018).

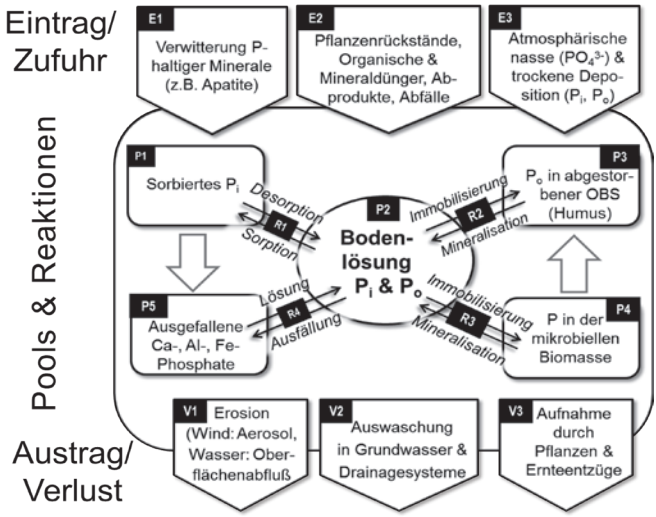


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Phosphorpools und -umsetzungen im System „Boden – Pflanze – Gewässer“ (E = Einträge, P = Pools, R = Peaktionen, V = Verluste)

Große Fortschritte wurden im InnoSoilPhos-Projekt beim grundsätzlichen Verständnis der P-Reaktionen auf der atomaren Ebene (Sorption und Ausfällung; R1, R4 in Abb. 2) durch quantenchemische Modellierung gemacht (z.B. Ahmed et al., 2018, 2019). Ebenso konnten auf der molekularen Ebene mittels Metagenomik genetische Grundlagen der mikrobiellen P-Mobilisierung aufgeklärt werden (z.B. Grafe et al., 2018, R3 in Abb. 2). Diese Erkenntnisse wurden genutzt, um auf der größeren Skalenebene der Gefäß- und Parzellenversuche solche Kulturpflanzen als Zwischenfrüchte zu testen, die den P-mobilisierenden Bakterien als Wirtspflanzen dienen. Hinsichtlich der Austrags- und Verlustpfade ergaben umfangreiche Meta-Analysen der Zusammenhänge zwischen P-Düngung und Erträgen nur lose oder keine Zusammenhänge solange die Böden verfügbaren P in den Gehaltsklassen C und B hatten. Erst bei Gehaltsklasse A erbrachte P-Düngung jeglicher Höhe oftmals Ertragszuwächse (Buczko et al., 2018), so dass hieraus die Schlussfolgerung zu ziehen ist, dass die aktuellen Düngeempfehlungen für P oftmals weder Ertragszuwächse noch wirtschaftliche Gewinne garantieren.

Auf der Ebene des Einzugsgebietes spielt die Messung und Verringerung von P-Austägen aus Böden in Gewässer eine besondere Rolle. Im norddeutschen Tiefland ist sind besonders große P-Austräge ereignisbezogen, d.h. sie

korrelieren mit Starkniederschlägen und starken Abflussereignissen (Koch et al., 2019). Ganz besonders augenfällig war das bei einem beprobten Extremniederschlagsereignis im Jahre 2011 bei dem beispielsweise mit dem Spitzenabfluss 33 kg P ha^{-1} abflossen und die Ostsee einen doppelt so hohen P-Eintrag über die Flusseinzugsgebiete erhielt wie im Durchschnitt der sonstigen Jahre mit den erwartbaren Effekten für verstärke Eutrophierung und zunehmendes Algenwachstum, z.B. in der Darß-Zingster Boddenkette (Zimmer et al. 2016). In Folge des Klimawandels ist mit der Zunahme solcher Extremereignisse zu rechnen, was den Rückhalt eutrophierender Nährstoffe vor Eintritt in die Vorfluter und empfindliche aquatische Ökosysteme zunehmend schwieriger macht. Auf der größten Skalenebene schließlich, im Bereich Gesellschaft, Recht & Politik sind zwei Promotionsarbeiten zur P-Governance angefertigt und erfolgreich verteidigt worden, wovon eine Ländervergleiche (Costa Rice & Nicaragua in Mittelamerika und Deutschland) angestellt (Stubenrauch, 2019) und die andere detaillierte Governance-Maßnahmen zur Lösung des P-Problems in Deutschland bzw. im EU-Kontext hergeleitet und begründet hat (Garske, 2019). Beide kommen zu dem Schluss, dass grundlegende Veränderungen des agrarischen Wirtschaftens unumgänglich und im Kontext mit der erforderlichen Erreichung der Klimaziele des Paris-Abkommens dringend geboten sind.

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass dieser kleine „Querschnitt“ sowohl durch die verschiedenen Skalenebenen des Projektes InnoSoilPhos (Abb. 1) als auch Aspekte des agrarischen P-Haushaltes (Abb. 2) keinesfalls komplett und repräsentativ ist, sondern nur einige Teilaspekte bzw. Ausschnitte (auch hinsichtlich der erschienenen Publikationen) enthält. Diese sicher subjektiv gefärbte Auswahl soll nur die Breite, in Teilen auch Tiefe, des Forschungsansatzes zeigen ohne Anspruch auf Vollständigkeit. Aktuelle und vollständige Publikationslisten sind unter den angegebenen Internetadressen abrufbar, oftmals auch mit direkten Links zu den Verlagen bzw. open-source Quellen.

Ideen für ein besseres P-Management

Basierend auf den Forschungserfahrungen aus diesen Programmen scheint es angebracht und notwendig,

- die P-Einträge in das System der Land- und Nahrungsgüterwirtschaft insgesamt drastisch zu verringern, wozu die Re-integration der Pflanzenproduktion und Tierhaltung auf lokaler/ regionaler Ebene, deutlich verringerte P-Düngeraufwendungen, die Mobilisierung der bereits in Böden angereicherten P-Vorräte durch organische Düngung, Fruchtfolgen, Aktivierung der Bodenlebewesen etc., konsequentes P-Recycling aus Abwässern und Schlachtabfällen, die

weitestgehende Vermeidung von Verlusten an Tieren im Haltungsverfahren und an Nahrungsmitteln bei Handel und Konsumenten beitragen können, um so die tatsächlich unvermeidbaren Verluste zu minimieren sowie

- P-Einträge aus Böden in Gewässer durch einen konsequenten Erosionsschutz, durch ggf. technische Maßnahmen wie kontrollierte Dränung am Feldrand, Einrichtung von Retentionsflächen und wissenschaftlich begleitete Wiedervernässung von Mooren auf der Feld- und Landschaftsebene gering zu halten.

- Schließlich legt die Governanceforschung nahe, dass die P-Problematik nur eine Facette der insgesamt nicht nachhaltigen Lebens- und Wirtschaftsweise ist, so dass diese insgesamt hinterfragt und überwunden werden muss.

Literatur

Ahmed, A. A., P. Leinweber, O. Kühn (2018) Unravelling the nature of glyphosate binding to goethite surface by *ab initio* molecular dynamics simulation. *Physical Chemistry Chemical Physics* 20: 1531-1539, DOI: 10.1039/C7CP06245A

Ahmed, A. A., S. Gypser, P. Leinweber, D. Freese, O. Kühn (2019) Infrared spectroscopic characterization of phosphate binding at the goethite-water interface. *Physical Chemistry Chemical Physics* 21: 4421-4434, DOI: 10.1039/C8CP07168C

Berthold, M., R. Wulff, V. Reiff, U. Karsten, G. Nausch, R. Schumann (2019) Magnitude and influence of atmospheric phosphorus deposition on the southern Baltic Sea coast over 23 years: implications for coastal waters. *Environmental Sciences Europe* 31: 27, DOI: 10.1186/s12302-019-0208-y

BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe) (Hrsg.) (2013) Phosphat – Mineralischer Rohstoff und unverzichtbarer Nährstoff für die Ernährungssicherheit weltweit. Hannover, online: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Zusammenarbeit/TechnZusammenarbeit/ Politikberatung_SV_MER/Downloads/phosphat.pdf?__blob=publicationFile&v=4

Buczko, U., M. van Laak, B. Eichler-Löbermann, W. Gans, I. Merbach, K. Panten, E. Peiter, T. Reitz, H. Spiegel, S. von Tucher (2018) Re-evaluation of the yield response by phosphorus fertilization based on meta-analyses of long-term field experiments. *Ambio* 47 (1): 50-61, DOI: 10.1007/s13280-017-0971-1

Cordell, D., S. White (2011) Peak Phosphorus: Clarifying the Key Issues of a Vigorous Debate about Long-Term Phosphorus Security. *Sustainability* 3(10): 2027-2049; https://doi.org/10.3390/su3102027.

EU (2017) Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen über die Liste kritischer Rohstoffe für die EU 2017. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?qid=1505315626425&uri=COM:2017:490:FIN

Garske, B. (2019) Ordnungsrechtliche und ökonomische Instrumente der Phosphor-Governance. Metropolis Verlag, Weimar, 517 S.

Grafe, M., M. Goers, M., S. v. Tucher, C. Baum, D. Zimmer, P. Leinweber, G. Vestergaard, S. Kublik, M. Schloter, S. Schulz (2018) Bacterial potentials for uptake, solubilization and mineralization of extracellular phosphorus in agricultural soils are highly stable under different fertilization regimes. *Environmental Microbiology Reports*, DOI: 10.1111/1758-2229.12651

Koch, S., P. Kahle, B. Lennartz (2018) Phosphordynamik und Austragspfade in einem Norddeutschen Tieflandeinzugsgebiet, Wasser und Abfall 20(6): 18-21, DOI: 10.1007/s35152-018-0067-7

Köhn, J., D. Zimmer, P. Leinweber (2018) Phosphorus economics – a review. *Mechanism of Economic Regulation* 21:373–395.

Meissner, R., P. Leinweber, H. Rupp, M. Shenker, I.M. Litaor, J.S. Robinson, A. Schlichting, J. Köhn (2008) Mitigation of diffuse phosphorus pollution during re-wetting of fen peat soils: a trans-European case study. *Water, Air and Soil Pollution* 188:111-126.

Negassa, W., D. Michalik, W. Klysubun, P. Leinweber (2020) Phosphorus speciation in long-term drained and rewetted peatlands of northern Germany. Submitted to *Soil Systems*

Stubenrauch, J. (2019) Phosphor-Governance in ländervergleichender Perspektive – Deutschland, Costa Rica, Nicaragua. Ein Beitrag zur Nachhaltigkeits- und Bodenschutzpolitik, Metropolis-Verlag, 490 S.

Zimmer, D., P. Kahle, C. Baum (2016) Loss of soil phosphorus by tile drains during storm events. *Agricultural Water Management* 167: 21-28. 10.1016/j.agwat.2015.12.017.

Zimmer, D., J. Kruse, N. Siebers, K. Panten, C. Oehlschlaeger, M. Warkentin, Y. Hu, L. Zuin, 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. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.076

Phosphordüngung nach Bodenuntersuchung: Modifizierte Richtwerte für die P-Gehaltsklassen im Boden

Prof. Dr. Hans-Werner Olfs, Hochschule Osnabrück

Einleitung

Die globalen Phosphor-Reserven sind, ähnlich wie dies auch für andere stoffliche Ressourcen wie zum Beispiel Öl, Gas oder seltene Erden gilt, endlich. Zur Jahrtausendwende wurden für die Reichweite der P-Reserven noch Zeiträume von 60 – 150 Jahren genannt (u.a. Günther 1997, Smil 2000, Smit et al. 2009, Steen 1998). Dies hatte insbesondere in Europa intensive Debatten über die strategische Bedeutung von Phosphor zur Folge, die schließlich zu einer Einstufung von P als „kritischen Rohstoff" geführt haben. In diesem Zusammenhang sind unter anderem auch die umfangreichen Aktivitäten zur Rückgewinnung von P im Abwasserbereich zu sehen. Auch wenn neuere Bewertungen der weltweit verfügbaren P-Reserven eine längere Verfügbarkeit von Phosphor erwarten lassen, so wird jedoch eindrücklich darauf verwiesen, dass eine effizientere Nutzung insbesondere in der Landwirtschaft wichtig ist (u.a. Van Vuurena et al. 2010).

Gleichzeitig entwickelte sich eine tiefgehende Diskussion über die P-Anreicherung in nicht-agrarisch genutzten Ökosystemen (Oberflächengewässer, küstennahe Meeresbereiche). Hier kommt es aufgrund diffuser P-Einträge vor allem aus der landwirtschaftlichen Flächennutzung (Erosion, Oberflächenabfluss, Dränageabläufe) zu starken Wachstum der bisher P limitierten Organismen.

Verwendet man die P-Flächenbilanz als Indikator für eine mögliche unerwünschte Belastung von nicht agrarischen Ökosystemen, zeigt sich für Deutschland, dass insbesondere in Regionen mit intensiver Tierhaltung (z.B. Münsterland, Weser-Ems, Allgäu, Berchtesgadener Land) deutliche positive P-Bilanzen festzustellen sind (Abb. 1). In primär ackerbaulich genutzten Regionen, wie dies beispielsweise nahezu flächendeckend in den neuen Bundesländern oder auch in Süd-Niedersachsen anzutreffen ist, sind die P-Flächenbilanzen nahezu ausgeglichen. Anhand der Berechnung von P-Flächenbilanzen auf Kreisebene sind jedoch keine Aussagen über die tatsächliche Höhe der P-Austräge von landwirtschaftlichen Nutzflächen in benachbarte Ökosysteme abzuleiten. So können in den „Hotspot"-Regionen Flächen mit positiver oder negativer P-Flächenbilanz direkt nebeneinander liegen.

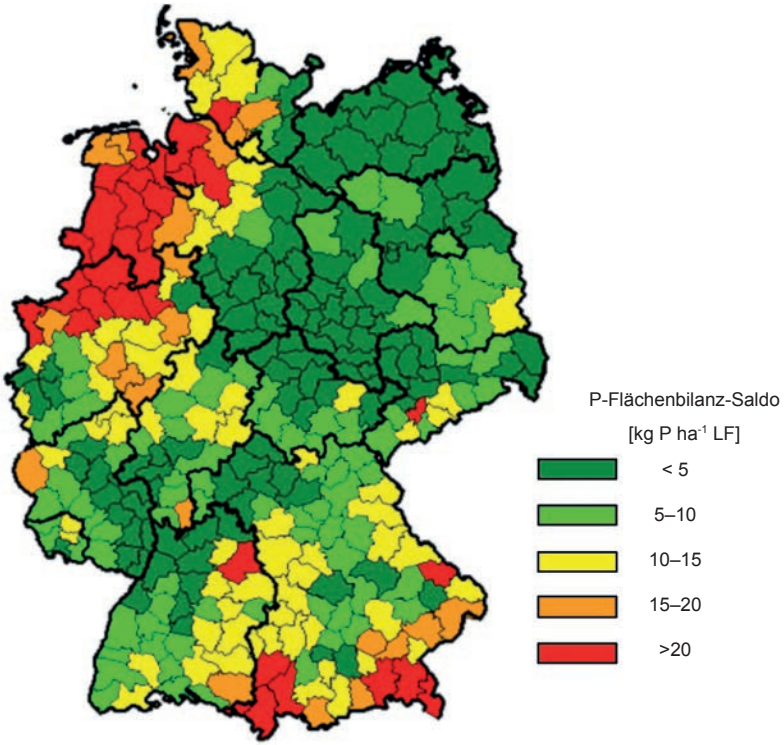


Abb. 1: Regionale Überschüsse in der P-Bilanz der Landwirtschaft (Summe der P-Zufuhr auf eine Fläche aus Düngung und anderen Quellen abzüglich P-Abfuhr mit Ernteprodukte; Montag et al. 2015, nach Werner 2006).

Ergibt sich andererseits aufgrund langjährig unterlassener (oder zu geringer) P-Düngung eine Verringerung des Pools an pflanzenverfügbarem P im Boden, so ist damit zu rechnen, dass das Ertragspotenzial der Kulturpflanzen nicht ausgeschöpft werden kann und darüber hinaus auch eine verminderte Effizienz für andere Nährstoffe (insbesondere N) festzustellen ist. So konnte Lorenz (2004) für eine Ackerfläche, die zu Versuchsbeginn nach DL-Methode einen P-Gehalt von 14 mg/100 g Boden aufwies, nach zehnjähriger Versuchsdauer ohne P Düngung je nach N-Düngungsniveau einen Abfall auf 3 – 6 mg/100 g Boden feststellen. Bei Betrachtung des Zeitraums vom 6. bis zum 10. Versuchsjahr zeigte sich darüber hinaus ein Rückgang des Ertrags von durchschnittlich 69 GE/ha auf 58 GE/ha. Die notwendige-Düngermenge zum Erreichen des Ertrags lag für die Varianten ohne P-Düngung mit 136 kg P/ha dabei deutlich über den 119 kg N/ha für die Varianten mit P-Düngung.

Unter den so skizzierten Rahmenbedingungen können die Ziele der P-Düngung für die landwirtschaftliche Praxis und die Beratung somit wie folgt zusammengefasst werden:

- optimale P-Ernährung von Nutzpflanzen sicherstellen
- Bodenfruchtbarkeit erhalten (oder nachhaltig verbessern),
- P-Verluste in nicht-agrarische Ökosysteme vermeiden und
- nachhaltigen und ressourceneffizienten Umgang mit P gewährleisten.

Um dies zu ermöglichen ist eine regelmäßige Erfassung des pflanzenverfügbaren Phosphors im Boden, wie dies auch in der aktuellen Düngeverordnung (Dünge-VO 2017) vorgeschrieben ist, sinnvoll und zielführend.

Bodenuntersuchung als Grundlage der P-Düngeempfehlung

Für die Ableitung einer P-Düngeempfehlung mittels Bodenuntersuchung sind folgende Voraussetzungen zu beachten:

- standardisierte Vorgehensweise bei der Entnahme und Vorbereitung der Bodenproben,
- genormte Laboranalyseverfahren und
- anhand von Exaktversuchen transparent abgeleitete Kalibrierdaten.

Da die Zusammenhänge zwischen den in den Bodenproben gemessenen Gehalten an „pflanzenverfügbarem P“ und den Ergebnissen aus Feldversuchen empirisch abgeleitet werden, ist es notwendig eine Vielzahl von Versuchen anzulegen, um die Diversität der Anbaubedingungen (u.a. Bodentypen, Jahreswitterung, Fruchtfolgen) entsprechend im Kalibrierdatensatz abzubilden (Jordan-Meille et al. 2012, Lorenz et al. 2017, Spiegel et al. 2014).

Laut Vetter et al. (1977) sind die P-Gesamtgehalte im Boden nicht als Indikator für die Pflanzenverfügbarkeit von P geeignet. Bodenuntersuchungsmethoden für P müssen also durch eine geeignete Verfahrensgestaltung darauf abzielen, den für das Pflanzenwachstum in der folgenden Vegetationsperiode relevanten Anteil des P-Bodenvorrats zu charakterisieren. Dabei wird konzeptionell zwischen diskreten „P-Pools“ unterschieden, die durch mehr oder weniger intensive Austauschprozesse miteinander in Beziehung stehen. Tatsächlich handelt es aber

um ein Kontinuum verschiedenster P-Bindungsformen, die ständig durch Auf-, Um- und Abbauprozesse ineinander überführt werden (Olfs 2019).

Stark vereinfachend wird bei Phosphor häufig unterteilt in die Pools „Bodenlösungs-P“, „labiles P“, „stabiles P“ und „organisch gebundenes P“. Bei sauren pH-Werten erfolgt der Übergang von „Bodenlösungs-P“ in „lablies P“ und dann weiter in die Fraktion „stabiles P“ durch spezifische und unspezifische Sorption im Wesentlichen an Eisen- und Aluminium-Oxide/Hydroxide. Demgegenüber kommt es bei basischen pH-Werten zur Fällung mit Calcium-Ionen über verschiedene Zwischenstufen letztlich bis hin zum Hydroxylapatit. Die Intensität der Umsetzung wird daher maßgeblich durch den pH-Wert im Boden und die Konzentrationen der möglichen Bindungspartner (Al^{3+} und $Fe^{2+/3+}$ bzw. Ca^{2+}) bestimmt. Die P-Konzentration in der Bodenlösung kann durch Desorption bzw. Lösung im umgekehrten Fall wieder erhöht werden. Phosphat-Ionen aus der Bodenlösung können andererseits auch durch Mikroorganismen aufgenommen werden. Nach dem Absterben der Mikroorganismen liegt organisches-P vor, welches durch Mineralisation dann auch wieder als Phosphat der Bodenlösung zugeführt werden kann.

Pflanzenwurzeln können Phosphor nur als in Wasser gelöstes Phosphat-Ion aufnehmen. Die zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Bodenlösung vorliegende P-Menge ist in der Regel aber meist deutlich weniger als 1 kg P/ha (u.a. Fritsch und Werner 1987, Jungk und Claassen 1997). Daher muss die P-Menge in der Bodenlösung ständig aus anderen P-Pools ergänzt werden um den P-Bedarf der Pflanzenbestände während der Hauptwachstumszeit befriedigen zu können.

Als wichtige Voraussetzung für die Qualität einer auf Bodenuntersuchung basierenden P- Düngebedarfsprognose ist eine Entnahme der Bodenproben, die repräsentativ ist für die zu düngende Fläche. Da der Pool an pflanzenverfügbarem P im Boden keinen ausgeprägten Jahresgang unterliegt (Schäfer und Reiner 1973), kann die Probenahme im Rahmen der sogenannten Grundbodenuntersuchung grundsätzlich zu jedem Zeitpunkt erfolgen. Die letzte Düngungsmaßnahme sollte möglichst 6 – 8 Wochen zurückliegen (VDLUFA, 2007). Sowohl für Acker- als auch für Grünlandstandorte hat sich die Probenahme im Herbst nach der Ernte (aber vor der nachfolgenden Düngung) bzw. im Anschluss an die letzte Mahd oder den Abschluss des Weideganges etabliert. Eine Frühjahrsprobenahme vor der ersten Düngungsmaßnahme oder Beweidung ist aber ebenso möglich. Diese Beprobungszeit sollte dann auf dieser Fläche möglichst auch bei den folgenden Beprobungen beibehalten werde.

Entsprechend der VDLUFA-Empfehlungen wird die Probenahme auf Grünland bis 10 cm Bodentiefe und auf Ackerland bis zur Bearbeitungstiefe (jedoch mindestens 20 cm) in der Regel mit einem Bohrstock durchgeführt (VDLUFA 1991, 2007).

Aufgrund der üblicherweise zu erwartenden größeren Heterogenität von Grünlandflächen ist die Empfehlung für die Anzahl der Einzeleinstiche für Grünland mit 25 – 30 (VDLUFA, 1991) im Vergleich zu Ackerflächen mit 15 – 20 (VDLUFA, 2007) deutlich höher. Die so gewonnene Bodenprobe (häufig auch als „Sammelprobe" bezeichnet) wird intensiv gemischt, Pflanzenreste sowie Steine werden entfernt und gröbere Bodenaggregate werden zerkrümelt. Vor der Laboruntersuchung wird die Bodenprobe dann luftgetrocknet und anschließend erfolgt eine Siebung auf 2 mm.

Für die Extraktion des pflanzenverfügbaren P aus Bodenproben stehen eine Vielzahl unterschiedlicher Extraktions- und Analyseverfahren zur Verfügung (u.a Jordan-Meille et al. 2012). Die Extraktionsstärke eines Verfahrens wird dabei durch die Art des Extraktionsmittels (z.B. Wasser, Salzlösung, Säure) und der jeweiligen Konzentration, das Verhältnis zwischen Bodeneinwaage und Extraktionsmittelvolumen sowie die Extraktionsdauer und -intensität bestimmt. Da die mit unterschiedlichen Methoden gewonnenen Analysewerte nicht direkt miteinander vergleichbar sind, muss bei der Übermittlung der Düngeempfehlungen auch immer die entsprechende Labormethode angegeben werden. Ziel ist es schlussendlich einen P-Pool zu erfassen, der die pflanzenverfügbaren P-Anteile möglichst gut charakterisiert, um so einen Rückschluss auf das im Wachstumsverlauf der Kultur aus dem Bodenvorrat zur Verfügung stehende P-Angebot zu ermöglichen (Marschner und Rengel 2012; McLaughlin *et al.* 1999).

P-Gehaltsklassen-Konzept

Entscheidend für die Ableitung einer belastbaren P-Düngeempfehlung ist der Zusammenhang zwischen dem Ergebnis der P-Bodenanalyse einerseits und dem durch P-Zufuhr erzielten Mehrertrag und/oder die Verbesserung von Qualitätseigenschaften in Feldversuchen andererseits (Lorenz *et al.* 2017). In einem konkreten P-Düngungsversuch lässt sich in dem betrachteten Jahr aus dem Ertragsanstieg (oder der Qualitätsverbesserung) der angebauten Kulturart bei steigenden Gehalten an pflanzenverfügbarem P im Boden, die mittels einer bestimmten Bodenuntersuchungsmethode erfasst werden können, ein Grenzwert errechnen, bei dem die weitere Erhöhung der P-Bodengehalte keine weitere Ertrags- oder Qualitätsverbesserung bewirkt. Dies konnten beispielsweise Tang et al. (2009) für einzelne Feldversuche zu Mais und Weizen an verschiedenen Standorten aufzeigen. Bei Betrachtung umfangreicher Feldversuchsserien zur P-Düngung zeigt sich allerdings, dass diese Beziehung nicht besonders eng ist (Kerschberger et al. 1997). Das tatsächlich im jeweilige Anbaujahr der Pflanze während der verschiedenen Wachstumsphasen auf einer Fläche zur Verfügung stehende P-Angebot wird deutlich beeinflusst durch

- chemische, physikalische und biologische Bodeneigenschaften,
- Pflanzenfaktoren, die die räumliche Erschließung des P-Vorrats im Boden und die P-Mobilisierung beeinflussen (u.a. Größe und Verteilung des Wurzelsystems),
- Witterungsfaktoren sowie
- P-Bedarf der Kultur.

Um diese Unschärfe mit zu berücksichtigen, wurde in Deutschland eine Eingruppierung der P-Bodenuntersuchungsergebnisse in 5 Gehaltsklassen (GK) „A“ bis „E“ vorgenommen, die jeweils relativ weite Bereiche pflanzenverfügbarer P-Gehalte umfassen. Für die anzustrebende P-Gehaltsklasse „C“ soll eine P-Zufuhr in Höhe der P-Abfuhr mit den Ernteprodukten erfolgen. Durch eine entsprechende P-Düngung soll so der Optimalertrag erreicht werden und der P-Gehalt im Boden bleibt so langfristig erhalten (Abb. 2). Eine Einstufung in Gehaltsklasse „A“ oder „B“ zeigt an, dass in der Regel der im Boden vorliegende Gehalt an pflanzenverfügbarem P zur Erzielung des Optimalertrags bzw. für die angestrebte Qualität der Ernteprodukte nicht ausreicht. In den folgenden Jahren sollte daher durch erhöhte (GK „B“) bzw. stark erhöhte (GK „A“) P-Düngung der Status an pflanzenverfügbarem P im Boden aufgestockt werden bis die Gehaltsklasse „C“ erreicht ist. Im Gegensatz dazu soll bei Standorten mit Einstufung in Gehaltsklasse „D“ eine verminderte bzw. bei „E“ keine P-Düngung erfolgen bis schließlich die Gehaltsklasse „C“ erreicht ist. So können der Einsatz von Düngemitteln auf solchen Standorten verringert und mögliche Umweltbelastungen vermieden werden.

P-Gehaltsklasse	Düngebedarf
E	keine Düngung
D	verminderte Düngung
C	Erhaltungs-düngung
B	erhöhte Düngung
A	stark erhöhte Düngung

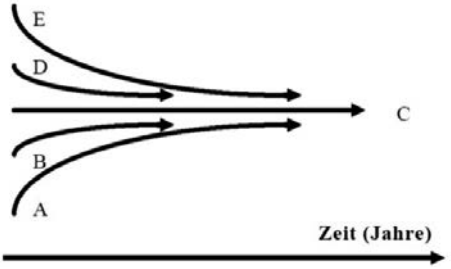


Abb. 2: Schematische Darstellung der P-Düngewirkung auf die P-Bodengehalte bei Einstufung in unterschiedliche P-Gehaltsklassen (Kerschberger et al. 1997).

Die Festlegung der P-Gehaltsklassen für die Bewertung der Nährstoffverfügbarkeit im Boden sollte in regelmäßigen Abständen überprüft werden um beispielsweise Änderungen der landwirtschaftlichen Praxis (z.B. veränderte Bodenbearbeitung, Fruchtfolgen, Applikationstechniken) sowie der politischen und der rechtlichen Rahmenbedingungen Rechnung zu tragen. So wird auch die Berücksichtigung aktualisierter wissenschaftlicher Auswertungen zurückliegender langjähriger Versuchsreihen und zusätzlicher neuerer Versuchsergebnisse sichergestellt. Aus zahlreichen P-Düngungsversuchen zu Ackerkulturen und Grünland, die seit Mitte der 1990er Jahre durchgeführt wurden (Greiner et al. 2010, Hege et al. 2008, Kuchenbuch und Buczko 2011, Lorenz 2004, Pasda et al. 2011, Römer 2009, Schuch et al. 2013), konnte abgeleitet werden, dass eine Absenkung der Richtwerte angezeigt war. Basierend auf diesen Auswertungen wurde von Wiesler et al. (2018) die bis dahin vorliegende Bewertung überarbeitet. Die Überarbeitung der Richtwerte wurde auch angestoßen durch die generell zunehmende Bedeutung von Aspekten der Ressourcen- und Umweltschonung in der Gesellschaft (und die damit verbundene stärkere Berücksichtigung von Umweltzielen in der Landwirtschaft) sowie die sich zunehmend schwieriger gestaltenden ökonomischen Rahmenbedingungen für landwirtschaftliche Betriebe in Deutschland. Zu beachten ist dabei, dass auch schon anhand der von Kerschberger et al. (1997) ausgewerteten P-Düngungsversuche eine Festlegung auf „niedrigere“ P-Richtwerte hätte erfolgen können, wenn auf eine Risikominimierung für einige wenige Situationen verzichtet worden wäre, in denen zur Erreichung des optimalen Ertragsniveaus höhere P-Gehalte im Boden erforderlich erschienen.

Im Vergleich zu den im VDLUFA-Standpunkt 1997 von Kerschberger et al. (1997) vorgestellten Werten wurden die Richtwerte für die P-Gehaltsklasse C moderat auf 3 – 6 mg CAL-P pro 100 g Boden abgesenkt und nachfolgend auch die Werte für die anderen Gehaltsklassen angepasst (Tab. 1). Als wichtiger Standortfaktor mit Einfluss auf die P-Verfügbarkeit wird für Trockengebiete (weniger als 550 mm) der Jahresniederschlag berücksichtigt.

Tab. 1: Gegenüberstellung der Richtwerte zur Einteilung der P Gehaltsklassen 1997 (Kerschberger et al. 1997) bzw. 2018 (Wiesler et al. 2018) sowie die daraus abgeleitete Düngeempfehlung und die zu erwartende Düngewirkung auf den Ertrag.

Gehalts-klasse	Richtwerte 1997 mg P/100 g	Richtwerte* 2018 mg P/100 g	Dünge-empfehlung	Düngewirkung auf Ertrag
A	< 2	< 1,5	stark erhöht	hoch -> Optimalertrag
B	2,1 - 4,4	1,5 - 3,0	erhöht	mittel -> Optimalertrag
C	4,5 - 9,0	3,1 - 6,0	Abfuhr	Optimalertrag
D	9,1 - 15,0	6,1 - 12,0	vermindert	Optimalertrag gesichert
E	> 15,1	> 12,0	keine	keine -> Optimalertrag

* in Trockengebieten (weniger als 550 mm Jahresniederschlag) betragen die Richtwerte in GK A < 2,5, in GK B 2,5 – 5,0, in GK C 5,1 – 7,5, in GK D 7,6 – 12,0 und in GK E > 12,0 mg CAL-P je 100 g Boden

Bei der Festlegung der P-Düngermenge sollten neben Standort- und Pflanzenfaktoren immer auch Bewirtschaftungsbedingungen (z.B. Bodenbearbeitungsintensität, Düngerapplikationsverfahren), die die Nährstoffverfügbarkeit beeinflussen, berücksichtig werden. Sinnvoll ist es die Gesamt-Düngermenge so aufzuteilen, dass „bedürftige“ im Vergleich zu weniger „bedürftigen“ Kulturen in einer Rotation einen höherer Anteil erhalten.

Perspektiven

Eine weitergehende Differenzierung der Richtwerte zur Abgrenzung der P-Gehaltsklassen z.B. mittels zusätzlicher Boden- oder Standstandortfaktoren (neben der Einstufung der Wasserverfügbarkeit) ist anhand des vorliegenden Datenmaterials bisher ebenso wenig gelungen wie die feinteiligere Abstufung der Zu- bzw. Abschläge bei der Ableitung der P-Düngermenge. Alternativ wird vielfach vorgeschlagen die P-Düngerbedarfsprognose durch die Verwendung erweiterter, anderer oder auch sogenannter „innovativer“ Bodenuntersuchungsverfahren zu verbessern.

Da Pflanzen auch tiefere Bodenschichten durchwurzeln und aus diesen Bodenbereichen Phosphor aufnehmen, könnte durch die zusätzliche Untersuchung von Bodenproben aus den Schichten unterhalb der Krume eine bessere Abschätzung des Beitrags zur P-Ernährung ermöglicht werden. So konnten Kuhlmann und Baumgärtel (1991) zeigen, dass Pflanzenbestände 37 – 85 % der Gesamtaufnahme von P aus dem Unterboden realisieren. Die große Variabilität im Beitrag des Unterbodens zur P-Ernährung der Pflanzen ist auf das unterschied-

liche Nährstoffangebot im Ober- bzw. Unterboden und auf die unterschiedliche Durchwurzelung des Unterbodens zurückzuführen.

Denkbar wäre auch die Erfassung weiterer Boden-P-Fraktionen bei der Bodenuntersuchung. Steffens et al. (2010) weisen darauf hin, dass der Anteil des organisch gebunden P am Gesamt-P im Oberboden zwischen 20 – 80 % schwanken kann, aber der P_{org}-Pool bisher in der P-Düngebedarfsprognose nicht berücksichtigt wird. Ebenso könnte die Berücksichtigung des Gehaltes an oxalatlöslichem Eisen und Aluminium, wie dies beispielsweise von Schweitzer et al. (2013) für carbonatfreie Böden geprüft wurde, zu einer präziseren Bewertung des pflanzenverfügbaren P im Boden beitragen.

Ein anderer Ansatz wäre es die Kinetik der P-Freisetzung zu charakterisieren. Floßmann und Richter (1982) haben dazu eine entsprechende Extraktionsmethode entwickelt, die ergänzend zur Standard-Bodenuntersuchung eingesetzt werden könnte. Zorn et al. (2015) haben diese Methodik an mehreren P-Dauerversuchen geprüft und ein 3-stufiges Bewertungsschema (hohe, mittlere oder niedrige P-Freisetzungsrate) zur Modifikation der auf den Gehaltsklassen basierten P-Düngeempfehlung entwickelt. Mit der sogenannten DGT-Methodik wird versucht die P-Aufnahme aus der Bodenlösung durch Pflanzenwurzeln nachzustellen (Mason et al. 2010). Im Gegensatz zur Verwendung von Ionenaustauschern wird bei der P-Bestimmung mittels DGT-Methode durch die Nutzung von Eisen(III)-hydroxidoxid als Sorbent eine sehr selektive Bindung von Phosphat-Ionen aus der Bodenlösung erreicht (Mason et al. 2008).

Produktionstechnische Maßnahmen zur Verbesserung der P-Effizienz sind ein weiterer Ansatzpunkt um zukünftig bei abgesenkten Richtwerten auch unter ungünstigeren Bedingungen eine gute P-Versorgung der angebauten Kulturen sicherzustellen. Im Rahmen der guten landwirtschaftlichen Praxis müssen dabei verschiedene Aspekte mit Relevanz für die P-Verfügbarkeit beachtet werden. Die Vermeidung (bzw. Behebung) von Bodenverdichtungen und eine gute Bodenstruktur sorgen für eine gute Durchwurzelbarkeit des Standortes und damit für eine optimale räumliche Zugänglichkeit der Pflanzen für Phosphor im Boden. Eine der Nutzungsrichtung (Acker – Grünland), der Bodenart und dem Humusgehalt angepasste Kalkzufuhr ist dazu unerlässlich (Kerschberger et al. 2000). Dieses Maßnahmenbündel führt insgesamt zu einer deutlich besseren Regenverdaulichkeit und damit zu einer Verringerung des Oberflächenabflusses sowie der wasserbedingten Bodenerosion und damit zu einer drastischen Reduktion von P-Verlust. Zusätzlich kann durch Einarbeitung von appliziertem P in den Boden das Verlustrisiko durch oberflächlichen Abtrag vermindert werden und die räumliche Zugänglichkeit für die Wurzeln verbessert werden.

Weitere Ansatzpunkte ergeben sich für den Landwirt selbstverständlich bei der P-Düngung. Bei der Auswahl des P-Düngers sind vollaufgeschlossene, direkt pflanzenverfügbare Produkte als günstig einzustufen. Teil- oder nicht aufgeschlossene Rohphosphate sind nur als Nischenprodukte für saure Böden einzustufen und/oder für ökologisch bewirtschaftete Flächen, die aufgrund der jeweiligen Vorgaben der Anbauverbände in der P-Düngerauswahl eingegrenzt sind. Unabhängig von der P-Bindungsform im Dünger, nehmen in die Bodenlösung abgegebene Phosphat-Ionen an Umsetzungsprozessen im Boden teil, die in der Regel dazu beitragen, dass die Pflanzenverfügbarkeit des gedüngten P mit der Zeit abnimmt. Hier kann der Landwirt durch die platzierte Applikation von P, die u.a. zu einer verringerten Kontaktfläche zwischen P-Dünger und Boden führt, eingreifen. Eine Auswertung umfangreicher Daten aus Feldversuchen im Rahmen einer Meta-Studie durch Nkebiwea et al. (2016) zeigt aber, dass der Platzierungseffekt sehr variable ist und u.a. abhängt von Platzierungsverfahren und -tiefe. Bezüglich P ist insbesondere von Bedeutung, dass die Ertragssteigerungen im Vergleich zur breitflächig oberflächlichen Applikation in der Regel deutlicher sind, wenn P zusammen mit Ammonium-haltigen Düngern ausgebracht wird.

Insbesondere bei langjähriger pflugloser, nicht-wendender Bodenbearbeitung kann der im Boden wenig mobile Phosphor in den oberen 0 bis 10 cm Tiefe angereichert werden, während die P-Gehalte in den darunter liegenden Bodenschichten durch den P-Entzug absinken. In Trockenperioden führt dann die Austrocknung der obersten Bodenschicht dazu, dass eine bedarfsgerechte Ernährung der Pflanzen nicht mehr gewährleistet ist. Eine sogenannte „Unterfußdüngung“ mit wasserlöslichen P-Düngern, wie sie in Mais schon seit Jahrzehnten standartmäßig durchgeführt wird, kann auch bei Getreide und Raps die P-Ernährung absichern (Zorn et al. 2011). Weiterhin konnten Westerschulte et al. (2018) in 2-jährigen Feldversuchen zu Mais zeigen, dass auch durch die Injektion von Gülle eine vergleichbar gute P-Versorgung der Pflanzen zu realisieren war. Dabei sollte durch die Zugabe eines Nitrifikationshemmstoffs zur Gülle die Umwandlung von Ammonium-N zu Nitrat-N im Gülleband gehemmt werden.

Fazit

Für die Weiterentwicklung der P-Düngeempfehlung ist die vertiefte Auswertung von (langjährigen) Feldversuchen sinnvoll. So könnte der Einfluss standortspezifischer Parameter genauer bewertet werden und die Überprüfung weiterer Aspekte auf das P-Angebot (z.B. nachlieferbarer organisch gebundener Phosphor, verfügbare P-Mengen im Unterboden) in ihrer Bedeutung für die

P-Versorgung quantifiziert werden. Festzuhalten bleibt, dass das Konzept der P-Bodenuntersuchung darauf beruht, einen für die Ernährung der Pflanzen relevanten Anteil als sogenannten „pflanzenverfügbaren P-Pool“ zu erfassen und diesen entsprechend der Daten aus Düngungssteigerungsversuchen zu interpretieren. Das Ergebnis der Laboranalyse ist dabei nicht als „absolutes Maß“ für den pflanzenverfügbaren P-Gehalt im Boden zu verstehen, sondern ein Indikator für den Nährstoffzustand (Lorenz et al. 2017). Die Qualität der Düngebedarfsermittlung ist dabei am Ende abhängig von jedem einzelnen Teilschritt in der Verfahrenskette: Probenahme- und -vorbereitung, Laboranalyse, Interpretation der Untersuchungsergebnisse sowie Prognose des Düngebedarfs.

Literatur

Dünge-VO (2017): Düngeverordnung – Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2017 Teil I Nr. 32, 1305 – 1348.

Flossmann, R., Richter, D. (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.

Fritsch, F., Werner, W. (1987): Bindungsformen und Löslichkeitskriterien der aus langjähriger Düngung mit verschiedenen P-Formen angereicherten Bodenphosphate. Landwirtschaftliche Forschung 40, 153 – 158.

Greiner, B., Schuppenies, R., Hertwig, F., Hochberg, H., Riehl, G. (2010): Ergebnisse aus zwölfjährigen Phosphor- und Kaliumdüngungsversuchen auf Grünland. VDLUFA-Schriftenreihe 66, 157 – 168.

Günther, F. (1997): Hampered effluent accumulation process: Phosphorus management and societal structure. Ecological Economics 21, 159 – 174.

Hege, U., Wendland, M., Offenberger, K. (2008): Versuchsergebnisse zur Bedeutung der Bodenversorgung mit Phosphat und Kali. Wie hoch müssen die Nährstoffgehalte im Boden sein? Pflanzenbauwissenschaften 12, 53 – 63.

Jordan-Meille, L., Rubael, G.H., Ehlert, P.A.I., Genot, V., Hofman, G., Goulding, K., Recknagel, J., Provolo, G., Barraclough, P. (2012): An overview of fertilizer-P recommendations in Europe: Soil testing, calibration and fertilizer recommendations. Soil Use Management 28, 419 – 435.

Jungk, A., Claassen, N. (1997): Ion diffusion in the soil-root system. Advances in Agronomy 61, 53 – 110.

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. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 174, 171 – 185.

Kerschberger, M., Deller, B., Hege, U., Heyn, J., Kape, H.-E., Krause, O., Pollehn, J., Rex, M., Severin, K. (2000): Bestimmung des Kalkbedarfs von Acker- und Grünlandböden. Standpunkt des Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e.V. (VDLUFA), Speyer.

Kerschberger, M., Hege, U., Jungk, A. (1997): Phosphordüngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf. Standpunkt des Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e.V. (VDLUFA), Speyer.

Kuhlmann, H., Baumgärtel, G. (1991): Potential importance of the subsoil for the P and Mg nutrition of wheat. Plant Soil 137, 259 – 266.

Lorenz, F. (2004): Wenn P und K fehlen: So ändern sich Ertrag, Düngebedarf, Nährstoffausnutzung und Bodenvorräte. VDLUFA-Schriftenreihe 60, 705 – 712.

Lorenz, F., Olfs, H.-W., Schweitzer, K., Zorn, W. (2017): Anforderungen an Bodenuntersuchungsmethoden zur Düngebedarfsermittlung. Standpunkt des Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e.V. (VDLUFA), Speyer.

Marschner, P., Rengel, Z. (2012): Nutrient availability in soils. In: P. Marschner (Hrsg.) “Marschner’s Mineral Nutrition of Higher Plants”. Academic Press Ltd., London, Vereinigtes Königreich, 315 – 330.

Mason, S., McNeill, A., McLaughlin, M.J., Zhang, H. (2010): Prediction of wheat response to an application of phosphorus under field conditions using diffusive gradients in thin-films (DGT) and extraction methods. Plant and Soil 337, 243 – 258.

Mason, S.D., Hamon, R.E., Zhang, H., Anderson, J. (2008): Investigating chemical constraints to the measurement of phosphorus in soils using DGT (Diffusive Gradients in Thin-films) and resin methods. Talanta 74,779 – 787.

McLaughlin, M.J., Reuter, D.J., Rayment, G.E. (1999): Soil testing – principles and concepts. In: K.I. Peverill, L.A. Sparrow und D.J. Reuter (Hrsg.) „Soil Analysis: An Interpretation Manual”. CSIRO Publishing, Collingwood, Australien, 1 – 21.

Montag, D., Everding, W., Malms, S., Pinnekamp, J., Reinhardt, J., Fehrenbach, H., Arnold, U., Trimborn, M., Goldbach, H., Klett, W., Lammers, T. (2015): Bewertung konkreter Maßnahmen einer weitergehenden Phosphorrückgewinnung aus relevanten Stoffströmen sowie zum effizienten Phosphoreinsatz. Umweltbundesamt Texte 98.

Nkebiwea, P.M., Weinmann, M., Bar-Talc, A., Müller, T. (2016): Fertilizer placement to improve crop nutrient acquisition and yield: A review and meta-analysis. Field Crops Research 196, 389 – 401.

Olfs, H.-W. (2019): Die klassische Bodenuntersuchung zur Ermittlung des Düngebedarfs. In: A.H. Wissemeier und H.-W. Olfs (Hrsg.) "Diagnose von Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen". AgriMedia, ERLING Verlag GmbH & Co. KG, Clenze.

Pasda, G., Zerulla, W., Willkommen, S. (2011): Ergebnisse aus P-Düngungsversuchen der BASF SE für die gemeinsame Auswertung zur Überarbeitung des P-VDLUFA-Standpunktes. VDLUFA-Schriftenreihe 67, 154 – 161.

Römer, W. (2009): Ansätze für eine effizientere Nutzung des Phosphors auf der Basis experimenteller Befunde. Berichte über Landwirtschaft 87, 5 – 30.

Schäfer, P., Reiner, L. (1973): Die Ergebnisse von Herbst- und Frühjahrs-Bodenuntersuchungen auf Intensivweiden und ihre Beurteilung mit Hilfe der Diskriminanzanalyse. Zeitschrift Acker- und Pflanzenbau 137, 287 – 306.

Schuch, H., Taube, F., Lausen, P., Techow, E., Herrmann, A. (2013): Wurzelmasse und C-Sequestrierung von Grünland: Einfluss der Phosphor- und Kaliumversorgung. In: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.) „Mehr Eiweiß vom Grünland und Feldfutterbau: Potenziale, Chancen und Risiken", 57. Jahrestagung der Arbeitsgemeinschaft für Grünland und Futterbau der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e.V., 57. Tagungsband, 222 – 226.

Schweitzer, K., Kulhánek, M., Balík, J. (2013): 2Bewertung des pflanzenverfügbaren Phosphates im Boden – Präzisierung durch die Berücksichtigung des Gehaltes an oxalatlöslichem Eisen und Aluminium. VDLUFA-Schriftenreihe 69, 226 – 233.

Smil, V. (2000): Phosphorus in the environment: Natural flows and human interferences. Annual Review of Energy and the Environment 25, 53 – 88.

Smit, A.L., Bindraban, P.S., Schröder, J.J., Conijn, J.G., van der Meer, H.G. (2009): Phosphorus in agriculture: Global resources, trends and developments. Plant Research International Report No. 282.

Spiegel, H., Čermák, P., de Haan, J., Füleky, G., Grignani, C., D´Hose, T., Staugaitiene, L.R., Zorn, W., Guzmán, G., Pikuła, D., Jordan-Meille, L. (2014): Düngeempfehlungen in Europa. VDLUFA Schriftenreihe 70, 48 – 56.

Steen, I. (1998): Phosphorus management in the 21st century. Management of a non-renewable resource. Phosphorus and Potassium 217, 25 – 31.

Steffens, D., Leppin, T., Luschin-Ebengreuth, N., Yang, Z.M., Schubert, S. (2010): Organic soil phosphorus considerably contributes to plant nutrition but is neglected by routine soil-testing methods. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 173, 765 – 771.

Tang, X., Ma, Y., Hao, X., Li, X., Li, J., Huang, S., Yang, X. (2009): Determining critical values of soil Olsen-P for maize and winter wheat from long-term experiments in China. Plant and Soil 323, 143 – 151.

Van Vuurena, D.P., Bouwman, A.F., Beusen, A.H.W. (2010): Phosphorus demand for the 1970 – 2100 period: A scenario analysis of resource depletion. Global Environmental Change 20, 428 – 439.

VDLUFA (1991): Probenahme auf Grünlandstandorten. In: Verband Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e.V. (Hrsg.) „Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (VDLUFA-Methodenbuch), Band I Die Untersuchung von Böden“. VDLUFA-Verlag, Darmstadt.

VDLUFA (2007): Probenahme für die Untersuchung auf pflanzenverfügbare Nährstoffe in Acker- und Gartenböden. In: Verband Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e.V. (Hrsg.) „Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (VDLUFA-Methodenbuch), Band I Die Untersuchung von Böden“. VDLUFA-Verlag, Darmstadt.

Vetter, H., Früchtenicht, K., Mählhop, R. (1977): Untersuchungen über den Aussagewert verschiedener Bodenuntersuchungsmethoden für die Ermittlung des Phosphatdüngebedarfs. Landwirtsch. Forsch. 34/II, 121 – 132.

Werner, W. (2006): Düngung von Böden. Kap. 6.4, 1-63. In: H.P. Blume, P. Felix-Henningsen, W.R. Fischer, H.-G. Frede, R. Horn, K. Stahr (Hrsg.) Handbuch der Bodenkunde. 26. Ergänzung Lfg. 11/06 – Ecomed, Landsberg.

Westerschulte, M., Federolf, C.-P., Trautz, D., Broll, G., Olfs, H.-W. (2018): Slurry injection with nitrification inhibitor in maize: Plant phosphorus, zinc, and manganese status. Journal of Plant Nutrition 41, 1381 – 1396.

Wiesler, F., Appel, T., Dittert, K., Ebertseder, T., Müller, T., Nätscher, L., Olfs, H.-W., Rex, M., Schweitzer, K., Steffens, D., Taube, F., Zorn, W. (2018): Phosphordüngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf. Standpunkt des Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e.V. (VDLUFA), Speyer.

Zorn, W., Wagner, S., Heubach, M., Schröter, H. (2011): Nährstoffverteilung im Boden nach langjähriger pflugloser Bodenbearbeitung und ihre Konsequenzen für die P-Düngung. VDLUFA Schriftenreihe 67, 146 – 153.

Zorn, W., Schröter, H., Kiessling, G. (2015): Präzisierung des P-Düngebedarfs auf dem Ackerland durch zusätzliche Bodenuntersuchungen. VDLUFA Schriftenreihe 71, 86 – 93.

Phosphor als Problem für Recht und Politik

Prof. Dr. Dr. Felix Ekardt,
Forschungsstelle Nachhaltigkeit und Klimapolitik, Leipzig/Berlin

---

Prof. Ekardt verweist auf die Internetseite **http://www.felix-ekardt.eu/de/publikationen.html** auf der einschlägige Aufsätze publiziert werden:

„Publikationen von Felix Ekardt und der Forschungsstelle Nachhaltigkeit und Klimapolitik

Die Ergebnisse von Grundlagenforschung und Politikberatung der Forschungsstelle sind in einer großen Zahl deutsch- und englischsprachiger Publikationen dokumentiert. Generell bündelt, modifiziert, ergänzt und aktualisieren die eingangs hervorgehobenen Bücher wesentliche Teile der erarbeiteten Erkenntnisse, teilweise komprimiert; oft sind auch ältere durch neuere Publikationen von uns (teils) überholt. Deswegen wird nur ein kleinerer Teil der Publikationen nachstehend fett hervorgehoben. – Da die Forschungsstelle auf einer kleinen, beweglichen Struktur beruht, sind ihre Druckwerke bisher nahezu alle zumindest mitverfasst von Felix Ekardt als Gründer und Leiter (weitere Autoren nachstehend gemäß expliziter Angabe). Eine separate Auflistung der Publikationen einzelner FNK-Mitglieder jenseits von Felix Ekardt – vereinzelte eigenständige (die nachstehend nicht enthalten sind) sowie eine Reihe nachstehend in die Liste bereits integrierter gemeinsamer Publikationen – findet sich in den Lebensläufen in der Rubrik Projekte/Mitarbeiter.“

Phosphataneignung verschiedener Kulturpflanzen und Konsequenzen für die Bodenanalytik

Prof. Dr. Sven Schubert, Justus-Liebig-Universität, Gießen

1 Einleitung

Viele Wildpflanzen haben im Laufe der Evolution Strategien entwickelt, die es ihnen erlauben sich auch schlecht verfügbare Phosphate anzueignen. Diese Strategien basieren auf spezifischen Mechanismen, die in verschiedenen Arten oder auch Ökotypen unterschiedlich ausgeprägt sind, so dass es in der Aneignungseffizienz für Phosphat erhebliche Unterschiede gibt. Auch in Kulturpflanzen sind spezielle Strategien zu finden, die in geeigneten Fruchtfolgen genutzt werden können. Die Kenntnis sowohl der Phosphatfraktionen, die in Böden unterschiedlich stark vertreten sind, als auch der Aneignungsstrategien der Kulturpflanzen sind Voraussetzung für eine präzise Prognose der Phosphatverfügbarkeit durch die Bodenanalytik. Im Idealfall werden die Phosphatfraktionen, die für die Pflanze verfügbar sind, quantitativ erfasst. Im Folgenden sollen zunächst die Prozesse der Phosphataneignung, danach die Verfügbarkeit der Phosphatfraktionen und anschließend die Konsequenzen für die Bodenanalytik dargestellt werden.

2 Phosphataneignung

Die Phosphataneignung umfasst drei Prozesse, die zwar voneinander abhängig sind, aber getrennt betrachtet werden müssen:

1. Phosphataufnahme

2. Phosphattransport zur Wurzeloberfläche

3. Phosphatmobilisierung

2.1 Phosphataufnahme

Phosphat gilt als aufgenommen, wenn es das Plasmalemma der Wurzelzellen überwunden hat (Schubert 2017). Für die Phosphataufnahme gibt es in den Membranen der Wurzelzellen hochaffine Phosphattransporter, die die Aufnahme selbst aus sehr niedrigen freien Konzentrationen (Aktivitäten) der Bodenlösung ermöglichen. Stellt man junge Maiskeimlinge in eine niedrig konzentrierte Phosphatlösung, so erfolgt innerhalb von wenigen Stunden eine Absenkung der freien Phosphatkonzentration auf ca. 30 nM (Abb. 1). Diese minimale Phosphataktivität (a_{min}) zeigt, wie effizient die Phosphataufnahme, angetrieben durch einen Cotransport mit Protonen, erfolgt. Es kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die Nährstoffaneignung unter den meisten Bedingungen nicht durch die Nährstoffaufnahme begrenzt werden dürfte. Eine Ausnahmesituation stellt Sauerstoffmangel dar, der durch Staunässe verursacht wird. Unter diesen Bedingungen ist die Wurzelatmung beeinträchtigt und die Nährstoffaufnahme behindert (Steffens et al. 2005).

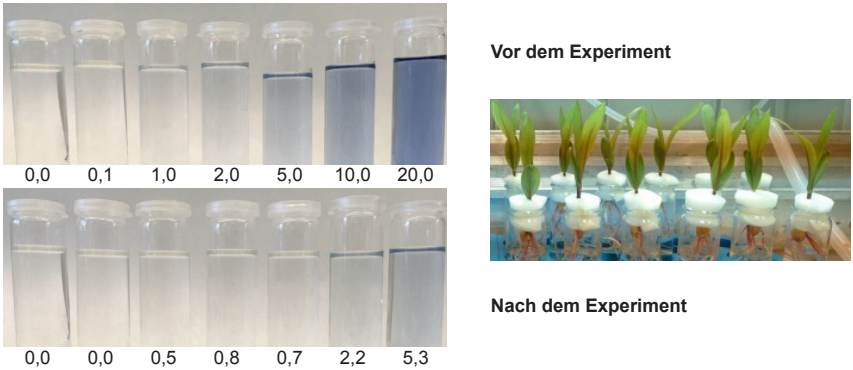


Abb. 1: Phosphataufnahme junger Maiskeimlinge aus einem Testmedium (0,1 mM $CaCl_2$ mit unterschiedlichen mikromolaren Konzentrationen an KH_2PO_4) während einer Testphase von 10 h. Die obere Reihe zeigt die Anfärbung von Phosphat in der Lösung mit der Blaumethode vor dem Experiment, die untere Reihe zeigt die Anfärbung nach 10 h Phosphataufnahme der Keimlinge (Photo: Plachta).

2.2 Phosphattransport zur Wurzeloberfläche

Aufgrund der geringen freien Phosphatkonzentration in der Bodenlösung erfolgt der Transport von Phosphat zur Wurzeloberfläche kaum über Massenfluss, sondern fast ausschließlich über Diffusion. Dieser Prozess wird durch das Ficksche Diffusionsgesetz beschrieben (Abb. 2). Die Diffusion von Phosphat zur Wurzeloberfläche wird durch die Phosphataufnahme an der Wurzeloberfläche

angetrieben, wodurch die Pflanze einen Diffusionsgradienten aufbaut. Neben dem a_{min}-Wert kommt der freien Phosphatkonzentration im Boden sowie dem Abstand zur Wurzeloberfläche eine wichtige Rolle für die Phosphatanlieferungsrate zu. Je höher die Phosphataktivität in der Bodenlösung und je kleiner der Abstand von der Wurzeloberfläche, desto größer der Diffusionsgradient und desto größer die potentielle Anlieferungsrate. Ein weit verzweigtes Wurzelsystem, wie es viele Gräser besitzen, sowie eine gute Mykorrhizierung vermindern die Diffusionswege und verbessern somit den Phosphattransport zur Wurzeloberfläche. Da Bodenverdichtungen die Durchwurzelung behindern, kommt der Bodenstruktur eine entscheidende Bedeutung zu, die in der Düngeempfehlung mit Hilfe der Bodenanalytik jedoch bisher nicht berücksichtigt wird. Ebenfalls nicht berücksichtigt wird die Bodenfeuchte. Austrocknung des Bodens vermindert den Diffusionskoeffizienten (Abb. 2) und erhöht die mittleren Diffusionswege (Abb. 3).

$$F = -D\ da/dx$$

F = Diffusion
D = Diffusionskoeffizient
a = Ionenaktivität
x = Abstand zur Wurzel
da/dx = Aktivitätsgradient

Abb. 2: Ficksches Diffusionsgesetz.

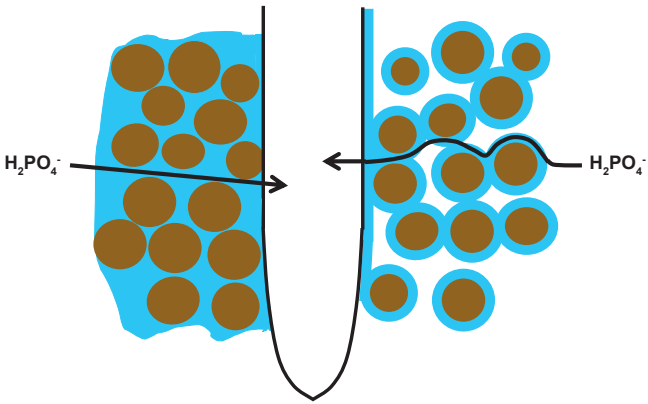


Abb. 3: Verlängerung der Diffusionswege bei Austrocknung des Bodens. Aufgrund der Austrocknung des Bodens bilden sich luftgefüllte Poren, so dass Phosphat nicht direkt zur Wurzeloberfläche diffundieren kann (nach Schubert 2017, modifiziert).

2.3 Phosphatmobilisierung

Die verfügbare Phosphatmenge der Bodenlösung lässt sich mittels Wasserextraktion erfassen. Diese Phosphatfraktion reicht für die Ernährung eines schnell wachsenden Pflanzenbestandes lediglich für wenige Tage. Daher kommt der Phosphatmobilisierung aus anderen Fraktionen eine besondere Bedeutung zu (Abb. 4). Durch Sekretion von Protonen, Hydroxylionen, organischen Anionen, Elektronen, Phenolen und Phosphatasen können sich Pflanzen diese Fraktionen z.T. erschließen.

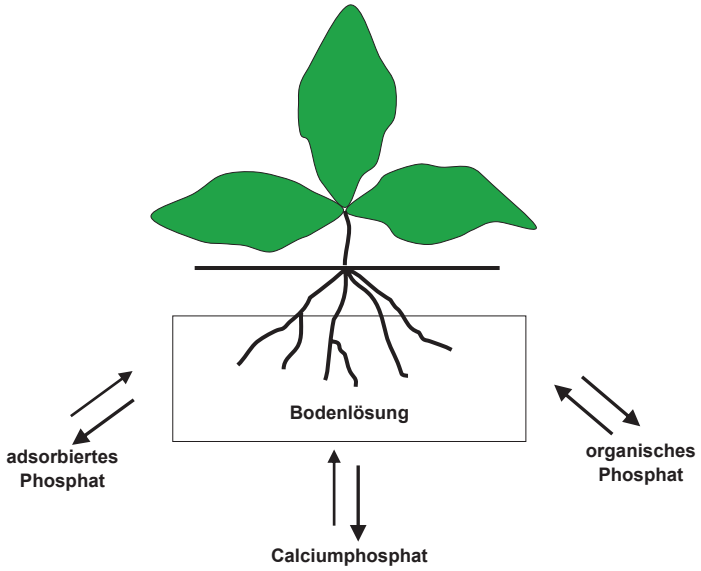


Abb. 4: Phosphatdynamik im Boden. Unterschiedlich gebundene Phosphate stehen mit Phosphat in der Bodenlösung im Gleichgewicht.

3 Verfügbarkeit der Phosphatfraktionen

3.1 Adsorbiertes Phosphate

Unter Phosphatadsorption versteht man einen Ligandenaustausch von Hydroxylionen gegen Phosphatanionen an den Oberflächen von Bodenmineralen (Abb. 5). Adsorbiertes Phosphat kann von Pflanzen in der Rhizosphäre desorbiert werden, wenn sie Hydroxylionen (Alkalisierung) oder organische Anionen abscheiden. Eine Alkalisierung der Rhizosphäre erfolgt bei Nitraternährung (Schubert und Yan 1997). Spezifische Mechanismen wie Sekretion von Oxalat

der Zuckerrübe oder Sekretion von Citrat besonders an den Wurzelspitzen von Raps tragen ebenfalls zur Mobilisierung von adsorbiertem Phosphat bei (Gerke 2015).

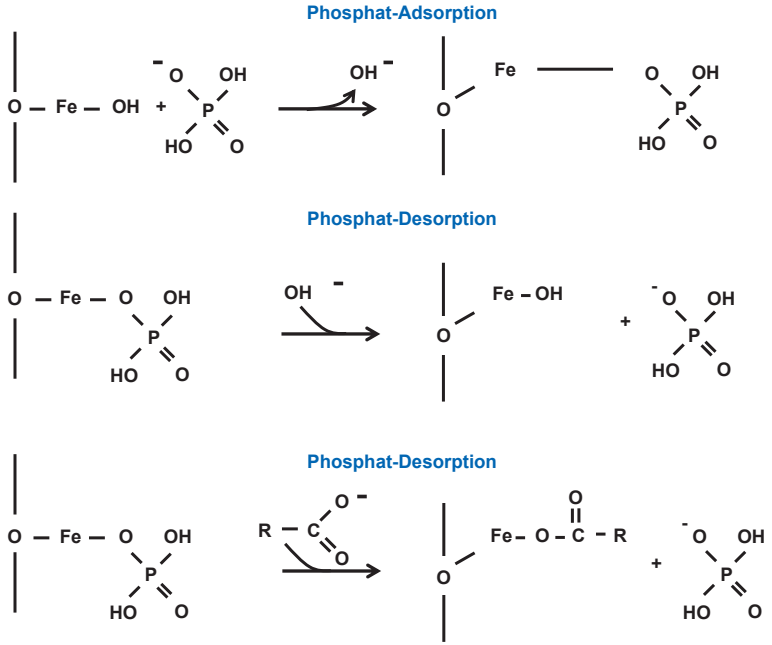


Abb. 5: Phosphatadsorption und -desorption an der Oberfläche von Bodenmineralen. Phosphatdesorption kann durch Ligandenaustausch mit Hydroxylionen und organischen Anionen erfolgen.

3.2 Calciumphosphate

Eine zweite wichtige Fraktion stellen Calciumphosphate dar. Mobilisierung dieser Phosphatfraktion erfordert im Gegensatz zu adsorbierten Phosphaten saure Bedingungen (Abb. 6). Daher erhöht die Azidifizierung der Rhizosphäre die Verfügbarkeit dieser Fraktion. Eine physiologisch saure Ernährung, wie sie bei stabilisierter Ammoniumernährung (Einsatz von Nitrifikationsinhibitoren), bei N_2-fixierenden Leguminosen und bei Einsatz des CULTAN-Verfahrens erreicht wird, kann zur Freisetzung von verfügbarem Phosphat aus dieser Fraktion beitragen. Auch diese Fraktion kann sich Raps durch Nettoabscheidung von Protonen an der Wurzelspitze erschließen.

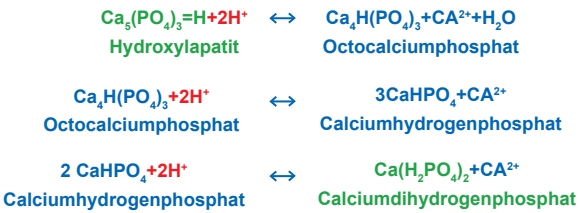


Abb. 6: Dynamik der Calciumphosphate, dargestellt am Beispiel eines Hydroxylapatits. Ansäuerung ist Voraussetzung für die Überführung von nicht löslichen Calciumphosphaten über Zwischenformen in lösliche Phosphate.

3.3 Organische Phosphate

Die dritte wichtige Fraktion stellen organisch gebundene Phosphate dar. Es konnte gezeigt werden, dass viele Kulturpflanzenarten sich diese Fraktion durch hydrolytische Aktivität einer pflanzeneigenen Phosphatase ähnlich gut aneignen können wie CaH_2PO_4 (Abb. 7). Eine wichtige Ausnahme stellt die Kartoffel dar. Ursache ist nicht eine mangelnde Aktivität der Phosphatase (V_{max}-Wert), sondern eine im Vergleich zu Raps offensichtlich geringere Affinität des Enzyms zu seinem Substrat (k_m-Wert), das bei geringen Konzentrationen von organisch gebundenem Phosphat in der Rhizosphäre nicht ausreichend hydrolysieren kann (Wening 2016). Da sich aber auch die Kartoffel in einem biologisch aktiven Boden organisch gebundenes Phosphat aneignen kann (Abb. 8), muss die Schlussfolgerung gezogen werden, dass sich die Kartoffel organisch gebundene Phosphate mit Hilfe von Bodenmikroorganismen erschließen kann.

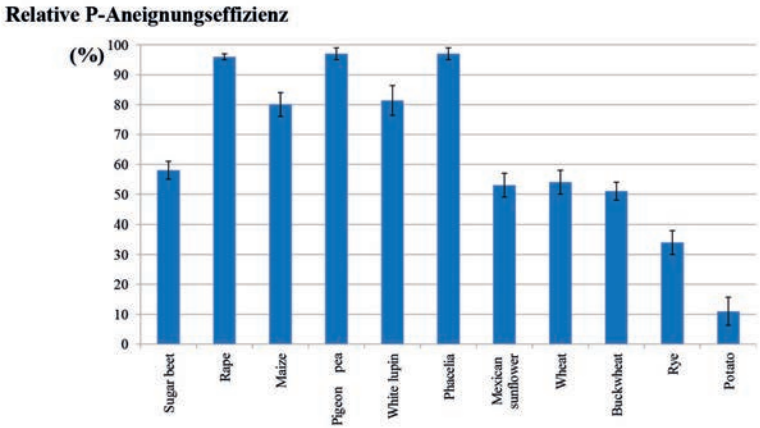


Abb. 7: Relative Aneignungseffizienz für organisches Phosphat von verschiedenen Pflanzenarten in einem biologisch inaktiven Boden. Die relative Aneignungseffizienz wurde bestimmt, indem die Aneignung aus einer nicht gedüngten Variante jeweils von der mit Phytat oder CaH_2PO_4 gedüngten Variante subtrahiert wurde. Der Quotient der erhaltenen Werte (Phytat-Variante : CaH_2PO_4-Variante) wurde mit 100 multipliziert und ergab die relative P-Aneignungseffizienz. Angegeben sind die Mittelwerte aus drei Wiederholungen ± Standardfehler (nach Steffens et al. 2010, ergänzt nach Wening 2016).

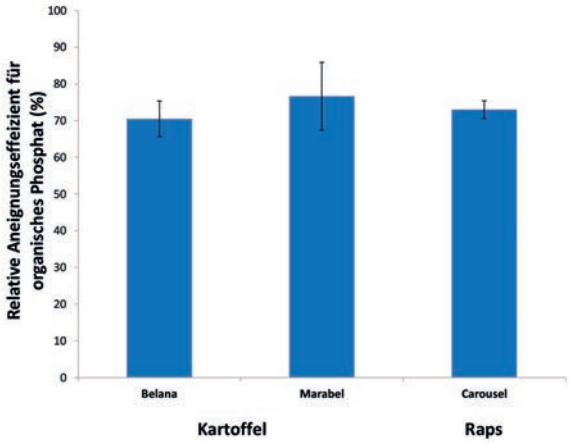


Abb. 8: Relative Aneignungseffizienz für organisches Phosphat von zwei Kartoffelsorten (Belana und Marabel) und einer Rapssorte (Carousel) in einem biologisch aktiven Boden. Die relative Aneignungseffizienz wurde wie für Abb. 7 beschrieben bestimmt. Angegeben sind die Mittelwerte aus drei Wiederholungen ± Standardfehler (Wening 2016).

Eine besondere Strategie zur Mobilisierung von Bodenphosphaten haben Pflanzen mit der Ausbildung von Proteoidwurzeln entwickelt. Dabei handelt es sich um büschelartige Anhäufungen von Seitenwurzeln zweiter Ordnung mit determiniertem Wachstum. Der Vorteil dieser Strategie besteht nicht in erster Linie in der Vergrößerung der Wurzeloberfläche, sondern in der Bildung von rhizosphärischen Mikrokompartimenten, die eine effiziente Aufkonzentrierung der Sekrete ermöglichen (Abb. 9). Die einzige Kulturpflanze, die solche Proteoidwurzeln ausbildet, ist die Weiße Lupine. Sie gibt eine Vielzahl von Exsudaten in diese Mikrokompartimente ab (Abb. 10), so dass eine effiziente Mobilisierung der oben beschriebenen drei Phosphatfraktionen ermöglicht wird.

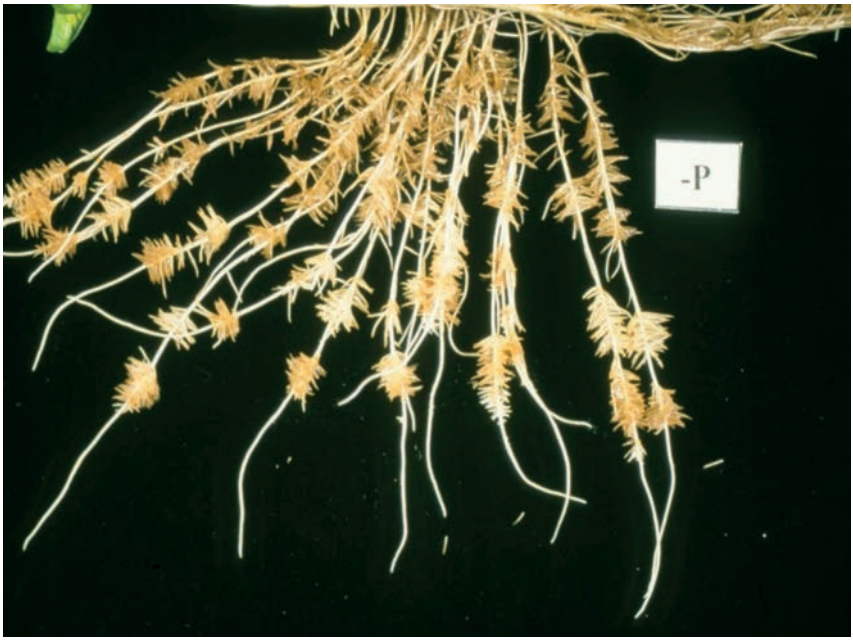


Abb. 9: Proteoidwurzeln der Weißen Lupine (Lupinus albus L.) induziert durch Phosphatmangel (Photo: Yan).

- **Organische Anionen:** Mobilisierung von anorganischem Phosphat (Ca-P, Al-P, Fe-P)
- **Protonen:** Mobilisierung von Calciumphosphaten
- **Saure Phosphatase:** Mobilisierung von organisch gebundenem Phosphat
- **Phenole:** Hemmung des raschen Abbaus von Wurzelexsudaten und reduzierende Wirkung
- **Elektronen:** Membran-gebundene Reduktase

Abb. 10: Exsudate von Proteoidwurzeln der Weißen Lupine.

3.4 Okkludierte Phosphate

Die Abgabe von Elektronen und reduzierend wirkenden Phenolen kann sogar durch Fe-Oxide und Fe-Hydroxide okkludierte Phosphate erschließen, die bisher als unverfügbar angesehen wurden. Diese Phosphatfraktion findet sich besonders in sauren tropischen Böden wie den Ferralsolen. Die Reduktion von Eisen zerstört die Ummantelung und mobilisiert das Phosphat (Abb. 11). Da Aluminium nicht reduziert werden kann, beschränkt sich die Mobilisierung auf Fe-haltige Oxide und Hydroxide. Daher kann die Weiße Lupine (im Gegensatz zu Mais, der okkludiertes Phosphat nicht mobilisieren kann) zwar Fe-Oxid-okkludiertes Phosphat, aber nicht Al-Oxid-okkludiertes Phosphat mobilisieren (Abb. 12).

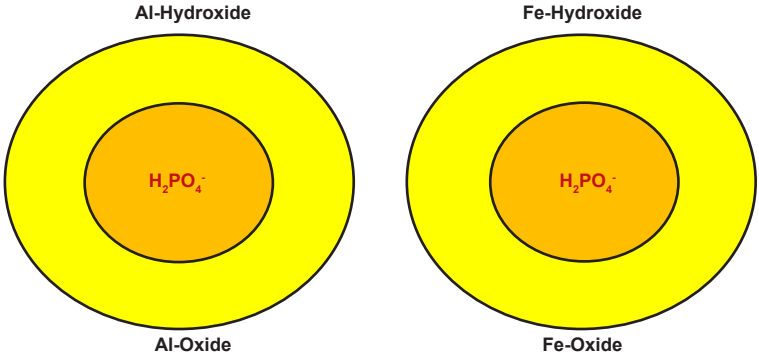


Abb. 11: Phosphatokklusion durch Al-Oxide/Hydroxide und Fe-Oxide/Hydroxide sowie Mobilisierung von Fe-okkludiertem Phosphat durch Reduktionsprozesse.

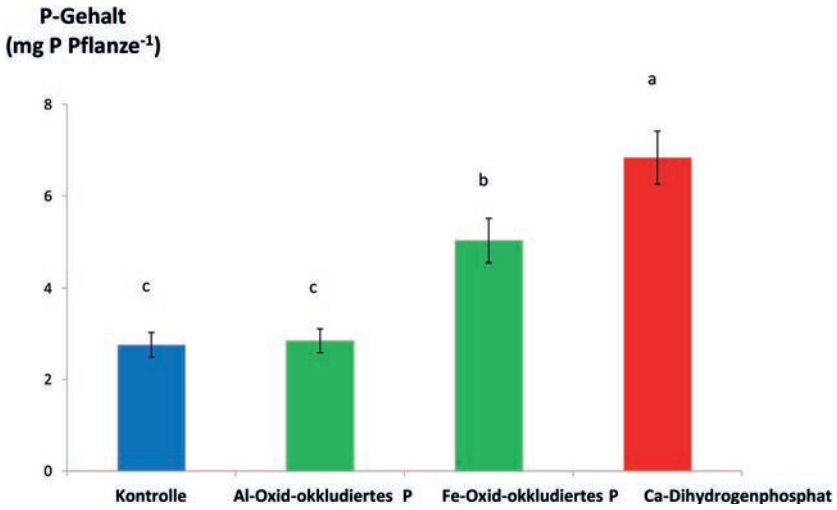


Abb. 12: Einfluss der Düngung mit okkludiertem Phosphat oder löslichem Phosphat auf die P-Aufnahme der Weißen Lupine. Angegeben sind die Mittelwerte aus drei Wiederholungen ± Standardfehler (Schubert et al. 2019).

4 Konsequenzen für die Bodenanalytik

Je nach den besonderen Voraussetzungen der Standorte haben sich unterschiedliche Methoden der Bodenanalyse bewährt. In Deutschland werden insbesondere die CAL-Methode (bzw. DL-Methode) und die EUF-Methode angewandt. Die CAL-Methode erfasst Phosphate der Bodenlösung, adsorbierte Phosphate aufgrund von Ligandenaustausch (mit Acetat, Lactat) und zum Teil Calciumphosphate aufgrund des niedrigen pH-Wertes der Austauscherlösung (pH 4,1), aber nicht organisch gebundene Phosphate. Die Nichterfassung von organischen Phosphaten trifft auch für die anderen Routinemethoden zu (Tab. 1). Da organisch gebundene Phosphate auf vielen Standorten eine wichtige Fraktion darstellen, ist die Quantifizierung des verfügbaren Anteils der organischen Phosphate eine dringende Herausforderung für die Verbesserung der Bodenanalytik, um eine Unterschätzung der Phosphatverfügbarkeit und damit Umweltbelastungen zu vermeiden.

Tab. 1: Einfluss der P-Düngung (100 mg P/100 g Boden) in Form von Na-Hexaphytat und $Ca(H_2PO_4)_2$ auf die extrahierbare P-Menge. Angegeben sind die Mittelwerte aus drei Wiederholungen ± Standardfehler (nach Steffens et al. 2010).

Methode	Kontrolle	Na-Hexaphytat	$Ca(H_2PO_4)_2$
Mehlich-III	8,52 (±0,15)	10,01 (±0,01)	86,20 (±9,84)
P-Wasser	1,21 (±0,06)	1,40 (±0,07)	31,45 ±(2,74)
Olsen	3,33 (±0,17)	2,71 (±0,17)	67,06 (±5,22)
CAL	4,53 (±0,44)	5,12 (±0,35)	80,42 (±5,82)
DL	8,46 (±0,15)	8,58 (±0,11)	79,29 (±5,65)
EUF (1.+2. Fraktion)	4,16 (±0,11)	5,61 (±0,28)	47,34 (±3,80)

Die Durchwurzelbarkeit des Bodens sollte bei der Prognose der Düngebedürftigkeit eines Standortes ebenso Berücksichtigung finden wie die Pflanzenarten der Fruchtfolge (Hallama 2019). Die züchterische Verbesserung von Mechanismen, die zur Mobilisierung bestimmter Phosphatfraktionen beitragen, könnte helfen, das große Phosphatpotential (meistens mehrere hundert kg P/ha) landwirtschaftlicher Böden effizienter zu nutzen.

5 Literaturverzeichnis

Gerke, J.: The aquisition of phosphate by higher plants: Effect of carboxylate release by roots. A critical review. J. Plant Nutr. Soil Sci. 178, 351-364 (2015)

Hallama, M., C. Pekrun, H. Lambers und E. Kandeler: Hidden miners – the roles of cover crops and soil microorganisms in phosphorus cycling through agroecosystems. Plant Soil 434, 7-45 (2019)

Schubert, S. Pflanzenernährung. 3. Auflage, utb 2802, Eugen-Ulmer-Verlag Stuttgart (2017)

Schubert, S., D. Steffens und I. Ashraf: Is occluded phosphate plant-available? J. Plant Nutr. Soil Sci. (2019, eingereicht)

Schubert, S. und F. Yan: Nitrate and ammonium nutrition of plants: Effects on acid/base balance and adaptation of root cell plasmalemma H+ ATPase. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 160, 275-281 (1997)

Steffens, D., B. W. Hütsch, T. Eschholz, T. Lošák und S. Schubert: Water logging may inhibit plant growth primarily by nutrient deficiency rather than nutrient

toxicity. Plant Soil Environ. 51, 545-552 (2005)

Steffens, D., T. Leppin, N. Luschin-Ebengreuth, Z. M. Yang und S. Schubert: Organic soil phosphorus considerably contributes to plant nutrition but is neglected by routine soil-testing methods. J. Plant Nutr. Soil Sci. 173, 765-771 (2010)

Wening, A. S.: Pflanzenverfügbares organisch gebundenes Phosphat in Abhängigkeit von Pflanzenart und Bodeneigenschaften. Dissertation am Fachbereich Agrarwissenschaften, Ökotrophologie und Umweltmanagement, Justus-Liebig-Universität Giessen (2016).

Phosphat im Kreislauf führen – Notwendigkeiten, Möglichkeiten, Perspektiven

Prof. Dr. Torsten Müller, Universität Hohenheim, Stuttgart

Ein Manuskript kann nicht zur Verfügung gestellt werden, wesentliche Teile sind veröffentlicht und die Rechte liegen bei FASE:

http://journal.hep.com.cn/fase/EN/10.15302/J-FASE-2019282

Perspektiven für die verbesserte Nutzung der Mykorrhizierung: Chancen und Grenzen

PD Dr. Christel Baum, Bodenkunde, Universität Rostock und Leibniz-WissenschaftsCampus „Phosphorforschung Rostock“

Einleitung

Die Mykorrhizierung ist als Gemeinschaft mit Pilzen die verbreitetste Symbiose von Pflanzen. Mehr als 80% aller Pflanzenarten, hierrunter auch die meisten Kulturpflanzenarten, sind mykorrhiziert. Pilzpartner sind hierbei Vertreter der Glomeromycota, die in den Feinwurzeln ihrer Wirtspflanzen inter- und intrazelluläre Hyphen und Arbuskeln bilden. Arbuskeln sind bäumchenartige Gebilde in den Feinwurzelzellen, die den Bereich des Stoffaustausches zwischen den Symbiosepartnern darstellen (Abb. 1). Die Wirtspflanze wird durch den Pilzpartner mit Nährstoffen, insbesondere Phosphat, versorgt und der Pilzpartner von der Wirtspflanze mit Assimilaten versorgt. Arbuskuläre Mykorrhizapilze besitzen, im Gegensatz zu Knöllchenbakterien, eine geringe Wirtsspezifität. Sie können hierdurch aus der bodeneigenen Gemeinschaft alle potenziellen Wirtspflanzen besiedeln ohne, dass selbst nach langen Anbaupausen, eine Beimpfung erfolgen muss. Die Sporen der arbuskulären Mykorrhizapilze sind häufig um ein ca. 10-100faches größer als die Sporen vieler anderer Pilzarten. Sie können bei einigen Arten bis ca. 100 – 1000 µm Größe erreichen.

Im Rahmen der Pflanzenzüchtung wurde die Mykorrhizierungsneigung der Pflanzenarten nicht wesentlich beeinflusst, obwohl sich das Wurzelwachstum und die dominierende mikrobielle Gemeinschaft im Wurzelraum teilweise wesentlich verändert hat. Jedoch wurden, z.B. für Weizen, signifikante sortenspezifische Unterschiede in der Mykorrhizierungsneigung und -abhängigkeit nachgewiesen. Dies eröffnet die Möglichkeit im Rahmen der Pflanzenzüchtung den Nutzen von Mykorrhizierung für den Pflanzenbau zu erhöhen. Gegenwärtig wird dieses international insbesondere in der Weizenzüchtung getestet.

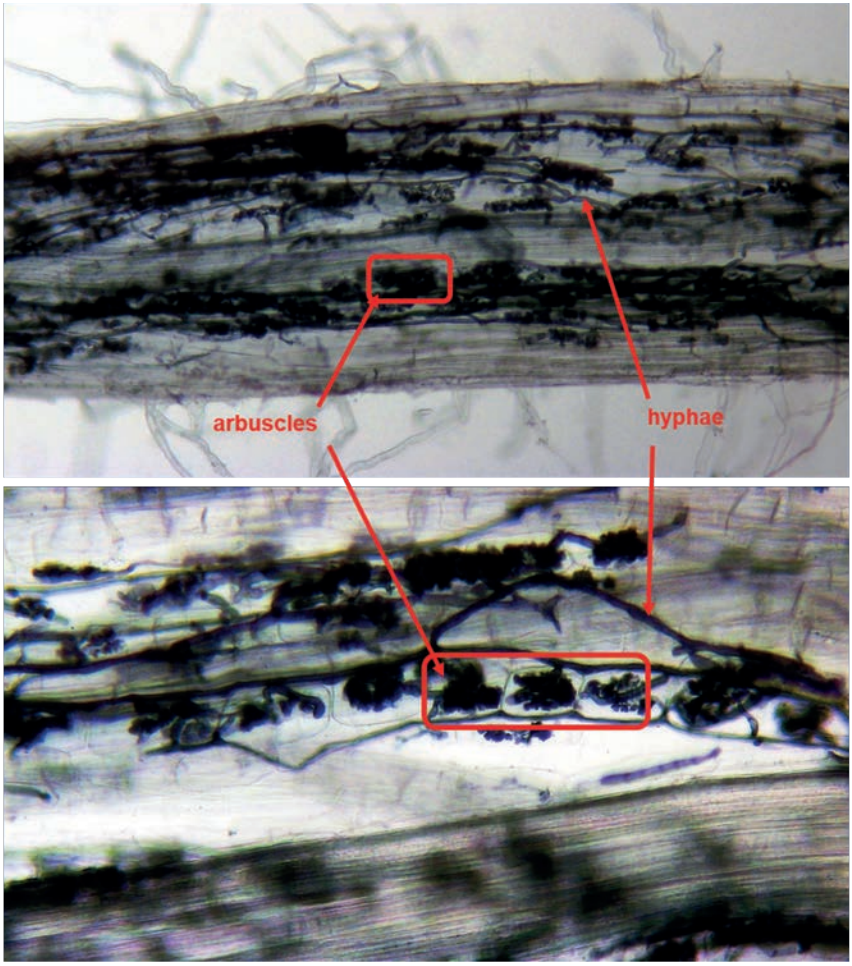


Abb. 1 Arbuskuläre Mykorrhizierung einer Maiswurzel (Foto: A. Zacher)

Die standortspezifische Besiedlungsdichte von Mykorrhizapilzen ist beeinflusst durch die bodenchemischen und -physikalischen Eigenschaften (z.B. Humusgehalt, Bodenart), den Nutzungstyp (Acker oder Grünland) und die Bewirtschaftung. Im Rahmen der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung üben die Bodenbearbeitung, die Düngung und die Fruchtfolgegestaltung den größten Einfluss auf die Besiedlungsdichte und Aktivität der Mykorrhizapilze aus. Hier besteht daher ein Optimierungspotenzial, insbesondere in der Reduzierung der Bodenbearbeitung bzw. in der Reduzierung der Bearbeitungstiefe.

Chancen und Grenzen der Nutzung von Mykorrhizierung

Einige Kulturpflanzen mit hoher wirtschaftlicher Bedeutung, wie zum Beispiel Mais und Weizen, sind wesentlich von ihrer Mykorrhizierung beeinflusst (Abb. 2). Die Wirkung der Mykorrhizierung auf die Wirtspflanzen erstreckt sich hierbei auf die Nährstoffversorgung, die Resistenz gegenüber bodenbürtigen Pathogenen und die Toleranz gegenüber abiotischem Stress. Vor dem Hintergrund des Klimawandels, verbunden mit Extremwetterlagen, wie extremen Regenfällen mit hoher Verschlämmungsgefahr und Hitzewellen mit Trockenstress, gewinnt insbesondere der letztgenannte Aspekt zunehmend an Bedeutung.

Bei extremen Regenfällen kann durch Pilzhyphen als Trägermaterial in den Drainagen der ereignisbezogene partikuläre Austrag von Phosphaten und Eisen kurzzeitig drastisch erhöht werden (Zimmer et al., 2016). Anderseits können Mykorrhizapilze bei Trockenheit durch ihr Hyphennetzwerk den Einzugsbereich der Pflanze für Wasser mehr als verdoppeln und zudem durch einen geringeren Durchmesser der Pilzhyphen als der Wurzelhaare und die Erreichung einer höheren Saugspannung die Wasserversorgung der Pflanzen nachhaltig verbessern und Trockenstress mindern.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt der Besiedlung des Bodens mit Mykorrhizapilzen liegt in ihrer Funktion zur Stabilisierung des Krümelgefüges über ihr Hyphennetzwerk und über die proteinbasierte Verklebung der Bodenkrümel. Dieser bodenökologische Nutzen ist in Ackerböden einer der wesentlichsten Vorzüge eines vitalen Netzwerkes von Mykorrhizapilzen im Boden (Rillig et al., 2019). Auch nicht-mykorrhizierte Kulturpflanzen, wie etwa Raps oder Lupine, profitieren von dieser bodenökologischen Wirkung, die wesentlich zum Erosionsschutz beiträgt.

Potenzieller Nutzen von Mykorrhizierung	Maßnahme zur Förderung	Grenzen der Wirksamkeit
Pflanzenernährung: verbesserte Versorgung mit P, N, S, Zn, Cu und Wasser	reduzierte Düngung (besonders P) steigert die Wirksamkeit der Mykorrhizierung	Mykorrhizapilze tragen keine zusätzlichen Nährstoffe in den Boden ein, sie können nur die Mobilisierung aus dem Bodenpool verbessern
Pflanzenschutz: induzierte Resistenz, erhöhte Toleranz von abiotischem Stress	Zwischenfruchtanbau, Leguminosen in der Fruchtfolge fördern die Mykorrhizierung der Folgekultur	Wirksamkeit variiert spezifisch in den Kombinationen von Wirtspflanze und Pilzart, keine sichere Prognose möglich
Bodenökologie: Bildung und Stabilisierung des Krümelgefüges, Erosionsschutz	reduzierte Bodenbearbeitung fördert die Hyphendichte und Wirksamkeit im Krümelgefüge	Wirksamkeit in Kombination mit den saprotrophen Bodenpilzen und den Bodenbakterien

Abb. 2 Potenzieller Nutzen, Förderung und Grenzen der Wirksamkeit von Mykorrhizierung

Mykorrhizierung wird bei reduzierter Düngung für die Pflanzenernährung an Bedeutung gewinnen, da insbesondere infolge von P-Düngung die Mykorrhizierungsraten der Wurzeln sinken (Peine et al., 2019). Mit sinkender Besiedlungsrate sinkt auch der Beitrag der Mykorrhizapilze an der Nährstoffversorgung der Wirtspflanzen. Bei hoher Nährstoffverfügbarkeit leistet Mykorrhizierung daher in der Regel keine Wachstumsförderung der Pflanzen.

Mykorrhizierung ist kein Ersatz für Düngung, da sie keinen Nährstoffeintrag bewirkt, sondern nur die Verfügbarkeit insbesondere von Phosphor, Stickstoff, Zink und Kupfer aus dem Bodenpool erhöht und den Einzugsbereich für diese Nährelemente vergrößert. Die Phosphor-, Zink- und Kupferversorgung von mykorrhizierten Pflanzen geschieht überwiegend über den Transfer durch den Pilzpartner. Grundsätzlich können sich Mykorrhiza-bildende Pflanzen jedoch auch vollständig ohne die pilzlichen Symbiosepartner ernähren, wenn der Boden eine hohe Nährstoffverfügbarkeit aufweist.

Mit Blick auf eine bessere Ausnutzung des P-Pools des Bodens, inklusive des Unterbodens, kann Mykorrhizierung einen wesentlichen Beitrag leisten (Sosa-Hernández et al., 2019). Hierbei wurde eine Besiedlung des Unterbodens bis in eine Tiefe von > 4 m nachgewiesen (de Araujo Pereira et al., 2018).

Düngungswirksamkeit kann Mykorrhizierung nur dann gewinnen, wenn Leguminosen, die neben der Symbiose mit Mykorrhizapilzen auch mit Knöllchenbakterien (Rhizobien) in Symbiose leben, zusammen mit Nicht-Leguminosen angebaut werden. Hierbei kann über das gemeinsame Hyphennetzwerk der vergesellschafteten Pflanzen ein Stickstofftransfer von den Leguminosen, aus der Fixierungsleistung der assoziierten Rhizobien, zu den Nicht-Leguminosen erfolgen. Dies ist z.B. für den Mais-Bohnen Mischanbau nachgewiesen ist und gilt auch für den Mischanbau von Wicken und Roggen im sogenannten Wickroggen. Hierbei Gleichzeitig steigert die Mykorrhizierung über die verbesserte Phosphorversorgung der Wirtspflanzen auch die Stickstofffixierung der Knöllchenbakterien in gemeinsamer Symbiose mit den Leguminosen (Mortimer et al. 2008). Dieses ist zum Beispiel für Bohnen und Soja nachgewiesen und führt zu erhöhten Eiweißgehalten des Erntegutes.

Mischanbau generell führt bei potenziellen Wirtspflanzen zu einer Vernetzung selbst unterschiedlicher Pflanzenarten über die gemeinsame Mykorrhizierung. Dies führt zu einem Nährstoffaustausch im Bestand und kann hiermit die Bestandesgesundheit verbessern. Diese Wirkung kommt zum Beispiel in Zwischenfruchtgemischen zur Geltung. Sie gilt auch gegenüber Unkräutern im Bestand.

Vegetationslose Zeiträume, wie etwa unter Schwarzbrache, führen dagegen zu einer Reduktion der Besiedlungsdichte der Mykorrhizapilze. Dagegen tragen Dauerkulturen, Anbau von Zwischenfrüchten und Untersaaten auch eine regulierte zeitweise Toleranz von Unkräutern zu einer Förderung der Mykorrhizapilze bei. Nicht-mykorrhizierte Fruchtarten, wie etwa Raps, führen zu keiner wesentlichen Verringerung der Mykorrhizapilzbesiedlung im Boden, da Mykorrhizapilze als Sporen mehrjährig überdauern können.

Fazit

Alle wesentlichen ertragsrelevanten und bodenökologischen Aspekte unterstreichen die Bedeutung einer vitalen Mykorrhizapilzgemeinschaft im Boden zur nachhaltigen Sicherung der Ertragssicherheit und Bodenfruchtbarkeit. Obwohld die Mykorrhizierungsrate und –wirksamkeit selbst an der gleichen Wirtspflanzenart auf dem gleichen Standort in Abhängigkeit von den jährlichen Witterungsverhältnissen variieren kann, schränkt dies nicht ihren generellen Nutzen ein. Gerade vor dem Hintergrund der Beschränkungen der Düngungsmengen, der Zunahme von Trockenstressphasen und der Bodenerosion sollte die Förderung der Mykorrhizapilze in Ackerböden über die Bewirtschaftung und in der Pflanzenzüchtung eine größere Aufmerksamkeit erlangen.

Literatur

Mortimer, P.E.; Pérez-Fernández, M.A.; Valentine A.J. (2008): The role of arbuscular mycorrhizal colonization in the carbon and nutrient economy of the tripartite symbiosis with nodulated *Phaseolus vulgaris* [J]. Soil Biol. Biochem. 40, 1019–1027.

Peine, M.; Vitow, N.; Grafe, M.; Baum, C.; Zicker, T.; Eichler-Löbermann, Schulz, S.; Schloter, M.; Leinweber, P. (2019): Effect of triple superphosphate and biowaste compost on mycorrhizal colonization and enzymatic P mobilization under maize in a long-term field experiment. *J. Plant Nutr.* Soil Sci. 182 (2), 167-174.

Rillig, M.C.; Aguilar-Trigueros, C.A.; Camenzind, T.; Cavagnaro, T.; Degrune, F.; Hohmann, P.; Lammel, D.; Mansour, I., Roy, J.; van der Heijden, M.G.A.; Yang, G.. (2019): Why farmers should manage the arbuscular mycorrhizal symbiosis – a response to Ryan and Graham (2018). New Phytol. 222, 1171-1175.

Zimmer, D., P. Kahle, C. Baum (2016): Loss of soil phosphorus by tile drains during storm events. *Agric. Water Manage*. 167: 21-28. 10.1016/j.agwat.2015.12.017.

Phosphoreffizienz in der Nutztierernährung

Dr. Vera Sommerfeld, Prof. Dr. Markus Rodehutscord,
Universität Hohenheim, Stuttgart

Einleitung

Phosphor (P) ist ein essentielles Element in der Nutztierernährung, das dem Tier in ausreichender Menge zugeführt werden muss. Pflanzliche Samen und entsprechende Futtermittel enthalten P hauptsächlich als Phytinsäure (InsP6) und deren Salz, dem Phytat (Eeckhout und de Paepe, 1994; Rodehutscord et al., 2016). Diese Form ist für Nicht-Wiederkäuer nur teilweise verfügbar, da InsP6-P erst nach schrittweiser Abspaltung vom Phytatmolekül durch Phytasen oder andere Phosphatasen genutzt werden kann. Nicht-Wiederkäuer haben im Gegensatz zu Wiederkäuern keine ausreichende Ausstattung an endogenen Phytasen im Verdauungstrakt. Aus diesem Grund werden Futterrationen für Nicht-Wiederkäuer häufig mineralische Phosphate und Phytasen zugesetzt. Die Verwendung mineralischer Phosphate ist nicht nachhaltig, da sie aus Rohphosphaten hergestellt werden, deren Lagerstätten weltweit begrenzt sind (Cordell et al., 2009). Zudem kann eine P-Versorgung, die den Bedarf der Tiere überschreitet, zu umweltbelastenden Ausscheidungen führen. Da Pflanzensamen und Nebenprodukte der Lebensmittel- und Energiesektoren Hauptbestandteile von Nutztierrationen sind und P zudem von großer ökonomischer und ökologischer Relevanz ist, ist die Verbesserung der Verfügbarkeit des Pflanzen-P für Nicht-Wiederkäuer von höchstem Interesse.

Möglichkeiten zur Reduktion von P-Einsatz und -Ausscheidung

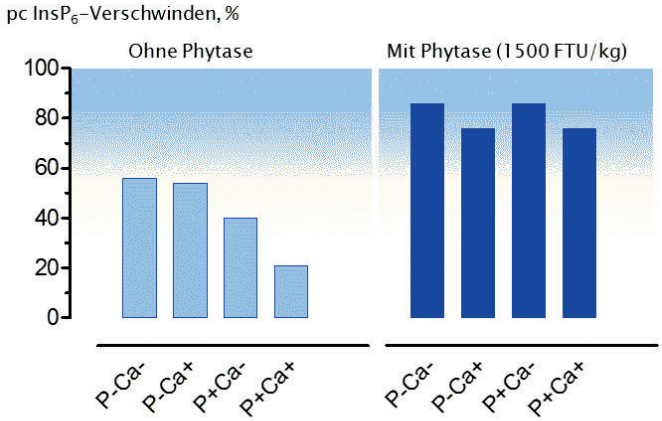
- Phasenfütterung

Die effizienteste und einfachste Möglichkeit zur Reduktion des P-Einsatzes und der P-Ausscheidungen ist die nährstoffangepasste Fütterung (Phasenfütterung). Durch die Veränderung der Körperzusammensetzung beim Wachstum der Tiere kann der P-Gehalt im Futter mit zunehmendem Alter reduziert werden. Bei einer einphasigen Fütterung wird der Bedarf mit zunehmendem Alter der Tiere in zunehmendem Maße überschritten. Bei einer mehrphasigen Fütterung wird die P-Konzentration im Futter kontinuierlich und deutlich abgesenkt, ohne

dass der Bedarf unterschritten wird. Somit wird nicht nur mineralischer P eingespart, sondern es werden auch die P-Ausscheidungen reduziert. Für die heute üblichen Leistungsniveaus und Tiergenetiken sollten allerdings neue Bedarfsuntersuchungen durchgeführt werden.

- Phytasen als Futterzusatzstoff

Ergänzend besteht eine Möglichkeit zur Erhöhung der P-Verwertung im Einsatz von Phytasen als Futterzusatzstoff. Sie bewirken eine Erhöhung der Verdaulichkeit des Phytat-P, wodurch mineralischer P eingespart und gleichzeitig die P-Ausscheidung vermindert werden kann. Ohne zugesetzte Phytase und bei einem reduzierten P- und Calcium (Ca)-Gehalt in der Ration zeigten Broiler in einer Studie von Sommerfeld et al. (2018) einen Phytatabbau in Höhe von 56%. Dieses Potential wurde durch den Zusatz von P und Ca zwar reduziert. Durch den Einsatz einer hohen Phytasedosierung (1500 FTU/kg) wurde jedoch eine deutliche Steigerung des Phytatabbaus auf nahezu 90% erreicht. Zudem waren die negativen Effekte von Ca- und P-Supplementierungen nahezu vollständig kompensiert.



Sommerfeld et al. (2018)

Abbildung 1: Auswirkung einer Supplementierung von Mononatriumphosphat (P+) und/oder Futterkalk (Ca+) zu P- und Ca-reduzierten Rationen basierend auf Mais und Sojaextraktionsschrot, jeweils ohne oder mit Zusatz einer mikrobiellen Phytase auf das praecaecale (pc) InsP6-Verschwinden in Broilern (Sommerfeld et al., 2018).

Was bedeuten solche Ergebnisse für den P-Einsatz bzw. die Höhe der P-Konzentration in der Ration? In einer Metaanalyse von Létourneau-Montminy et al. (2010) wurden mehrere Broilerstudien zum Einfluß der Ca-Konzentration und Phytaseaktiviät in der Ration auf die nötige P-Konzentration zur Maximierung der Leistung ausgewertet. Die Auswertung ergab, dass bei niedriger Ca-Versorgung eine Reduzierung des P-Gehalts um 0.3-0.4 g/kg Futter durch Einsatz von 500 FTU Phytase/kg Futter möglich ist. Es wurde auch hier deutlich gezeigt, dass für die Erzielung derselben Leistungen deutlich mehr P aufgewendet werden muss, wenn die Ca-Konzentration im Futter steigt.

Tabelle 1: Geschätzter Gehalt an Nicht-Phytat-P (g/kg Futter) bei unterschiedlichen Ca-Gehalten und Phytasezulagen, um die aufgeführten Merkmale zu maximieren, nach einer Metaanalyse von Létourneau-Montminy et al. (2010).

Ca, g/kg	6		8		10	
Phytase, FTU/kg	0	500	0	500	0	500
Futteraufnahme	4.2	3.8	4.4	4.1	4.5	4.3
tägl. Zunahme	4.0	3.7	4.2	3.9	4.4	4.2
Futtereffizienz	3.6	3.3	3.8	3.7	4.1	4.5

Der Einsatz von Phytase kann durch weitere Maßnahmen verstärkt werden. In einem Versuch mit Schweinen betrug der praecacale Phytatabbau einer Ration auf Basis von Weizen, Gerste und Soja 52%, was zu einer P-Verdaulichkeit von 44% führte (Blaabjerg et al., 2010). Wurde diese Ration hitzebehandelt, um die pflanzeneigene Phytase zu deaktivieren, und ihr dann eine mikrobielle Phytase zugesetzt, konnten Phytatabbau und P-Verdaulichkeit deutlich gesteigert werden. Durch eine zusätzliche vorangehende Fermentierung des phytasehaltigen Futters war bereits vor der Fütterung kein Phytat mehr messbar. Eine weitere Steigerung der P-Verdaulichkeit war die Folge.

Verfügbare Phytaseprodukte haben oftmals einen Engpass beim Abbau bestimmter Zwischenabbauprodukte des Phytatabbaus (Sommerfeld et al., 2018). Entsprechend wird das Potenzial zur Steigerung der P-Verdaulichkeit durch Phytasen noch nicht vollständig genutzt. Es besteht somit weiterhin Forschungsbedarf zur Steigerung der Wirksamkeit dieser Enzymgruppe.

Tabelle 2: Einfluss eines Phytasezusatzes ohne (2) und mit (3) Vorfermentierung auf den Phytat-P-Gehalt in einem Weizen/Gerste/Sojaschrot-basierten Futter ohne mineralischen P und den praecaecalen Phytatabbau und die P-Verdaulichkeit in Schweinen (Blaabjerg et al., 2010).

	(1) ohne Behandlung	(2) hitzebehandelt, Phytasezusatz	(3) Wie (2), vorfermentiert*
Phytase (U/kg TM)	762	1250	1060
Phytat-P (g/kg TM)	2,4	2,4	n.d.
pc Phytatabbau (%)	52	68	n.d.
P-Verdaulichkeit (%)	44	61	72

* Vorfermentiert: Futter:Wasser = 1:2,75, 20°C, regelmäßiges Rühren, kontinuierlicher Ersatz nach jedem Füttern

- Tierzüchtung

Es erscheint im Rahmen des Möglichen, dass eine Verbesserung der P-Verwertung auch durch die Tierzüchtung erreicht werden kann. Für Schweine wurden signifikante Unterschiede in der P-Verdaulichkeit zwischen Rassen bzw. Herkünften beschrieben (Hovenjürgen et al., 2001). In dieser Studie konnten Unterschiede in der P-Verdaulichkeit zwischen verschiedenen Schweinerassen und -kreuzungen unter standardisierten Bedingungen und bei niedriger P-Versorgung festgestellt werden. Gibt es demnach für die Absorptionsleistung von Schweinen eine genetische Grundlage und kann diese durch züchterische Maßnahmen gezielt berücksichtigt werden? Diese Frage ist bislang in Hinblick auf das Schwein unbeantwortet.

Allerdings wurden in mehreren Untersuchungen mit Geflügel Heritabilitäten für verschiedene Merkmale der P-Verwertung von bis zu 0,22 ermittelt (Aggrey et al., 2002; Beck et al., 2014; de Verdal et al., 2011). Es ist also prinzipiell möglich, auf diese Merkmale zu züchten. Noch ist allerdings ungeklärt, wie die kausalen Zusammenhänge sind. Die genetische Fundierung der P-Verwertung könnte sich z. B. in unterschiedlich hoher endogener Phytasesekretion, einer veränderten Zusammensetzung des Mikrobioms im Verdauungstrakt, oder in Unterschieden in der Expression und Kapazität von Phosphattransportern im Dünndarm und folglich in der P-Absorption und -verwertung äußern (Beck et al., 2014).

Wiederkäuer

Nach Abschluss der Pansenentwicklung kommen Wiederkäuer unter den Fütterungsbedingungen in Deutschland in aller Regel ohne eine Ergänzung von mineralischen P-Quellen zum Futter aus. Dies liegt einerseits an der hohen Verwertbarkeit des Phytat-P aufgrund der Phytasebildung der Pansenmikroorganismen. Andererseits sind die P-Gehalte in den Ölschroten, die als Proteinfuttermittel eingesetzt werden, sehr hoch. Insbesondere bei intensiver Milcherzeugung und Flächenknappheit kann es zur P-Akkumulation im Betrieb kommen, wenn nicht die Gülle als Dünger den Betrieb verlässt oder andere Proteinfuttermittel mit geringeren P-Gehalten in der Fütterung eingesetzt werden. Bei den gegenwärtigen Marktverhältnissen erhöht dies die Futterkosten. Eine Reduzierung des P-Gehaltes bei Rapsextraktionsschrot durch technologische Maßnahmen in der Ölmühle (Raß, 2017) ist ein Ansatzpunkt, der weiter verfolgt werden sollte. Zudem ist dringend zu klären, ob der Phytatgehalt der Rapssaat durch pflanzenzüchterische Maßnahmen und angepasste P-Düngung vermindert werden kann.

Zusammenfassung

Die Leitfrage „wie können bedarfsgerechte, effiziente und P-reduzierte Fütterungskonzepte weiterentwickelt und die damit verbundene Flächenbilanz reduziert werden?“ aufgreifend, kann aus Sicht der Tierernährung gesagt werden, dass solche Konzepte bereits systematisch angewendet werden, an ihrer Verbesserung und praktischen Umsetzung allerdings auch weiter gearbeitet wird. Durch bedarfsangepasste Phasenfütterung, den Einsatz und die Weiterentwicklung von Phytasen und Futtermitteltechnologien stehen Mittel zur Verfügung, mit denen der Einsatz von mineralischem P und die P-Ausscheidung reduziert werden können. Als langfristige Möglichkeit ist einerseits die Tierzüchtung anzusehen, mit dem Ziel die Effizienz der P-Verwertung auf Tierebene zu erhöhen. Weitere, im Vortrag nicht angesprochene Maßnahmen sind in der Pflanzenzüchtung und -düngung sowie in der Verfahrenstechnik zu suchen. Eine Reduktion des Phytatgehalts oder eine Erhöhung der Phytaseaktivität in Futterpflanzen können ebenfalls zu einer P-reduzierten und -effizienten Fütterung beitragen.

Literatur

Aggrey, S.E., W. Zhang, R.I. Bakalli, G.M. Pesti, und H.M. Edwards. 2002. Genetics of phytate phosphorus bio-availability in poultry. In: 7th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production, INRA, Montpellier, France. 277-279.

Beck, P., M. Rodehutscord, J. Bennewitz, und W. Bessei. 2014. A pilot study of the genetic variation of phosphorus utilization in young Japanese quail (Coturnix japonica). Poult. Sci. 93:1916-1921.

Blaabjerg, K., H. Jørgensen, A.-H. Tauson, und H.D. Poulsen. 2010. Heat-treatment, phytase and fermented liquid feeding affect the presence of inositol phosphates in ileal digesta and phosphorus digestibility in pigs fed a wheat and barley diet. Animal 4:876-885.

Cordell, D., J.-O. Drangert, und S. White. 2009. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. Glob. Environ. Change 19:292-305.

de Verdal, H., A. Narcy, D. Bastianelli, H. Chapuis, N. Meme, S. Urvoix, E. Le Bihan-Duval, und S. Mignon-Grasteau. 2011. Improving the efficiency of feed utilization in poultry by selection. 2. Genetic parameters of excretion traits and correlations with anatomy of the gastro-intestinal tract and digestive efficiency. BMC Genet. 12:71.

Eeckhout, W., und M. de Paepe. 1994. Total phosphorus, phytate phosphorus and phytase activity in plant feedstuffs. Anim. Feed Sci. Technol. 47:19-29.

Hovenjürgen, M., M. Rodehutscord, E. Pfeffer, E. Tholen, und W. Trappmann. 2002. Verbesserung der Phosphorverwertung beim Schwein: Ansätze in Zucht und Fütterung. Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn, Schriftenreihe des Lehr- und Forschungsschwerpunktes USL

Létourneau-Montminy, M.P., A. Narcy, P. Lescoat, J.F. Bernier, M. Magnin, C. Pomar, Y. Nys, D. Sauvant, und C. Jondreville. 2010. Meta-analysis of phosphorus utilisation by broilers receiving corn-soyabean meal diets: influence of dietary calcium and microbial phytase. Animal 4:1844-53.

Rass, M. 2017. Maßnahmen zur Steigerung des Proteingehalts von Rapsfuttermitteln. HP-Raps – Möglichkeit oder Utopie? In: Phosphor – Bedarf decken, Überschuss vermeiden. 55. Jahrestagung der Bayerischen Arbeitsgemeinschaft Tierernährung e.V., Freising

Rodehutscord, M., C. Rückert, H.P. Maurer, H. Schenkel, W. Schipprack, K.E. Bach Knudsen, M. Schollenberger, M. Laux, M. Eklund, W. Siegert, und R. Mosenthin. 2016. Variation in chemical composition and physical characteristics of cereal grains from different genotypes. Arch. Anim. Nutr. 70:87-107.

Sommerfeld, V., M. Schollenberger, I. Kühn, und M. Rodehutscord. 2018. Interactive effects of phosphorus, calcium, and phytase supplements on products of phytate degradation in the digestive tract of broiler chickens. Poult. Sci. 97:1177-1188.

Recycling von Phosphor zur P-Versorgung von Pflanzen: Potentiale und Voraussetzungen

Prof. Dr. Franz Wiesler, Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt Speyer

Einleitung

Aufgrund der großen wirtschaftlichen Bedeutung (Düngemittelproduktion), zunehmender Qualitätsprobleme (Kontamination mit Cadmium und Uran) und eines erhöhten Versorgungsrisikos (Begrenzung der Lagerstätten auf wenige Regionen) hat die Europäische Kommission (2013, 2017) Phosphatgestein bzw. Phosphorit als kritischen Rohstoff eingestuft und zu nachhaltiger Verwendung von Phosphor aufgefordert. Dieser Forderung trägt auch das Deutsche Ressourceneffizienzprogramm ProgRess Rechnung (BMUB, 2016), wobei sich dieses im Wesentlichen auf den Aspekt des Phosphorrecyclings aus Abwasser und Klärschlamm beschränkt. Im vorliegenden Beitrag werden (i) der potentielle Beitrag von organischen Reststoffen und organischen Düngern zur Deckung des Bedarfs an Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) in der deutschen Pflanzenproduktion, (ii) Möglichkeiten zur Optimierung der Nutzung von P in Reststoffen zu Düngungszwecken sowie (iii) Verfahren zur Herstellung von P-Rezyklaten aus Klärschlamm und deren Bewertung aus düngemittelrechtlicher und agronomischer Sicht umrissen. Die Ausführungen basieren auf den Standpunkten „Anwendung von organischen Düngern und organischen Reststoffen in der Landwirtschaft“ (2015) sowie „Recyclingphosphate in der Düngung – Nutzen und Grenzen“ (in Druck) des Wissenschaftlichen Beirats für Düngungsfragen beim Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (WBD)*.

* Der Wissenschaftliche Beirat für Düngungsfragen berät das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft durch gutachterliche Stellungnahmen zu allen Fragen der Düngung. Seine derzeitigen Mitglieder sind Prof. Dr. Franz Wiesler (Vorsitzender), Dr. Kerstin Hund-Rinke (stellv. Vorsitzende), Prof. Dr. Eckard George, Prof. Dr. Jörg Michael Greef, Prof. Dr. Ludwig Hölzle, Prof. Dr. Falko Holz, Prof. Dr. Kurt-Jürgen Hülsbergen, Dr. Sabine Martin, Dr. Karl Severin, Prof Dr. Sandra Spielvogel sowie Dr. Hella Kehlenbeck und Prof. Dr. Hans Schenkel (ständige Gäste). An den o.g. Standpunkten wirkten als externe Experten Dr. Christian Adam, Prof. Dr. Klaus Dittert, Prof. Dr. Thomas Ebertseder, Prof. Dr. Heiner Goldbach, Dr. Kurt Möller, Bernhard Osterburg, Dr. Werner Philipp, Dr. Magdalene Pietsch, Dr. Sylvia Kratz, Prof. Dr. Johannes Pinnekamp sowie Dr. Sebastian Wulf mit. Geschäftsführer des Wissenschaftlichen Beirats ist Dr. Thomas Nessel.

Potentieller Beitrag von organischen Reststoffen zur Deckung des Mineralstoffbedarfs der Pflanzenproduktion

In seinem Standpunkt „Anwendung von organischen Düngern und organischen Reststoffen in der Landwirtschaft“ hat der WBD den Anfall von N, P und K mit organischen Düngern und organischen Reststoffen abgeschätzt und dem Bedarf der Pflanzenproduktion in Deutschland an diesen Mineralstoffen gegenübergestellt (Wissenschaftlicher Beirat für Düngungsfragen, 2015). Bei der Berechnung des Nährstoffbedarfs wurde auf Grundlage der Anbaustatistiken unterstellt, dass sich mittelfristig ein Düngebedarf entsprechend der Nährstoffaufnahme (Ernte- und Koppelprodukte) der verschiedenen Kulturen ergeben wird. Dem wurde der Nährstoffanfall mit Wirtschaftsdüngern auf der Basis des Vieh- und Geflügelbestandes, Gärresten aus Biogasanlagen, Kompost, Klärschlamm, tierischen Nebenprodukten (Fleischknochenmehl, Fleischmehl, Blutmehl) sowie pflanzlicher Biomasse zur Stroh- und Gründüngung (Ernterückstände bzw. Koppelprodukte: Getreidestroh und Rübenblatt; Gründüngung) gegenübergestellt. Für die pflanzlichen Nebenprodukte (z.B. Vinasse, Kartoffelfruchtwasser, Schlempe) lagen keine verlässlichen Daten vor.

Tabelle 1 zeigt, dass unter Berücksichtigung aller Stoffgruppen rechnerisch ca. 91 % des N-Bedarfs, 71 % des P-Bedarfs und 76 % des K-Bedarfs der deutschen Pflanzenproduktion in den anfallenden organischen Düngern und organischen Reststoffen enthalten sind, wobei allerdings die Nährstoffverfügbarkeit nicht berücksichtigt ist. Die mit Abstand wichtigsten Nährstoffträger sind die wirtschaftseigenen Dünger, die Gärreste aus Biogasanlagen sowie die Ernterückstände. Eine vergleichsweise eher geringe Rolle für den Nährstoffersatz spielen dagegen Kompost, Klärschlamm, die tierischen Nebenprodukte und vermutlich auch die pflanzlichen Nebenprodukte. In Bezug auf Klärschlamm ist festzustellen, dass die 2015 landwirtschaftlich verwertete Klärschlammmenge ca. 3 % des potentiellen P-Bedarfs der deutschen Pflanzenproduktion abdeckte. Die Nutzung des gesamten in Klärschlamm aus der öffentlichen Abwasserbehandlung enthaltenen Phosphors für Düngungszwecke hätte zur Deckung des P-Bedarfs der deutschen Pflanzenproduktion von ca. 10 % beitragen.

Tab. 1: Der Bedarf an Phosphor (P), Stickstoff (N) und Kalium (K) in der deutschen Pflanzenproduktion sowie der Anfall dieser Stoffe mit organischen Düngern sowie humusmehrenden Früchten bzw. Zwischenfrüchten zur Gründüngung (Wissenschaftlicher Beirat für Düngungsfragen, 2015; Statistisches Bundesamt, 2015).

	N (1000 t)	P (1000 t)	K (1000 t)
● Bedarf	2833	533	2888
● Anfall			
- Wirtschaftsdünger	1270	202	976
- Gärreste (mit Gülle)	518	73	389
- Kompost	24	6	18
- Klärschlämme	22	16	1
- Tierische Nebenprodukte	153	9	1
- Pflanzliche Nebenprodukte	k.A.	k.A.	k.A.
- Erntereste	374	74	812
- Humusmehrende Früchte	191	-	-
- Zwischenfrüchte zur Gründüngung	24	-	-
● Summe Anfall	2576	380	2197
● Anfall – Bedarf	-257	-153	-691
● Nährstofflieferung durch Mineraldünger	1823	131	381
Saldo	**+1566**	**-22**	**-310**

Bezieht man die Nährstofflieferung an die Landwirtschaft mit Mineraldüngern in die Betrachtung mit ein, so ergeben sich ein deutlicher Überhang bei Stickstoff, jedoch negative Salden bei Phosphor und Kalium. Bezogen auf die gesamte landwirtschaftliche Nutzfläche in Deutschland lässt sich ein Überschuss von ca. 94 kg N pro Hektar sowie ein Defizit von ca. 1 kg P und ca. 19 kg K pro Hektar berechnen.

Auch wenn der Nährstoffanfall mit organischen Düngern und organischen Reststoffen bei nationaler Betrachtung nur relativ geringe Lücken zum Nährstoffbedarf aufweist, ergeben sich bei regionaler Betrachtung sehr große Unterschiede. So bestehen bei dem Nährstoff Phosphor großräumig sehr ausgeprägte P-Überschusssituationen, insbesondere in den tierintensiven Regionen im Nordwesten Niedersachsens und im Nordwesten Nordrhein-Westfalens (s. z.B. Landwirtschaftskammer Niedersachsen, 2019; Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, 2018). Andere Regionen mit hohen P-Überschüssen in Ost- und Süddeutschland sind relativ kleinräumig. Regionen mit moderaten Phosphatüberschüssen aus tierischen Ausscheidungen finden sich verteilt in ganz Deutschland. Diesen Überschussgebieten stehen viele Regionen in Deutsch-

land gegenüber, in denen der Phosphatanfall mit tierischen Ausscheidungen geringer als die P-Abfuhr mit den pflanzlichen Produkten ist. Dies hat in einigen Ackerbauregionen aufgrund vernachlässigter mineralischer P-Düngung zu einer allmählichen Verschlechterung des P-Versorgungszustandes der Böden geführt (Zorn und Schröter, 2014).

Möglichkeiten zur Optimierung der Nutzung von Phosphor in Reststoffen zu Düngungszwecken

Tabelle 2 gibt eine Übersicht über Möglichkeiten zur Optimierung der Nutzung von Phosphor in Reststoffen. Wirtschaftseigene Dünger, insbesondere Gülle, weisen eine gute P-Wirksamkeit auf (s. auch Tabelle 5). Hohe Überschüsse in den tierintensiven Regionen stehen einer nachhaltigen P-Nutzung jedoch entgegen und verursachen erhebliche Umweltprobleme. Dem sollte mittel- bis langfristig durch eine bessere räumliche Verteilung (d.h. flächengebundene) Tierhaltung entgegengewirkt werden. Kurzfristig sind zur Entlastung der Nährstoffhaushalte die Verbringung wirtschaftseigener Dünger bzw. von Gärrückständen in Betriebe bzw. Regionen mit P-Bedarf unerlässlich. Der überbetriebliche Einsatz der wirtschaftseigenen Dünger wird allerdings durch hohe Transportkosten, schwer steuerbare N-Wirkung (Gutser et al., 2005) sowie stoffliche (Zn, Cu, Arzneimittelrückständen) und seuchenhygienische Risiken begrenzt (Wiesler, 2016). Dem kann durch die Aufbereitung der Wirtschaftsdünger zu einem gewissen Grad entgegengewirkt werden. So stehen zur Separierung von Gülle und Gärresten und damit zur Verbesserung der Transportfähigkeit einfache und kostengünstige (Eindickung durch natürliche Phasentrennung) sowie technisch anspruchsvollere Verfahren (Pressschneckenseparator, Dekanterzentrifuge) zur Verfügung. Die Festphase kann zur Herstellung eines lager- und transportfähigen Produkts zusätzlich getrocknet werden. An weiteren Aufbereitungsschritten der Festphase wie Pyrolyse und Verbrennung wird derzeit gearbeitet. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass diese immer mit einem Nährstoffverlust (z.B. N, S) verbunden sind. Die mit NH_4^+ und K^+ angereicherte Flüssigphase kann durch verschiedene Techniken (Vakuumeindampfung, Membrantechnik, Strippung) zu einem nährstoffreichen Konzentrat bzw. definierten Düngerlösungen weiterverarbeitet werden.

Tab. 2: Möglichkeiten zur Optimierung der Nutzung von Phosphor in Reststoffen

Wirtschaftseigene Dünger und Gärrückstände
● Bessere räumliche Verteilung der Tierhaltung (flächengebundene Tierhaltung)
● Verbringung wirtschaftseigener Dünger/Gärrückständen in Betriebe/Regionen mit Bedarf
● Aufbereitung von Wirtschaftsdüngern/Gärrückständen und Verbringung der Rezyklate
Klärschlamm
● Bodenbezogene Klärschlammverwertung anstatt Mitverbrennung von KS
● Phosphorrückgewinnung aus Rohschlamm oder Faulschlamm
● Phosphorrückgewinnung aus Schlammwasser
● Monoverbrennung mit Phosphorrückgewinnung aus der Klärschlammasche
Tierische Nebenprodukte
● Monoverbrennung mit anschließendem Aufschluss der Asche von K1-Material
● Säureaufschluss bzw. Verbrennung mit anschließendem Aufschluss von K2- und K3-Marterial mit hohem Knochenanteil

Klärschlamm weist eine variable P-Wirkung auf, die stark vom Verfahren der P-Eliminierung abhängt. Insbesondere die Phosphatfällung mit Fe-Salzen mit weitem Fe:P-Verhältnis führt zu einer unbefriedigenden P-Düngewirkung (El-Samie, 2003). Vorwiegend aufgrund stofflicher (Schwermetalle, organische Schadstoffe) und seuchenhygienischer (Salmonellen) Risiken sowie Änderungen im Düngerecht wird die bodenbezogene Klärschlammverwertung in Zukunft stark eingeschränkt. So setzt die Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung vom 27. September 2017 klare Regelungen (s. Tab 3). Ab dem Jahr 2029 wird eine bodenbezogene Klärschlammverwertung nur noch bei Anlagenklassen < 100.000 Einwohnerwerten, ab dem Jahr 2032 bei Anlagenklassen < 50.000 Einwohnerwerten möglich sein. Bei größeren Anlagen und einem P-Gehalt im Klärschlamm von > 20 g / kg TM ist die Rückgewinnung von Phosphor vorgeschrieben, wobei die in Tabelle 3 aufgezeigten Optionen offenstehen. Lediglich bei Klärschlämmen mit P-Gehalt < 20 g / kg TM kann eine thermische Verwertung ohne P-Rückgewinnung durchgeführt werden.

Tab. 3: Regelungen in Bezug auf Phosphor in der Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung vom 27. September 2017

Anlagenklasse < 100.000 Einwohnerwerten (ab 2029) bzw. < 50.000 Einwohnerwerten (ab 2032)
→ Bodenbezogene Klärschlammverwertung bei Einhaltung der Schadstoffgrenzwerte weiterhin möglich
Anlagenklasse > 100.000 Einwohnerwerten (ab 2029) bzw. > 50.000 Einwohnerwerten (ab 2032)
● P-Gehalt im Klärschlamm **< 20 g / kg TM**
→ Thermische Verwertung des Klärschlamms
● P-Gehalt im Klärschlamm **> 20 g / kg TM**
→ Rückgewinnung von mindestens 50 % des Phosphors aus dem Klärschlamm oder Senkung des P-Gehalts im Klärschlamm durch P-Rückgewinnung auf **< 20 g P / kg TM**
oder
→ Thermische Behandlung des Klärschlamms mit Rückgewinnung von **mindestens 80 %** des Phosphors aus der Klärschlammasche

Verfahren zur Herstellung von P-Rezyklaten aus Klärschlamm und deren Bewertung aus düngemittelrechtlicher und agronomischer Sicht

Im Klärwerk kann eine Phosphorrückgewinnung aus Rohschlamm, Faulschlamm oder Schlammwasser erfolgen, entwässerter Faulschlamm kann einer Monoverbrennung zugeführt werden. Beispiele für wichtige Verfahren der Phosphorrückgewinnung und die dabei entstehenden Produkte sind in Tabelle 4 aufgeführt (s. Pinnekamp et al., 2013; Bogner und Ortwein, 2018).

Tab. 4: Beispiele für Verfahren der Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm

Verfahren	Produkt
Rohschlamm	
● Schmelzvergasung von KS-Briketts („Mephrec“)	„Thomasphosphat“
● Karbonisierung („Pyreg“)	P-haltiges Karbonisat
● Mehrstufige thermochemische Behandlung mit Alkali- und Erdalkali-Zusätzen („EuPhoRe“)	P-haltige Asche
Faulschlamm	
● Fällung, z.T. mit nasschemischem Aufschluss („Berliner Verfahren“, „Stuttgarter Verfahren“	MgAP (Struvit), CaP, MgP
Schlammwasser	
● Fällung / Kristallisation („P-Roc“)	MgAP (Struvit), CaP, MgP
Asche nach KS-Monoverbrennung	
● Nasschemischer Aufschluss (Säure, Lauge)	CaP, MgP, H_3PO_4
● Thermochemischer Aufschluss ($NaHCO_3$, Na_2CO_3)	„Rhenaniaphosphat“ ($CaNaPO_4$)

Voraussetzungen für den Einsatz von P-Recyclingprodukten zu Düngungszwecken in der Landwirtschaft sind (i) das Vorliegen einer düngemittelrechtlichen Zulassung für diese Produkte, (ii) die Einhaltung düngemittelrechtlicher Vorschriften in Bezug auf Ausgangsstoffe, Nährstoffgehalte, Nährstofflöslichkeiten und Schadstoffgehalte sowie (iii) der Nachweis einer Düngewirkung. Neben einer häufig noch fehlenden düngemittelrechtlichen Zulassung stellen die ab dem 1. Juni 2020 geltenden Mindestanforderungen an die P-Löslichkeit (2,5 % wasserlösliches Phosphat) eine hohe Hürde für Recyclingphosphate dar. So kann in Anlehnung an verschiedene Studien (Kratz et al., 2010; Kratz et al., 2014; Römer, 2013; Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2015) festgestellt werden, dass die Wasserlöslichkeit von P aus Recyclingprodukten in der Regel sehr niedrig ist und die Voraussetzungen der Düngemittelverordnung nicht erfüllt.

Aus praktischer Sicht ausschlaggebend für einen Einsatz der Recyclingphosphate in der Landwirtschaft ist ihre agronomische Wirksamkeit. Hierzu wird häufig in Gefäßversuchen der Ertrag oder die P-Aufnahme von Pflanzen im Vergleich zu einem Referenzdünger ermittelt (z.B. Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2015, Römer und Steingrobe, 2018, Möller et al., 2018). Beispielhaft sind in Tabelle 5 die Ergebnisse einer umfangreichen Literaturstudie von Kratz et al. (2019) zusammengefasst, in der nicht aufgebarbeitete organische Dünger und Klärschlamm sowie verschiedene Recyclingprodukte im Hinblick auf die Variationsweite und den Median der relativen Netto-P-Aufnahme von Pflanzen dar-

gestellt sind. Dabei zeigt sich, dass die relative Netto-P-Aufnahme innerhalb der verschiedenen Gruppen der Recyclingdünger extrem stark variiert. Dies kann auf unterschiedliche Versuchsbedingungen zurückgeführt werden (z.B. im Hinblick auf das Versuchssubstrat, die Versuchsgefäße, die Versuchspflanzen, die Versuchsdauer sowie das Vegetationsstadium bei der Ernte der Pflanzen) sowie auf Unterschiede innerhalb bestimmter Recyclingdüngertypen (z.B. im Hinblick Herstellungsbedingungen, Kristallisationsgrad, physikalische Struktur sowie mögliche Nebenbestandteile).

Tab. 5: Relative Netto-P-Aufnahme von Pflanzen in Gefäßversuchen nach Düngung mit unterschiedlichen organischen Düngern bzw. P-Rezyklaten aus der Abwasserreinigung (nach Kratz et al., 2019).

Verfahren / Produkt	Versuche (n)	Min - Max (%)	Median (%)
● Stalldung / Gülle	15	22 - 111	77
● Gärrückstände (flüssig)	8	50 - 81	75
● Gärrückstände (fest)	6	44 - 68	54
● Klärschlamm (biol.)	6	24 - 103	76
● Klärschlamm (Fe, Al)	25	0 - 70	30
● Unbehandelte KS-Asche	19	0 - 52	27
● TC-behandelte KS-Asche ($CaCl_2$)	7	0 - 24	12
● TC-behandelte KS-Asche ($MgCl_2$)	14	0 - 116	31
● TC-behandelte KS-Asche ($MgCl_2$ + Säure)	16	63 - 206	97
● TC-behandelte KS-Asche (Na_2CO_3 / Na_2SO_4)	10	63 - 133	102
● Schmelzvergasung KS (Mephrec-Verfahren)	8	0 - 117	22
● Pyrolyse von KS mit Fe- oder Al- P-Fällung	17	2 - 96	30
● Magnesium-Fällung (Struvit)	40	29 - 210	95
● Calcium-Silikat-Hydrat-Fällung (CaP, MgAP)	14	24 - 125	70

Insgesamt bestätigt sich, dass wirtschaftseigene Düngemittel, flüssige Gärrückstände und Klärschlamm nach biologischer P-Eliminierung eine relativ gute, Klärschlamm nach Phosphatfällung mit Fe- und Al-Salzen eine unbefriedigenden P-Wirksamkeit aufweisen. Eine Bewertung der Recyclingprodukte zeigt eine ebenfalls schlechte P-Wirksamkeit unbehandelter Klärschlammaschen. Ähnliches gilt für Produkte der Schmelzvergasung und für Klärschlammkarbonisate. Verschiedene Produkte, in denen Klärschlammaschen zur Verbesserung der P-Verfügbarkeit und zur Schwermetallabscheidung mit Zuschlagstoffen verse-

hen und thermisch weiterbehandelt werden, weisen eine große Variation der P-Wirksamkeit auf. Vielversprechend sind thermochemische Verfahren mit $MgCl_2$-Zusatz und Säureaufschluss bzw. thermochemische Verfahren mit Zusatz von Alkaliverbindungen wie Natriumsulfat oder Natriumcarbonat. Die P-Wirksamkeit von in verschiedenen Stoffströmen (Schlammwasser, Faulschlamm) gewonnenem Struvit (sowie von Mischungen aus MgAP, CaP, MgP) ist häufig ähnlich gut wie von wasserlöslichen P-Düngern. Ein Nachteil ist die geringe P-Rückgewinnungsrate der meisten Verfahren. Nicht zuletzt können aus der Monoverbrennung gewonnene Klärschlammaschen von der Düngemittelindustrie als Zugschlagstoff zu fossilen Phosphaten zu wirksamen P-Düngern aufgeschlossen werden.

Fazit

Mit organischen Düngern und organischen Reststoffen sowie daraus hergestellten Recyclingprodukten können rechnerisch ca. 70 % des P-Bedarfs der deutschen Pflanzenproduktion gedeckt werden. Im Hinblick auf deren P-Wirksamkeit weisen die verschiedenen Recyclingprodukte jedoch eine sehr hohe Variabilität auf. Das macht die Prüfung dieser Produkte unter standardisierten Gefäßversuchs- und möglichst auch unter Feldbedingungen erforderlich, um zu vermeiden, dass aus technischer Sicht geeignete Verfahren der P-Rückgewinnung entwickelt werden, die aber zu keinen wirksamen Düngemitteln für die Landwirtschaft führen. Die düngemittelrechtlichen Vorschriften im Hinblick auf die P-Löslichkeit der Recyclingphosphate sollten in Zusammenhang mit der P-Wirksamkeit in Gefäßversuchen gestellt und ggf. überarbeitet werden.

Literatur

Bayerisches Landesamt für Umwelt (2015): Rückholbarkeit von Phosphor aus kommunalen Klärschlämmen. Abschlussbericht, 112 Seiten.

Bogner, R. und Ortwein, B. (2018): Phosphorrückgewinnung – Geeignete Verfahren hinsichtlich der neuen Anforderungen, in Holm, O., Thomé-Kozmiensky, E., Quicker, P., Kopp-Assenmacher, S. (Hrsg.): Verwertung von Klärschlamm, ISBN 978-3-944310-43-5, Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, pp. 419 – 426.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherhit (2016): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II, 143 Seiten. https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pools/Broschueren/progress_ii_broschuere_bf.pdf

El-Samie, I.M.F.A. (2003): Phosphordüngewirkung von Klärschlämmen aus Klärwerken mit Phosphateliminierung durch Eisensalze. Dissertation, Universität Göttingen.

Europäische Kommission (2013): Konsultative Mitteilung zur nachhaltigen Verwendung von Phosphor. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52013DC0517&from=DE

Europäische Kommission (2017): Mitteilung über die Liste kritischer Rohstoffe für die EU 2017https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2017/DE/COM-2017-490-F1-DE-MAIN-PART-1.PDF

Gutser, R., Ebertseder, Th., Weber, A., Schraml, M. und Schmidhalter, U. (2005): Short-term and residual availability of nitrogen after long-term application of organic fertilizers on arable land. J. Plant Nutrition Soil Sci. 168, 439-446.

Kratz, S., Haneklaus, S. und Schnug, E. (2010): Chemical solubility and agricultural performance of P-containing recycling fertilizers. Landbauforschung – vTI Agriculture and Forestry Research 4 (60), 227 – 240.

Kratz, S., Scbhick, J., Raghad Shwiekh und Schnug, E. (2014): Abschätzung des Potentials erneuerbarer P-haltiger Rohstoffe in Deutschland zur Substitution rohphosphathaltiger Düngemittel. Journal für Kulturpflanzen 66, 261 – 275.

Kratz, S., Vogel, C und Adam, C. (2019): Agronomic performance of P recycling fertilizers and methods to predict it: a review. Nutr. Cycl. Agroecosyst. 1154, 1 – 39. https://doi.org/10.1007/s10705-019-10010-7.

Landwirtschaftskammer Niedersachsen (2019): Nährstoffbericht für Niedersachsen 2017/2018. Herausgeber: Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Oldenburg.

Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (2018): Nährstoffbericht 2017über Wirtschaftsdünger und andere organische Düngemittel für Nordrhein-Westfalen. Herausgeber: Der Direktor der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen als Landesbeauftragter, Münster.

Möller, K., Oberson, A., Bünemann,E.K., Cooper, J., Friedel, Glaesner, N., Hörtenhuber, S., Loes, A-K., Mäder, P., Meyer, G., Müller, T., Symanczik, S., Weissengruber, L., Wollmann,I., Magid, J. (2018): Improved phosphorus recycling in organic farming: Navigating between constraints. Adv Agronomy 147, 159 – 237.

Pinnekamp, J., Baumann, P., Cornel, P., Everding, W., Göttlicher-Schmidle, U., Heinzmann, B., Jardin, N., London, J. Meyer, C., Mocker, M., Montag, D., Müller-Schaper, J., Petzet, S. und Schaum, C. (2013): Stand und Perspektiven der Phosphorrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm. In: Korrespondenz Abwasser Abfall 10/13 Seite 837-844 sowie 11/13 Seite 976-981. Hrsg.: GFA, Hennef, ISSN 1866-0029.

Römer, W. (2013): Phosphordüngewirkung neuer Phosphorrecyclingprodukte. Berichte über Landwirtschaft 91,1-24.

Römer, W. und Steingrobe, B. (2018): Fertilizer effect of phosphorus recycling products. Sustainability 10, doi:103390/su10041166.

Wiesler, F. (2016): Anforderungen an die Verwertung von Reststoffen in der Pflanzenproduktion. VDLUFA-Schriftenreihe 73, 10-26. https://www.vdlufa.de/Dokumente/Veroeffentlichungen/Schriftenreihe/SR073_2016_Kongressband.pdf.

Wissenschaftlicher Beirat für Düngungsfragen (2015): Anwendung von organischen Düngern und organischen Reststoffen in der Landwirtschaft. https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Ministerium/Beiraete/Duengungsfragen/OrgDuengung.html

Zorn, W. und Schröter, H. (2014): Auswertung aktueller Versuche zur P-Düngung auf dem Ackerland nach der Bilanzmethode. VDLUFA-Schriftenreihe 70, Kongressband 2014, S. 261 – 268, VDLUFA-Verlag, Darmstadt.

Düngewirkung von Phosphat auf Basis einer Meta-studie über langjährige P-Düngungsversuche

Dr. Uwe Buczko, Universität Rostock

Einleitung

In natürlichen Bodensystemen wird die Verfügbarkeit von Phosphor für die Pflanze zum größten Teil durch die komplexe Dynamik des Bodenphosphors bestimmt. Isotopenstudien seit den 1950er Jahren haben gezeigt, dass nur etwa 5 bis 25 % des von der Pflanze aufgenommenen Phosphors aus der aktuellen Düngergabe stammen (Syers et al. 2008), der Rest jedoch aus dem im Boden in unterschiedlichen Pools vorliegenden Phosphor. Daher spielt der P-Versorgungszustand des Bodens für die empfohlenen P Düngemengen eine zentrale Rolle, und in Deutschland und den meisten anderen europäischen Ländern wird das Prinzip der Erhaltungsdüngung praktiziert, basierend auf den pflanzenverfügbaren P Gehalten im Oberboden, die in fünf Gehaltsstufen eingeteilt werden (Jordan-Meille et al. 2012). Die Kalibrierung der Gehaltsstufen ist bei diesem Ansatz von zentraler Bedeutung und wird anhand von Feldversuchen vorgenommen, bei denen die Beziehung zwischen dem pflanzenverfügbaren P-Gehalt und dem Ertrag ausgewertet wird. Dies ist in Abb. 1 beispielhaft für einen niedersächsischen Standort dargestellt. Man sieht, dass die Beziehung mit großen Unsicherheiten behaftet ist. Ausserdem werden boden- und standortspezifische Faktoren in diesem Ansatz nur unzureichend berücksichtigt. In den letzten Jahren mehren sich die Hinweise, dass die existierenden P-Gehaltsklassen und damit die empfohlenen P-Düngemengen zu hoch sind. Dies hat in den letzten Jahrzehnten dazu geführt, dass sich große Mengen P in den Oberböden akkumuliert haben, in Deutschland im Mittel etwa 900 kg P / ha (Frede & Bach 2010). Diese akkumulierten Phosphormengen sind zwar zum größten Teil im Boden festgelegt, dennoch besteht die Gefahr erhöhter diffuser P Austräge. Um die existierenden Düngeempfehlungen für Phosphor neu zu bewerten und zu präzisieren, wurde im Rahmen des in der BMBF Initiative „BonaRes“ geförderten Projekts „InnoSoilPhos“ (Innovative Lösungen für ein nachhaltiges Boden-P-Management) eine Datenbank zu Langzeit-Phosphat-Düngeversuchen zusammengestellt, die in einer Meta-Analyse in Bezug zur Ertragssteigerung durch P-Düngung ausgewertet wurde. Einige der wichtigsten Ergebnisse werden in vorliegendem Beitrag vorgestellt.

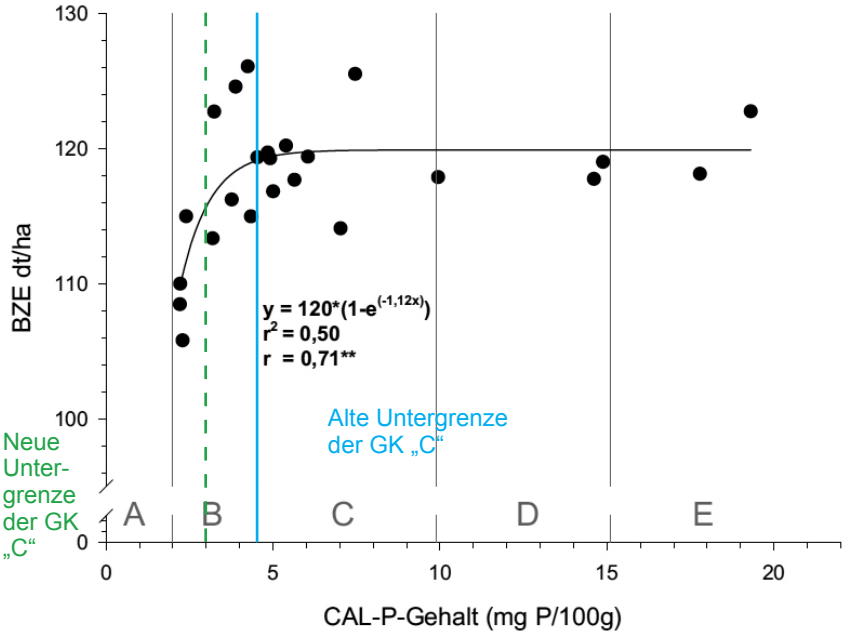


Abb. 1: Beispiel für Kalibrierung der Phosphor-Gehaltsklassen anhand von Feldversuchsdaten. Abhängigkeit des BZE im Jahre 2000 vom CAL-P-Gehalt des Bodens im Herbst 1999 (verändert nach Römer 2009).

Material und Methoden

Für den Aufbau der Datenbank wurden langjährige Feldversuche in Deutschland und Österreich zusammengestellt, bei denen die Düngewirkung von Mineraldünger-Phosphat auf die Erträge im Vergleich zu einer nicht mit Phosphat gedüngten Variante untersucht wurde (Buczko et al. 2018). Diese Datenbank enthält mehr als 4000 Datensätze von 30 Standorten in Deutschland und Österreich (Abb. 2) und wurde in einer Meta-Analyse im Hinblick auf die Ertragssteigerung durch Phosphatdüngung ausgewertet. Die Versuche umfassen sehr unterschiedliche Standorte mit Tongehalten zwischen 5,5 und 35%, sauren bis basischen Böden, und insbesondere großen Unterschieden in den pflanzenverfügbaren P-Gehalten (Tab. 1). Es wurde untersucht: (1) die Düngewirkung von Phosphatdünger, und (2) wie sich unterlassene Phosphatdüngung auf den relativen Ertrag (in %) als Verhältnis zwischen den gedüngten und ungedüngten Varianten auswirkt.

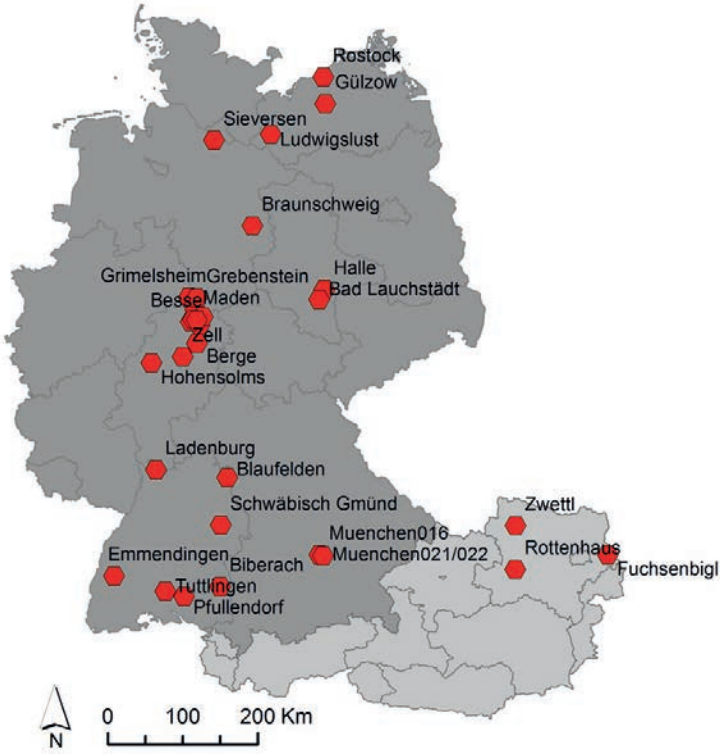


Abb. 2: Lage der Versuchsstandorte die in die Datenbank aufgenommen wurden.

Tab. 1: Überblick über wichtige Parameter der genutzten Feldversuche

Parameter	Min.	Median	Arith. Mittel	Max.	NA
Ton [%]	5,5	18,0	18,0	35,0	-
Schluff [%]	15,0	62,9	55,6	84,6	298
Corg [%]	0,7	1,2	1,3	2,1	187
Humus [%]	1,2	2,0	2,1	3,6	187
pH	4,4	6,3	6,3	7,8	-
P-Düngemenge [kg P/ha]	9,8	43,0	60,7	209,8	-
P-Düngemenge/P-Entzug [%]	29,5	157,8	261,3	2017,0	3
P-Boden (P-DL, P-CAL) [mg P/100g]	1,3	8,3	10,0	53,2	-

Ergebnisse und Diskussion

Die relativen Mehrerträge sind in Abb. 3 für alle Datenpunkte gegen den pflanzenverfügbaren Boden-P-Gehalt aufgetragen. Auffällig ist die sehr große Variabilität der Mehrerträge, bes. bei geringen P-Gehalten. Fasst man die relativen Mehrerträge gemäß den P-Gehaltsklassen nach VDLUFA (1997) (Kerschberger et al. 1997) zusammen (Abb. 4), wird deutlich, dass im Mittel Mehrerträge in allen Gehaltsklassen zu beobachten sind, jedoch signifikant am höchsten in der Gehaltsklasse B. Allerdings liegen kaum Datenpunkte in Gehaltsklasse A. Auffallend ist die für alle P-Gehaltsklassen zu beobachtende hohe Anzahl an Datensätzen mit Mindererträgen (etwa 30 %). Dies wird in langjährigen Feldversuchen häufig beobachtet (vgl. Römer 2009, Kuchenbuch und Buczko, 2011), und wird vermutlich durch die Verminderung der Mykorrhizierung und des Feinwurzelwachstums infolge von Phosphor-Düngung und damit einhergehende verminderte Aufnahme von Mikronährstoffen (vor allem Zn) verursacht. Zur Bestätigung dieser Hypothese liegen in den Datensätzen allerdings keine Angaben zur Durchwurzelung, Mykorrhizierung oder Zn-Versorgung vor.

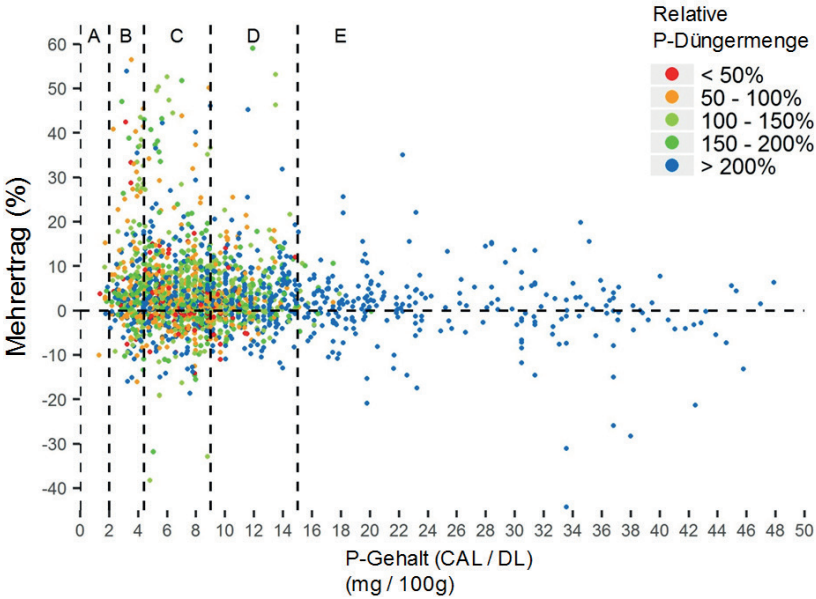


Abb. 3: Relative Mehrerträge durch P-Düngung als Funktion des Boden-P-Gehalts.

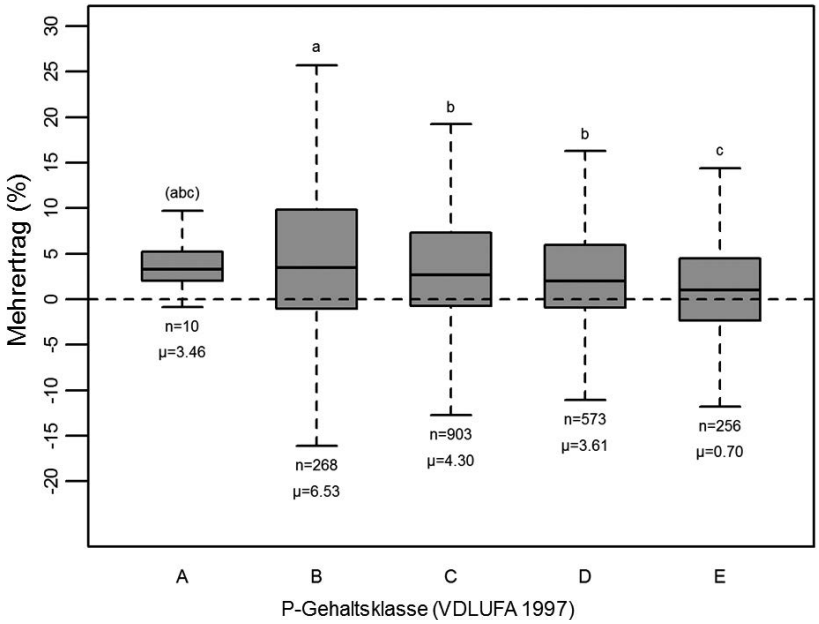


Abb. 4: Relative Mehrerträge durch P-Düngung als Funktion des Boden-P-Gehalts – Zusammenfassung in P-Gehaltsklassen (nach VDLUFA 1997). Die Boxen bezeichnen die Spanne zwischen 25- und 75-Perzentil, der Balken in der Mitte der Boxen den Median. Arithmetische Mittelwerte (μ) und Anzahl der Datensätze (n) sind unter den Boxen angegeben. Die Fehlerbalken („whiskers") bezeichnen die Minimal und Maximalwerte. Die Kleinbuchstaben bezeichnen die statistische Signifikanz der Unterschiede zwischen den Gruppen (Tukey post-hoc Test, $p < 0.05$).

Der Zusammenhang zwischen Boden-pH-Wert und ME zeigt, dass die Mehrerträge in den pH-Klassen A und B am höchsten sind und dann bei höheren pH-Werten stetig abnehmen (Abb. 5). Das könnte damit zusammenhängen, dass die Boden-P-Gehalte mit dem pH-Wert korreliert sind, weil das gedüngte P bei niedrigen pH-Werten von der CAL-Extraktion in geringerem Maße erfasst wird als bei höherem pH und es tatsächlich auch weniger pflanzenverfügbar ist (von Tucher et al. 2016). Zwischen den Klassen C bis E gibt es keine signifikanten Unterschiede mehr. Die relativen Mehrerträge steigen mit dem Humusgehalt an (abgesehen von Humus-Gehalten > 3%) (Abb. 6). Im Allgemeinen ist die P Verfügbarkeit direkt mit dem Humusgehalt korreliert, da die Phosphatsorption an Fe und Al-Oxiden durch organische Anionen (z.B. Citrat oder Malat) reduziert wird (Ligandentausch) (Hunt et al. 2007; Gerke 2015). Dadurch lässt sich die höhere Wirkung der P Düngung bei höheren Humusgehalten erklären.

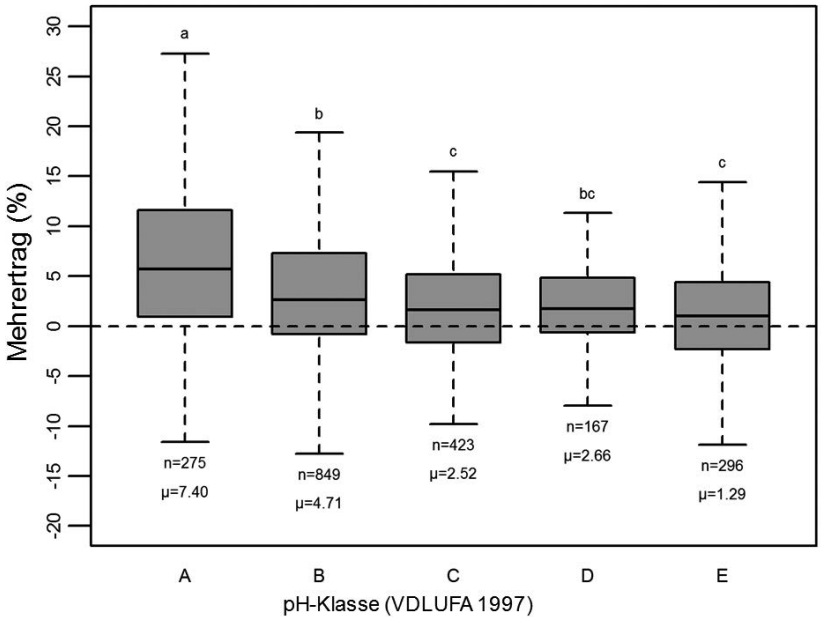


Abb. 5: Relative Mehrerträge durch P-Düngung als Funktion des Boden-pH-Wertes – Zusammenfassung in pH-Klassen. Die konkreten pH-Werte der Klassen variieren mit der Bodentextur und dem Humusgehalt des Bodens. So entspricht die „optimale“ Klasse C für die hier überwiegenden Humusgehalte von < 4 % bei einem Sandboden pH-Werten von 5,4 bis 5,8. Diese steigen für einen tonigen Lehm bis Ton auf 6,4 bis 7,2 an

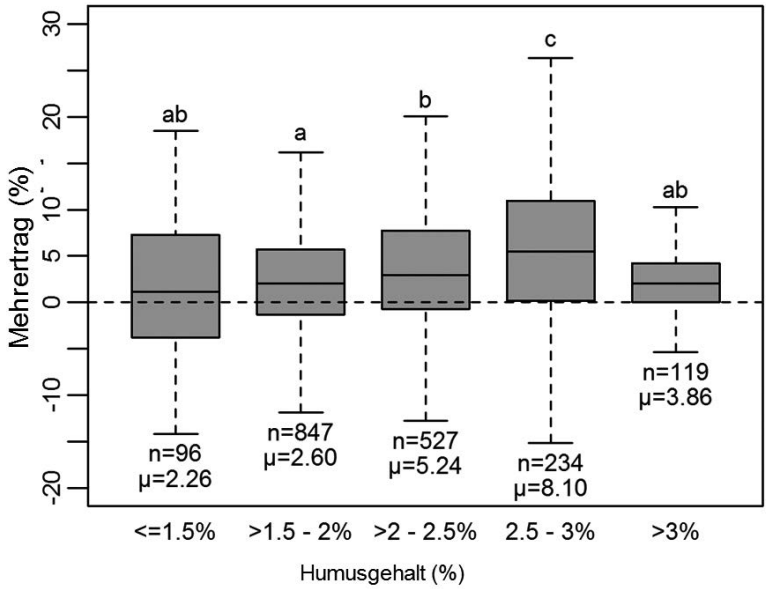


Abb. 6: Relative Mehrerträge durch P-Düngung als Funktion des Humusgehalts.

Die Beziehung zwischen P-Düngemenge und Mehrtrag ist in Abb. 7 dargestellt, wobei die P Düngemenge als Relativmenge, also P-Düngemenge geteilt durch P-Abfuhr, ausgedrückt wurde. Überraschenderweise gibt es hier kaum signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen mit unterschiedlicher rel. P-Düngemenge. Ein ähnliches Bild ergibt sich, wenn nur die Daten der P-Gehaltsklasse B berücksichtigt werden (hier nicht dargestellt). Das bedeutet, dass in praktisch allen Fällen die Boden-P-Gehalte in den gedüngten Parzellen ausreichend für einen hohen Ertrag sind, und die aufgebrachte P Menge hauptsächlich dazu dient, den pflanzenverfügbaren Boden-Phosphor-Pool zu erhalten oder sogar aufzufüllen.

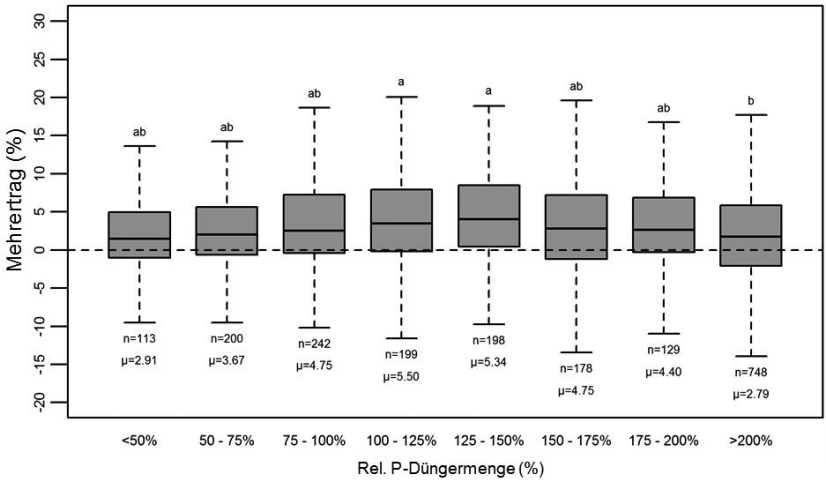


Abb. 7: Relative Mehrerträge durch P-Düngung als Funktion der relativen Düngemenge.

Die Mehrerträge als Funktion des Tongehaltes (Abb. 8) sind signifikant am höchsten bei mittleren Tongehalten (12 – 17%). Die bei höheren Tongehalten beobachtete geringere Wirkung der P-Düngung könnte mit dem zunehmendem Puffervermögen für Phosphat zusammenhängen, d.h., P-Düngegaben werden zunächst durch den Boden gepuffert, ohne direkt dem Pflanzenwachstum zugute zu kommen.

Zwischen den Ackerfrüchten zeigen sich deutliche Unterschiede in den durch P-Düngung erzielten Mehrerträgen (Abb. 9). Ackerfrüchte mit einem dichten und tiefen Wurzelsystem, wie Raps und Winterweizen, zeigen deutlich geringere Mehrerträge im Vergleich zu Ackerfrüchten mit schwächer entwickeltem Wurzelsystem, wie Zuckerrübe oder Kartoffel.

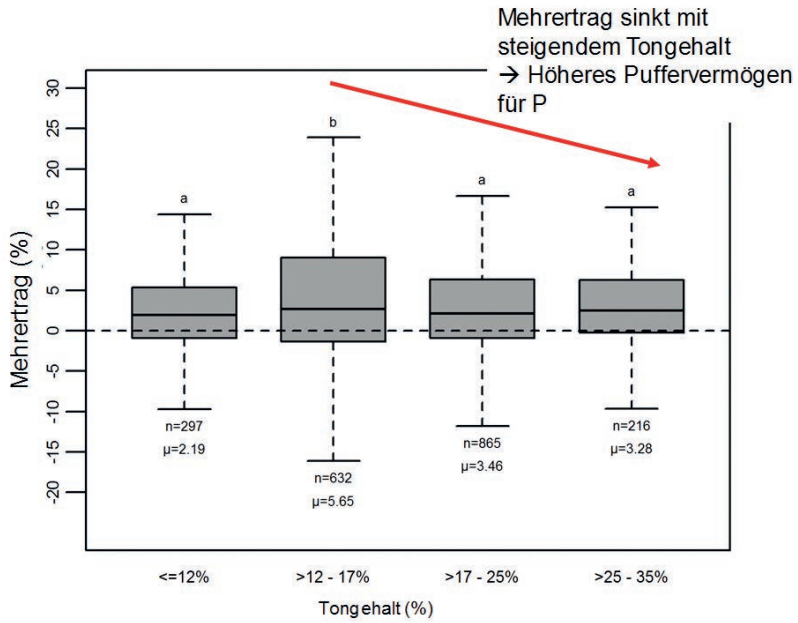


Abb. 8: Relative Mehrerträge durch P-Düngung als Funktion des Tongehalts.

Der Einfluss aller unabhängigen Variablen auf den relativen Mehrertrag (ME) ist als Regressionsbaumanalyse in Abb. 10 dargestellt. Die erste Aufteilung wird durch den Algorithmus für den pflanzenverfügbaren Boden-Phosphor-Gehalt (STP), bei einem Wert von 3,34 mg P / 100 g Boden durchgeführt. Das heißt, dass der Boden-CAL/DL-P-Gehalt die wichtigste unabhängige Variable zur Erklärung der Ertragssteigerung ist. Bei der zweiten Teilung erklären die Ackerfrucht und wiederum der pflanzenverfügbare Boden-Phosphor-Gehalt (Teilung bei 5,82 mg P / 100 g Boden) den größten Teil der Varianz. In den (grau markierten) Endsegmenten kann man jeweils ablesen, wie hoch die mittlere Ertragssteigerung für eine bestimmte Kombination von Bedingungen ist.

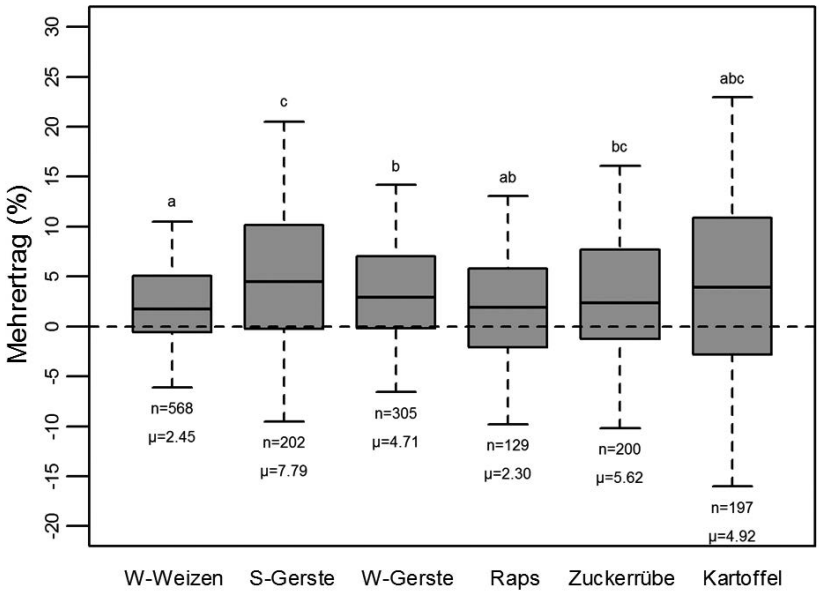


Abb. 9: Relative Mehrerträge durch P-Düngung für die sechs am häufigsten vorkommenden Ackerfrüchte.

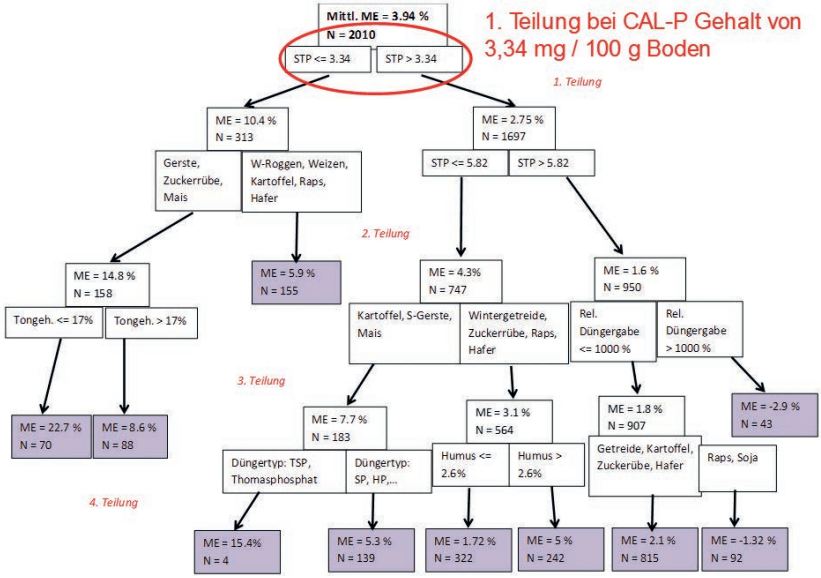


Abb. 10: CART (classification and regression tree) Analyse der relativen Mehrerträge (ME) als Funktion der unabhängigen Variablen pflanzenverfügbarer Boden- CAL/DL-P-Gehalt (STP), pH-Wert, Boden-Humusgehalt, Tongehalt, rel. Düngermenge, Ackerfrucht und Art des Phosphordüngers (Variablen die nur einen geringen Einfluß auf den ME haben sind nicht in der Grafik vertreten).

Basierend auf der Regressionsbaumanalyse lassen sich drei P-Gehaltsklassen (P-GK) ableiten (Tab. 2). Im Vergleich zu den 5 Gehaltsklassen der traditionellen P-Düngeempfehlung werden in diesen P-GK die im Datensatz erzielten relativen Mehrerträge besser abgebildet. Eine Unterscheidung von (wie bisher) fünf P-GK scheint basierend auf der Regressionsbaumanalyse nicht notwendig zu sein. Die Klassengrenzen der Gehaltsklasse C stimmen sehr gut mit den aktuellen (2018) Vorschlägen des VDLUFA-Standpunkts zur Phosphatdüngung überein.

Die verschiedenen Ackerfrüchte zeigten zudem deutliche Unterschiede hinsichtlich der durch P-Düngung erzielten Mehrerträge (Tab. 2). Die beiden Hackfrüchte Zuckerrübe und Kartoffel sowie Sommerweizen reagierten deutlich auf die P-Düngung. Daher könnte es profitabel sein, wenn besonders bei diesen Ackerfrüchten in P-GK A deutlich und in P-GK C leicht über dem P-Entzug gedüngt wird. Unsere Daten bestätigen dies auch, wobei die zum Teil geringe Anzahl an Beobachtungen (n) berücksichtigt werden muss.

Tab. 2: Mittlere relative Ertragssteigerung für die 6 häufigsten Ackerfrüchte in den aus der Regressionsbaumanalyse abgeleiteten P Gehaltsklassen.

Fruchtart	P Gehaltsklasse (mg P $100g^{-1}$)		
	A (≤3,3)	C (3,3-5,8)	E (>5,8)
Zuckerrübe	36,1% (n = 28)	10,1% (n = 18)	1,3% (n = 63)
Kartoffel	16,8% (n = 18)	11,7% (n = 91)	9,0% (n = 62)
Sommergerste	18,3% (n = 29)	6,4% (n = 57)	7,5% (n = 40)
Wintergerste	7,2% (n = 28)	3,3% (n = 108)	3,3% (n = 140)
Winterweizen	12,0% (n = 46)	4,6% (n = 196)	1,2% (n = 222)
Raps	7,0% (n = 12)	1,3% (n = 40)	-1,9% (n = 55)

Die Abnahme der pflanzenverfügbaren P-Gehalte mit der Zeit ohne P-Düngung ist in Abb. 11 exemplarisch für 4 Standorte gezeigt. Diese Standorte weisen ähnliche pH-Werte, aber unterschiedliche Ausgangs P-Gehalte und Tongehalte auf. Es wird deutlich, dass an Standorten mit hohen P-Ausgangsgehalten der verfügbare P-Gehalt zu Beginn recht schnell abnimmt, sich dann aber nach etwa 10 Jahren stabilisiert und sich danach kaum noch ändert. Bei den Böden mit Ausgangs-P-Gehalten von 2 bzw. 5mg P/100g ändert sich der pflanzenverfügbare P-Gehalt über drei Jahrzehnte so gut wie gar nicht, obwohl dort jedes Jahr 27 bzw. 19 kg P/ha durch die Ernte abgefahren werden. Zum Teil steigt der pflanzenverfügbare P-Gehalt sogar an (Standorte mit 20 bzw. 30 % Tongehalt). Dies wurde in ähnlicher, sogar noch stärker ausgeprägter Weise von Schweitzer und Baumecker (2012) für den Langzeit-Düngeversuch Thyrow in Brandenburg (nicht Bestandteil der vorliegenden Metaanalyse) beobachtet und durch den Effekt von auf dem Feld verbliebenen Ernterückständen sowie P-Aufschluss und -Aufnahme aus dem Unterboden erklärt. Bemerkenswert ist das unterschiedliche Niveau der Stabilisierung der pflanzenverfügbaren P-Gehalte. Es besteht jedoch offenbar kein eindeutiger Zusammenhang mit den P-Exporten oder dem Tongehalt. Während der effektive Diffusionskoeffizient, und damit die Mobilität, mit zunehmendem Tongehalt abnimmt, wird die Sorptionskapazität für Phosphat vorrangig vom Gehalt an Fe- und Al-Oxiden bestimmt, und kaum vom Tongehalt (Kuchenbuch und Buczko, 2011). Angaben zu den Gehalten an diesen Oxiden liegen leider nur für einen sehr kleinen Teil der Datenbank vor, sodass dies nicht in der Auswertung berücksichtigt werden konnte.

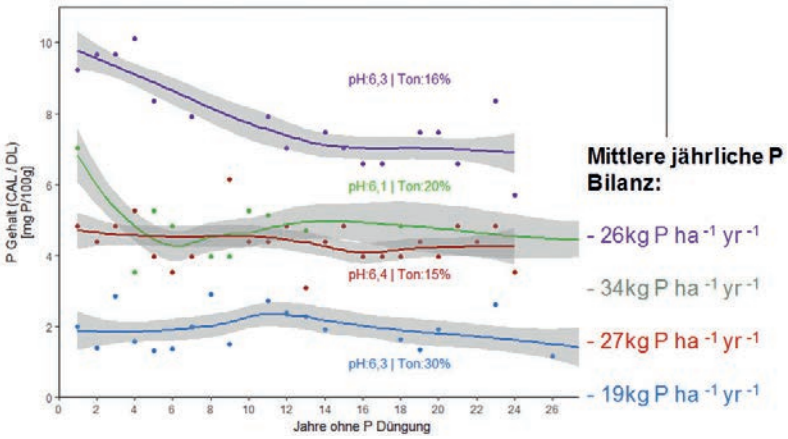


Abb. 11: Zeitliche Entwicklung der pflanzenverfügbaren P-Gehalte für 4 ausgewählte Standorte nach Einstellen der P-Düngung.

Die Entwicklung der relativen Erträge als Funktion der Zeit seit Einstellen der P-Düngung (Abb. 12) zeigt, dass erst nach 10 Jahren deutlich niedrigere Erträge als in den gedüngten Varianten auftreten. Zwischen 10 bis 30 Jahren bleiben die mittleren relativen Erträge auf einem ähnlichen Niveau, bei etwa -9,5 %. Erst nach 30 Jahren sind die Erträge ohne P-Düngung dann deutlich niedriger, im Mittel um etwa 14 %.

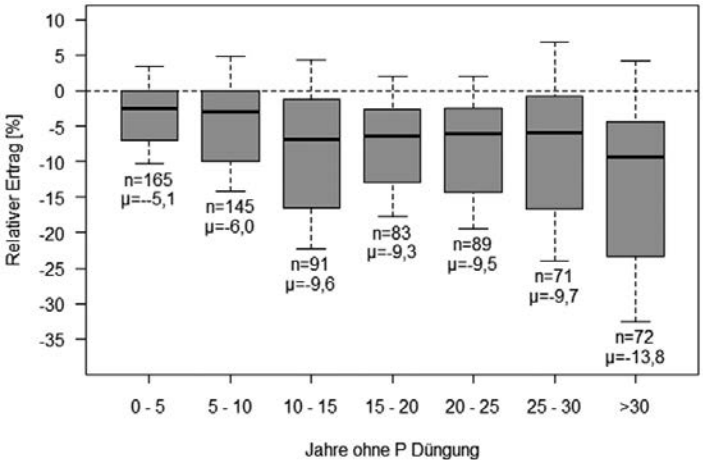


Abb. 12: Zeitliche Entwicklung der relativen Erträge nach Einstellen der P-Düngung; alle Standorte gemittelt in 5-Jahresabschnitten gruppiert.

Betrachtet man die Mindererträge differenziert nach Ackerfrucht (Abb. 13), zeigen sich deutliche Unterschiede: Während Zuckerrübe, Kartoffel und Sommergerste sehr deutlich auf die unterlassene P-Düngung reagieren, sind die Erträge von Wintergerste und Winterweizen nur minimal geringer. Diese Unterschiede lassen sich durch die unterschiedliche Entwicklung der Wurzelsysteme erklären: Zuckerrübe und Kartoffel sind allgemein flachwurzelnd mit geringer Wurzellängendichte. Die Sommergerste wiederum hat für die Ausbildung eines ausgedehnten Wurzelsystems deutlich weniger Zeit als die Wintergetreidearten, welche dadurch Phosphat besser aus dem Boden aufnehmen und dadurch eine unterlassene P-Düngung deutlich besser kompensieren können.

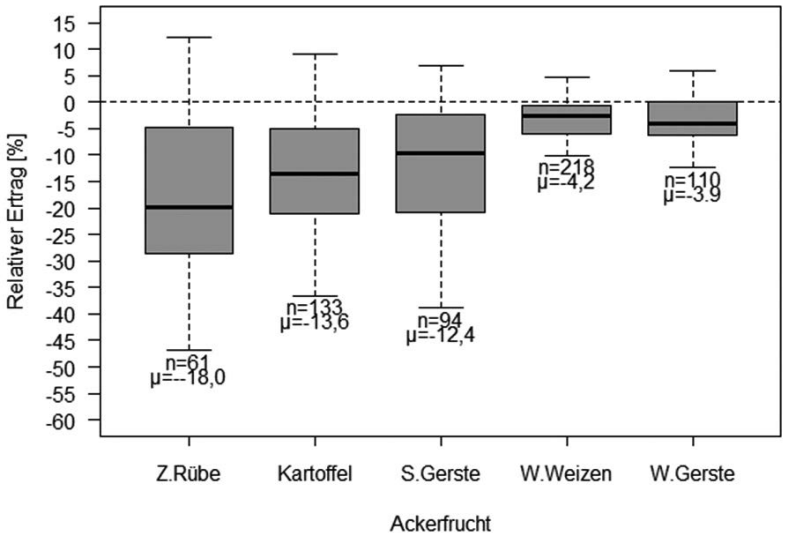


Abb. 13: Abnahme der relativen Erträge bei unterlassener P-Düngung für die häufigsten Ackerfrüchte.

Schlussfolgerungen

Die Metaanalyse einer Datenbank mit Feldversuchen in Deutschland zur Wirksamkeit von P-Düngung ergab, dass der durch P-Düngung erzielte relative Mehrertrag vor allem durch den pflanzenverfügbaren P Gehalt im Boden bestimmt wird. Der gefundene Grenzwert von 3,3 mg P/100g stimmt gut mit der neuen Untergrenze der Gehaltsklasse C (VDLUFA 2018) von 3mg P/100g überein. Des weiteren zeigte sich, dass die Mehrerträge stark von der betrachte-

ten Fruchtart abhängen, mit hohen Werten für Kartoffel und Zuckerrübe, jedoch deutlich geringerer Wirkung bei Winterweizen und Raps.

Bei unterlassener P-Düngung ergaben sich über drei Jahrzehnte nur langsame Abnahmen der CAL-P/DL-P Gehalte, bei rel. geringen Ertragseinbußen. Selbst nach 10 – 20 Jahren unterlassener P-Düngung wiesen die meisten Böden noch ausreichende P-Gehalte auf (> 3 mg P/100 g). Das bedeutet, dass akkumulierte P Überschüsse in Ackerböden sukzessive über Jahre durch Einsparung der P Düngung aufgezehrt werden können.

Literatur

Buczko, U., van Laak, M., Eichler-Löbermann, B., Gans, W., Merbach, I., Panten, K., Peiter, E., Reitz, T., Spiegel, A., von Tucher, S. 2018: Re-evaluation of the yield response by phosphorus fertilization based on meta-analyses of long-term field experiments. Ambio 2018, 47(Suppl. 1): S50–S61 https://doi.org/10.1007/s13280-017-0971-1

Frede, H.-G., Bach, M., 2010: Phosphor in der deutschen Landwirt-schaft – Bilanzen und Effizienzen. Working Paper · January 2010, DOI: 10.13140/RG.2.1.2210.9689.

Gerke, J. 2015: The acquisition of phosphate by higher plants: Effect of carboxylate release by the roots. A critical review. Journal of Plant Nutrition Soil Science 178: 351–364.

Hunt, J.F., T. Ohno, Z. He, C.W. Honeycutt, and D.B. Dail. 2007: Inhibition of phosphorus sorption to goethite, gibbsite, and kaolin by fresh and decomposed organic matter. Biology and Fertility of Soils 44: 277–288.

Jordan-Meille, L., G.H. Rubæk, P.A.I. Ehlert, V. Genot, G. Hofman, K. Goulding, J. Recknagel, G. Provolo, et al. 2012: An overviewof fertilizer-P recommendations in Europe: Soil testing, calibration and fertilizer recommendations. Soil Use and Management 28: 419–435.

Kerschberger, M., Hege, U., Jungk, A. (1997): Phosphordüngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf, VDLUFA-Standpunkt.

Kuchenbuch, R.O., Buczko, U., 2011: Re-visiting potassium- and phosphate-fertilizer responses in field experiments and soil-test interpretations by means of datamining. J. Plant Nutr. SoilSci. 174, 171-185.

Römer, W., 2009: Ansätze für eine effizientere Nutzung des Phosphors auf der Basis experimenteller Befunde. Ber. Ldw. 87 (2009), H. 1, 5–30.

Rowe, H., Withers, P.J.A., Baas, P., Chan, N.L., Doody, D., Holiman, J., Jacobs, B., Li, H., MacDonald, G.K., McDowell, R., Sharpley, A.N., Shen, J., Taheri, W., Wallenstein, M., Weintraub, M.N., 2016: Integrating legacy soil phosphorus into sustainable nutrient management strategies for future food, bioenergy and water security. Nutr. Cycl. Agroecosyst. 104, 393–412.

Schweitzer, K., Baumecker, M., 2012: Hohe Phosphornachlieferung trotz dauerhafter P-Unterversorgung: Folgen unterlassener P-Düngung für den P-Zustand und den Ertrag eines trockenen Sandbodens. VDLUFA Schriftenreihe 68: Nachhaltigkeitsindikatoren für die Landwirtschaft: Bestimmung und Eignung. S. 331-340.

Syers, J.K., Johnston, A.E., Curtin, D., 2008: Efficiency of Soil and Fertilizer Phosphorus. Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin 18, 107 pp.

v. Tucher, S., Hörndl, D. Schmidhalter, U., 2016: Wirkung differenzierter P-Düngung und Kalkung auf Ertrag und P-Aufnahme von Winterweizen, Wintergerste und Beta-Rüben im Langzeitexperiment. Kongressband 2016 VDLUFA-Schriftenreihe 72.

VDLUFA (2018): P-Düngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf. VDLUFA-Standpunkt.

Autoren (korrespondierend)

PD Dr. habil. Christel Baum	Universität Rostock Agrar- und Umweltwissenschaftl. Fakultät Justus-von-Liebig-Weg 6 18059 Rostock
Dr. Uwe Buczko	Universität Rostock Agrar- und Umweltwissenschaftl. Fakultät Justus-von-Liebig-Weg 6 18059 Rostock
Prof. Dr. Dr. Felix Ekardt	Forschungsstelle Nachhaltigkeit und Klimapolitik Könneritzstraße 41 04229 Leipzig
Prof. Dr. Peter Leinweber	Universität Rostock Agrar- und Umweltwissenschaftl. Fakultät Justus-von-Liebig-Weg 6 18059 Rostock
Prof. Dr. Karl Hermann Mühling	Christian-Albrechts-Universität zu Kiel Agrar- und Ernährungswissenschaftliche Fakultät Hermann-Rodewald-Strasse 2 24118 Kiel
Prof. Dr. Torsten Müller	Universität Hohenheim Fakultät Agrarwissenschaften Institut für Kulturpflanzenwissenschaften Fruwirthstr. 20 70593 Stuttgart
Prof. Dr. Hans-Werner Olfs	Hochschule Osnabrück Fakultät AUL Am Krümpel 31 49090 Osnabrück
Prof. Dr. Sven Schubert	Justus-Liebig-Universität Gießen Institut für Pflanzenernährung Heinrich-Buff-Ring 26-32 35392 Gießen

Dr. Vera Sommerfeld und Prof. Dr. Markus Rodehutscord	Universität Hohenheim Fakultät Agrarwissenschaften Institut für Nutztierwissenschaften Emil-Wolff-Str. 10 70599 Stuttgart
Prof. Dr. Franz Wiesler	LUFA Speyer Obere Langgasse 40 67346 Speyer

In der Schriftenreihe *agrarspectrum* sind noch folgende Bände erhältlich:

Band 45
Nutzungskonkurrenzen in der Landschaft – Ursachen, Auswirkungen und Lösungsansätze
2012; 180 Seiten, Broschüre, € 5,00

Band 46
Klimawandel und Extremwetterereignisse: ein Problem für die Landwirtschaft?
2013; 162 Seiten, Broschüre, € 19,90

Band 47
Trends in der Landwirtschaft – quo vadis Agrarwissenschaften?
2015; 98 Seiten, Broschüre, € 14,90

Band 48
Bioökonomie: Welche Bedeutung haben die Agrar- und Forstwissenschaften?
2016; 122 Seiten, Broschüre, € 14,90

Band 49
Nutztierhaltung: Herausforderungen und Implikationen für die Forschung
2017; 126 Seiten, Broschüre, € 14,90

Band 50
Zukunft des Pflanzenschutzes
2018; 98 Seiten, Broschüre, € 14,90

Band 51
Lebensmittelsicherheit:
Fakten aus der Wissenschaft
2018; 92 Seiten, Broschüre, € 12,90