Phosphorbezogene Boden- und Pflanzenparameter aus einem Langzeitexperiment zu differenzierter P-Düngung und Zufuhr organischen Materials

S. von Tucher, M. Wimmer, U. Schmidhalter
Lehrstuhl für Pflanzenernährung TUM, Freising

1 Einleitung

Die meisten Böden in Deutschland sind ausreichend oder hoch mit P versorgt. Dies gilt besonders für Regionen mit intensiver Tierhaltung und/oder hoher Dichte an Biogasanlagen. Böden mit hohen P-Reserven stellen ein hohes und langfristiges Risiko für P-Verluste in Oberflächengewässer dar (Sharpley et al., 2013). Ein hohes P-Verlustrisiko wird derzeit für mehr als 76 % der deutschen Ackerböden postuliert (Fischer et al., 2017). Dagegen haben viele Marktfruchtbetriebe in den letzten 1 bis 2 Jahrzehnten ihre P-Düngung reduziert oder ganz auf sie verzichtet. Die durchschnittliche Zufuhr an mineralischem P liegt entsprechend mit etwa 8 kg/ha unter der P-Abfuhr (Tóth et al., 2014). Die Wirkung einer unterlassenen P-Düngung kommt im Boden nur langsam zum Tragen (Johnston et al., 2016), da P im Boden stark gepuffert ist. Langzeitfeldexperimente sind daher für die Beantwortung solcher Fragen von besonderem Wert. Für die Beurteilung der Auswirkungen unterlassener P-Düngung auf agronomische Parameter wie Ertrag und P-Aufnahme kommt hinzu, dass die Jahreswitterung die Reaktion der Pflanzen beeinflussen kann.

Im Folgenden werden Ergebnisse der Auswertung eines 37-jährigen Langzeitexperiments mit unterlassener und differenzierter P-Düngung und einer unterschiedlichen Zufuhr von organischem Material vorgestellt. Untersucht wurden Kenngrößen des Boden-P-Status wie CAL-lösliches P, Gesamt-P, oxalat-lösliches P und organisches P, sowie die Erträge und P-Abfuhren der angebauten Kulturen Winterweizen, Wintergerste, Kartoffel und Mais und deren langfristige Entwicklung.

2 Material und Methoden

Standort des statischen Feldversuchs mit ortsfesten Parzellen (Anlagejahr 1979) ist Dürnast bei Freising (Bayerisches Tertiärhügelland, 790 mm Nie-

derschlag, 8,4 °C Durchschnittstemperatur, 469-471 üNN, Bodenart schluffiger Lehm mit 20 % Ton, 63 % Schluff, 17 % Sand, 1,0-1,7 % C_{org}, 0,1-0,17 % N_t, CAL-P zu Versuchsbeginn durchschnittlich 7 mg/100g Boden). Die Fruchtfolge bis 2013 beinhaltete Kartoffel, Winterweizen, Winter-(oder Sommergerste), 2014 Silomais, 2015 Körnermais und 2016 Winterweizen.

Der Versuchsaufbau der Blockanlage ist drei-faktoriell mit (1) 2 N-Stufen (1: Ø 120-150 kg und 2: Ø 160-200 kg N/ha), (2) 4 P-Stufen (0, 17, 31 und 44 kg P/ha jährlich als Super- oder Triplesuperphosphat) und (3) 4 Varianten organischer Düngung (ohne, Strohdüngung (nach Getreide), Gründüngung (vor Kartoffel), Stroh- und Gründüngung) mit drei Wiederholungen. Der Versuch teilt sich dabei in einen östlichen und einen westlichen Block mit jeweils allen 4 P-Stufen auf.

Untersucht wurden folgende Parameter im Boden: CAL-lösliches P (Schüller, 1969), oxalat-lösliches P (Schwertmann, 1964), P extrahierbar in 1 mol/l Na_2SO_4 und 1 mol/l NaOH (Einmalextraktion nach Steffens, (2010) verändert), Gesamt-P nach Aufschluss mit H_2SO_4 und $HClO_4$. Die P-Bestimmung erfolgte entweder nach Murphy und Riley (1962) für anorganisches P oder für Gesamt-P im Extrakt mittels ICP. Das organische P wurde durch Differenzbildung bestimmt: $P_{org} = P_t - P_{anorg}$.

Im Pflanzenmaterial wurde der Gesamt-P-Gehalt nach Nassveraschung untersucht, bis 1992 in offenen Gefäßen mit $HNO_3/HClO_4$, ab 1993 in geschlossenen Gefäßen im Mikrowellenofen unter geregeltem Druck (9-10 bar) mit HNO_3/H_2O_2. Die P-Bestimmung wurde bis 1997 kolorimetrisch mit Vanadat/Molybdat, ab 1998 mit ICP durchgeführt.

Die statistische Auswertung der Erträge und P-Abfuhren wurde mittels einer ANOVA und anschließendem Mittelwertsvergleich durch Tukey-Test bzw. bei fehlender Normalverteilung mit einem Rangfolge-Test nach Kruskal-Wallis durchgeführt. Die Langzeitauswertung der Erträge ohne P-Düngung erfolgte relativ zu den mit 31 und 44 kg P/ha gedüngten Behandlungen. Dafür wurden die Erträge der jeweils zugehörigen Stufen für N und die organische Düngung gleich 100 % gesetzt und die Erträge der nicht mit P gedüngten Behandlung dazu relativ berechnet. Es wurden Regressionsgeraden mit ANOVA und 95 % Vertrauensintervalle für die Steigung der Geraden bestimmt.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Einfluss langjährig differenzierter P-Düngung auf Bodenparameter

Nach 36 Versuchsjahren mit unterschiedlicher P-Düngung war eine deutliche Differenzierung der Gehalte an CAL-löslichem P in 0-25 cm feststellbar (Abb. 1). Gegenüber dem durchschnittlichen Ausgangsgehalt von 7 mg P/100 g Boden führte die unterlassene P-Düngung zu einem Rückgang, die Zufuhr von 31 und 44 kg P/ha*Jahr zu einem Anstieg der Gehalte auf 9-11 mg P/100 g Boden. In den Parzellen ohne P-Düngung ist der Unterschied der P-Gehalte zwischen dem östlichen, niedrigeren und dem westlichen Block auffällig.

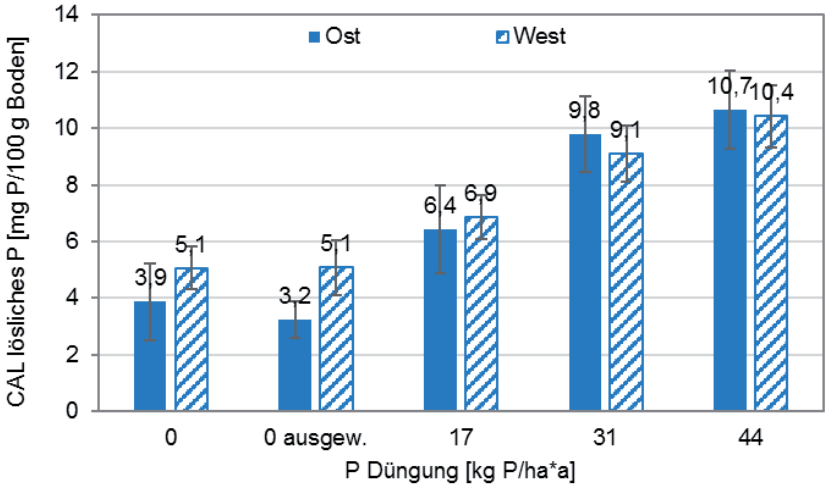

Abb. 1: Langzeitwirkung der P-Düngung auf die Gehalte an CAL-löslichem P in 0-25 cm nach 36 Versuchsjahren (1979 bis 2014) aufgeteilt nach Ost- und Westblock; „ausgew.“: Ostteil Parzellen 3-10 bzw. Parzellen 1, 2, 11, 12 + Westteil; Mittelwerte über die Stufen der N- und organischen Düngung. Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung.

Die geringsten CAL-P-Gehalte mit 3,2 (2,5-4,1) mg P/100 g wurden in acht nebeneinander gelegenen Parzellen des Ostteils festgestellt.

Die weiteren gemessenen Boden-P-Parameter Gesamt-P, oxalat-lösliches Gesamt-P und Na_2SO_4/NaOH-lösliches anorganisches P wiesen ein ähnliches Muster auf wie das CAL-P, sodass die differenzierte P-Düngung jeweils deutlich erkennbar ist (Abb. 2).

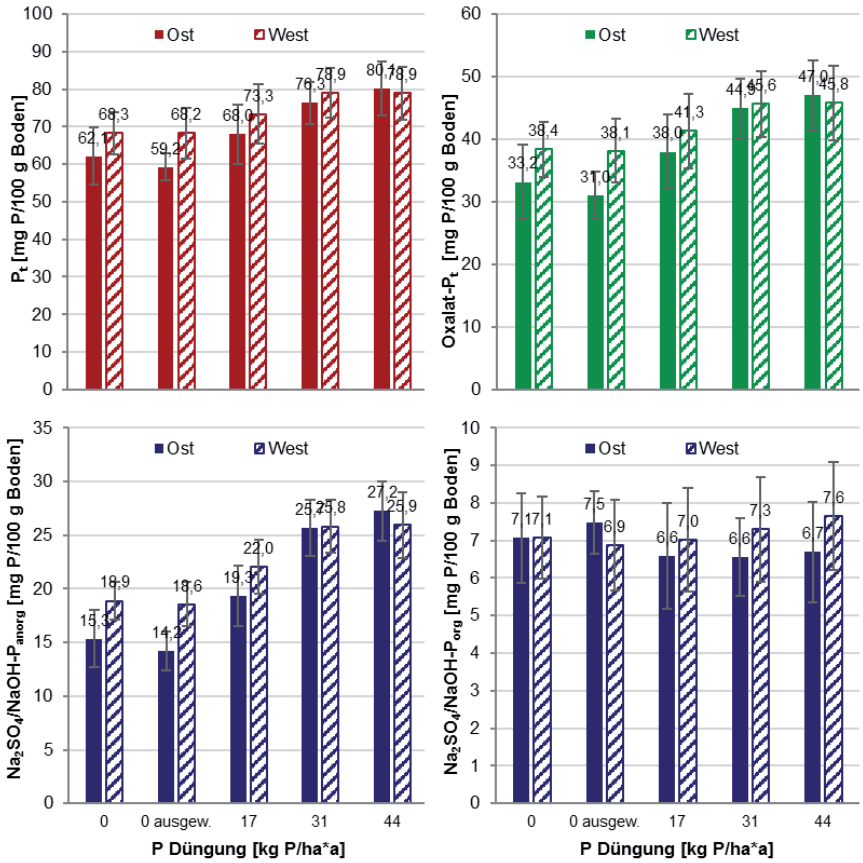

Abb. 2: Langzeitwirkung der P-Düngung auf die Gehalte an Gesamt-P, oxalat- und Na_2SO_4/NaOH-löslichem anorganischem und organischem P in 0-30 cm nach 37 Versuchsjahren (1979 bis 2015) aufgeteilt nach Ost- und Westblock; weitere Erläuterungen s. Abb. 1.

Das CAL-P zeigte dabei allerdings die größte Spreizung in Bezug auf die P-Düngung. Ausgehend von Gesamt-P war davon etwa 50 % in Oxalat löslich und 25 % als anorganisches P in Na_2SO_4/NaOH. Das in Na_2SO_4/NaOH lösliche organische P wurde von der P-Düngung nicht beeinflusst. Jedoch lagen diese Gehalte auf dem höheren N-Düngeniveau über dem niedrigeren und die der Gründüngungsvariante überstiegen die der 3 anderen Varianten organischer Düngung (Daten nicht dargestellt). Langfristig steigende mineralische P-Düngung erhöht damit anorganisches, nicht aber organisches Boden-P, was durch Untersuchungen beispielsweise von Keller et al. (2012) bestätigt wird.

3.2 Wirkung langjährig differenzierter P-Düngung auf Erträge und P-Abfuhren

Für Winterweizen wurde in 3 von 13 Anbaujahren eine signifikante Ertragsminderung durch unterlassene bzw. geringe (17 kg P/ha 2016) P-Düngung festgestellt (Tab. 1). Effekte traten damit in insgesamt 23 % der Anbaujahre auf. Wintergerste reagierte in 4 von 8 Anbaujahren (50 %) mit Ertragseinbußen durch langjährig unterlassene P-Düngung. Für Kartoffel wurden in 6 von 10 Anbaujahren (60 %) Ertragsminderungen durch unterlassene P oder reduzierte P-Düngung beobachtet. In den beiden Jahren mit Maisanbau war für hohe Erträge von Silomais (2014) eine P-Düngung von mindestens 31 kg P/ha*Jahr erforderlich, während für Körnermais (2015) keinerlei Effekte der P-Düngung erkennbar waren. Die gemessene P-Abfuhr reagierte sensibler auf die unterlassene P-Düngung, sodass signifikant geringere P-Abfuhren in 6 von 9 Jahren (67 %) für Winterweizen, in 5 von 6 Jahren (83 %) für Wintergerste und in allen 6 verfügbaren Jahren für Kartoffel auftraten. Die P-Abfuhr von Silomais differenzierte analog zum Ertrag. Für Körnermais konnte keine Beeinflussung der P-Abfuhr durch die P-Düngung beobachtet werden (nicht dargestellt).

Tab. 1: Einfluss langjährig differenzierter P-Düngung auf den Ertrag von Winterweizen, Wintergerste, Kartoffel sowie Silo- (SM) und Körnermais (KM). Angegeben sind statistisch signifikanter Unterschiede zwischen den P-Düngestufen 0, 17, 31 und 44 kg P/ha*Jahr; n.s.: nicht sign.

Versuchs-zeitraum			**1980-89**	**1990-99**	**2000-09**	**2010-16**
Winterweizen		1*	n.s.	$P_0<P_{31,44}$	n.s.	n.s.
		2	n.s.	$P_0<P_{17,31,44}$	n.s.	$P_{17}<P_{0,31,44}$
		3	n.s.	n.s.	n.s.	-
		4	n.s.	-	n.s.	-
Wintergerste		1	n.s.	$P_{0,17}<P_{44}$	$P_0<P_{31,44}$	n.s.
		2	-	$P_0<P_{44}$	n.s.	$P_0<P_{17,31,44}$
		3	-	-	n.s.	-
Kartoffel		1	$P_{0,17}<P_{31}<P_{44}$	$P_0<P_{17,31,44}$	$P_{0,17}<P_{44}$	$P_0<P_{17,31,44}$
		2	n.s.	n.s.	$P_{0,17}<P_{31,44}$	-
		3	-	$P_{17}<P_{31,44}$	n.s.	-
		4	-	n.s.	-	-
Mais	(SM)	1	-	-	-	$P_0<P_{17}<P_{31,44}$
	(KM)	2	-	-	-	n.s.

* 1-4: Anzahl der Anbaujahre im Versuchszeitraum

Die Jahre mit signifikanten Ertragseffekten für Getreide waren nicht durch Besonderheiten im Ertragsniveau gekennzeichnet. Nur für Kartoffel deutete sich eine Tendenz zu größeren P-Düngeeffekten in Jahren mit höherem Ertragsniveau an. Es bleibt damit zunächst offen, aufgrund welcher Faktoren es zu Mindererträgen ohne die P-Düngung kam oder diese ausblieben. Angesichts der Verteilung der Jahre mit signifikanten Ertragseffekten durch P-Düngung über den Versuchszeitraum scheint die Dauer der P-Verarmung durch unterlassene P-Düngung aber nicht die einzige Ursache zu sein. Eine Reihe zusätzlicher Faktoren wie die Niederschlagsmenge und ihre Verteilung, sowie die Temperatur auch der in frühen Wachstumsstadien beeinflusst die Reaktion von Pflanzen auf die P-Düngung im Freiland (Mundus, et al., 2017). Die Notwendigkeit diese Parameter in die Beurteilung der für optimales Pflanzenwachstum erforderlichen Gehalte an pflanzenverfügbarem P im Boden einzubeziehen, unterstreicht die Rolle von längerfristigen Experimenten an einem Standort.

Festzuhalten bleiben die Unterschiede in der Empfindlichkeit der Kulturen gegenüber erniedrigten Boden-P-Gehalten, wobei Winterweizen die geringste, Wintergerste eine mittlere und Kartoffel die höchste Sensitivität aufwies. Diese Beobachtung wird durch die Untersuchung der Langzeitentwicklung der Erträge mit unterlassener P-Düngung untermauert. Beispielhaft dargestellt ist die Ertragsentwicklung ausgewählter Behandlungen der nicht mit P gedüngten Versuchsglieder und der zugehörigen ungedüngten Parzelle mit niedrigem CAL-P-Gehalt im östlichen Block (s. Abb. 1) für Winterweizen und Kartoffel (Abb. 3). Im Vergleich zu den jeweils auf 100 % gesetzten P-Düngestufen mit 31 und 44 kg P/ha*a konnte für Winterweizen weder im Mittel der 3 Wiederholungen noch für die mit 2,7 mg P/100g niedrig versorgte Parzelle 5 ein Ertragsrückgang über die Zeit von 1980 bis 2016 beobachtet werden. Frühere Ergebnisse einer geringen Empfindlichkeit insbesondere von Winterweizen gegenüber einer unterlassenen P-Düngung und erniedrigten Boden-P-Gehalten werden damit bestätigt (Römer et al., 2005; von Tucher et al., 2016).

Im Gegensatz dazu nahmen die TM-Erträge der Kartoffel im Zeitraum von 1981 bis 2011 ab, insbesondere auf der Parzelle 5 mit 2,7 mg CAL-P/100 g Boden. Ähnlich rückläufige Kartoffelerträge wurden für 6 der 8 Parzellen mit CAL-P-Gehalten von durchschnittlich 3,2 mg P/100 g beobachtet. Die Kartoffel gilt als eher P-ineffizient, sodass eine Reihe von Maßnahmen vorgeschlagen werden, um auch bei niedrigeren Boden-P-Gehalten stabile Erträge zu erzielen (Rosen et al., 2014).

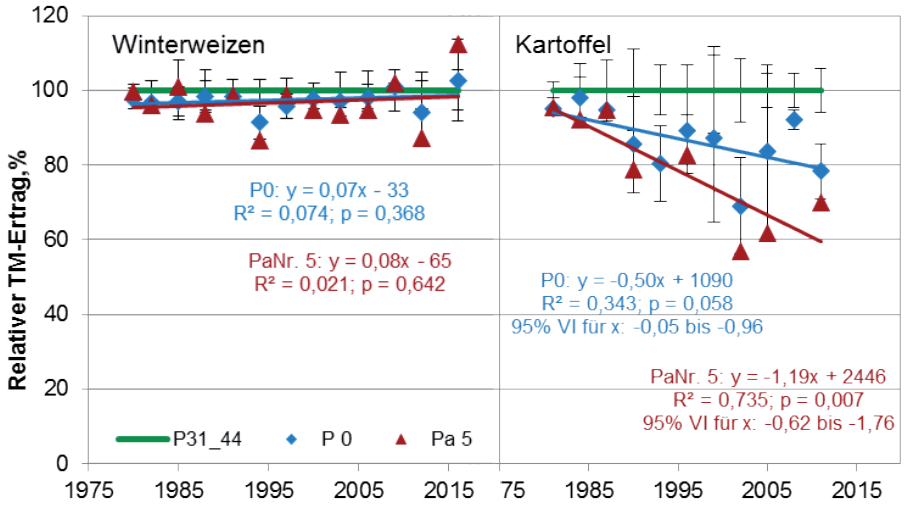

Abb. 3: Langzeitentwicklung der relativen Trockenmasseerträge von Winterweizen und Kartoffel nach unterlassener P-Düngung im Vergleich zu mit 31 und 44 kg P/ha*a gedüngten Behandlungen (entspr. 100 %) der N-Stufe 2 mit Gründüngung. P0: alle Wiederholungen; Pa 5: Parzelle Nr. 5 mit 2,7 mg CAL-P/100 g Boden.

Die Kartoffel gilt als eher P-ineffizient, sodass eine Reihe von Maßnahmen vorgeschlagen werden, um auch bei niedrigeren Boden-P-Gehalten stabile Erträge zu erzielen (Rosen et al., 2014).

4 Zusammenfassende Schlussfolgerungen

Die über 37 Jahre hinweg unterschiedliche P-Düngung zwischen 0 und 44 kg P/ha*a führte im Boden auf der Basis verschiedener Extraktionsverfahren zu einer deutlichen Differenzierung der Gehalte an anorganischem P, wobei CAL-lösliches P die größte Spreizung der Werte aufwies. Ertragsunterschiede in Folge unterlassener oder reduzierter P-Düngung wurden für Winterweizen in 23 %, für Winter-gerste in 50 % und für Kartoffel in 60 % der Anbaujahre festgestellt. Im Zeitverlauf signifikant zurückgehende Erträge wurden jedoch nur für die Kartoffel insbesondere auf ungedüngten Parzellen mit CAL-P-Gehalten von weniger als 3-4 mg P/100g beobachtet. Um die Erträge dort langfristig stabil zu halten, müssen Kartoffeln auf solchen Flächen mit P mindestens in der Größenordnung ihrer Abfuhr gedüngt werden.

Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die im Rahmen von BonaRes gewährte finanzielle Unterstützung des Projekts Inno-SoilPhos (Förderkennzeichen 031A558D).

5 Literaturanganben

Fischer, P., Pöthig, R., Venohr, M., 2017: The degree of phosphorus saturation of agricultural soils in Germany: Current and future risk of diffuse P loss and implications for soil P management in Europe. Science of the Total Environment 599–600, 1130-1139.

Johnston, A.E., Poulton, P.R., White, R.P., MacDonald, A.J., 2016: Determining the longer term decline in plant-available soil phosphorus from short-term measured values. Soil Use and Management 32, 151-161.

Mundus, S., Carstensen, A., Husted, S., 2017: Predicting phosphorus availability to spring barley (*Hordeum vulgare*) in agricultural soils of Scandinavia. Field Crop. Res. 212, 1-10.

Murphy J., Riley, J.P., 1962: A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. Anal. Chim. Acta 27, 31-36.

Römer, W., Claassen, N., Steingrobe, B., Hilmer, R., 2005: P- und K-Düngung – Reaktion von Winterweizen und Wintergerste auf die P- und K-Düngung in einem 20-jährigen Feldversuch. Getreide-Magazin, 10. Jg. 4, 238-242.

Rosen, C.J., Kelling, K.A., Stark, J.C., Porter, G.A., 2014: Optimizing Phosphorus Fertilizer Management in Potato Production. Am. J. Potato Res. 91, 145-160.

Schüller, H., 1969: Die CAL-Methode, eine neue Methode zur Bestimmung des pflanzenverfügbaren Phosphates in Böden. Z. Pflanzenernähr. Bodenkde. 123, 48-63.

Sharpley, A., Jarvie, H., Buda, A., May, L., Spears, B., Kleimnan, P., 2013: Phosphorus Legacy: Overcoming the Effects of Past Management Practices to Mitigate Future Water Quality Impairment. Journal of Environmental Quality 42, 1308-1326.

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. J. Plant Nutr. Soil Sci. 173, 765-771.

Schwertmann, U., 1964: Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit Ammoniumoxalat-Lösung. Z. Pflanzenernähr. Bodenkde. 105, 194-202.

Tóth, G., Guicharnaud, A., Tóth, B., Hermann, T., 2014: Phosphorus levels in croplands of the European Union with implications for P fertilizer use. European Journal of Agronomy 55, 42-52.

von 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. VDLUFA Schriftenreihe 72, 175-183, Kongressband 2016 Rostock, VDLUFA-Verlag, Darmstadt.