

Aus der Professur für Pflanzenbau
der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät

Zusammenfassung der kumulativen Dissertation

**Agronomic effectiveness of mineral and organic P sources – insights from
long-term field experiments**

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Agrarwissenschaften (doctor agriculturae)

an der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät
der Universität Rostock

vorgelegt von

M.Sc. Theresa Zicker
wohnhaft in Sanitz

Verteidigung am 31. Januar 2025

Phosphor (P) spielt als ein essentieller Pflanzennährstoff eine wichtige Rolle in der Lebensmittel- und Futtermittelproduktion insbesondere vor dem Hintergrund einer wachsenden Weltbevölkerung. Jedoch sind die globalen P-Reserven begrenzt und ein Großteil der P-Vorkommen reduziert sich auf wenige Länder. Daher ist eine sorgfältige Nutzung vorhandener P-Reserven und die Suche nach alternativen P-Düngern unvermeidlich, um regionale P-Kreisläufe zu schließen. Eine Möglichkeit, die Abhängigkeit von importierten P-Düngern zu minimieren, ist der Einsatz alternativer P-Recyclingdünger wie Dung, Gärreste, Kompost oder Biomasse-Asche. Diese Düngemittel wirken sich sowohl kurz- als auch langfristig auf verschiedene physikalische, chemische und biologische Bodenparameter aus und haben somit einen Einfluss auf die P-Verfügbarkeit im Pflanzenbau. Eine Langzeitbetrachtung unter Feldbedingungen ist unerlässlich, um aussagekräftige Beurteilungen über verschiedene Düngemittel tätigen zu können. Das Ziel dieser Arbeit bestand darin, die langfristigen Auswirkungen verschiedener P-Düngestrategien auf P-Pools im Boden und auf weitere Bodenparameter, die die P-Verfügbarkeit beeinflussen sowie auf Pflanzenparameter wie Ertrag und P-Aufnahme zu bewerten. Daher wurden Boden- und Pflanzenproben und Daten aus Vorjahren von drei Langzeit-P-Düngeversuchen in Deutschland (Freising, Rostock, Stavenhagen) mit P-Zufuhr aus verschiedenen organischen und anorganischen Quellen und unter verschiedenen Bewirtschaftungspraktiken analysiert. Der Versuch in Freising wurde im Jahr 1978 mit drei P-Stufen (Kontrolle ohne P, 21,8 kg P ha⁻¹, 43,6 kg P ha⁻¹), drei pH-Varianten (pH=5,0, pH=6,2, pH=6,5) und einer dreijährigen Fruchtfolge (Zuckerrüben, Winter-/Sommerweizen, Winter-/Sommergerste) etabliert. In Rostock wurde der Versuch im Jahr 1998 mit drei organischen (Kontrolle, Rinderdung, Kompost) und drei mineralischen (Kontrolle, TSP, Biomasse-Asche) Düngevarianten in Einzel- und Kombinationsanwendung und verschiedenen Sommer- und Winterkulturen sowie Mischkulturen (Mais-Bohne, Sorghum-Lupine) angelegt. Der Versuch am Standort Stavenhagen wurde im Jahr 2008 mit drei Düngevarianten (NK-Kontrolle, unvergorenes Inputsubstrat, Gärrest) in einer weiten Fruchtfolge (Zuckerrübe, Winterweizen, Winterroggen, Wintergerste, Winterraps, Winterweizen, Erbsen) etabliert. Bodenproben wurden hinsichtlich wasserlöslicher P-Gehalte (P_w), doppelaktatlöslicher /calciumacetat-laktatlöslicher P-Gehalte (DL-P/CAL-P), oxalatlöslicher Gehalte (P_{ox}, Alox, Feox), pH-Wert, organischem Kohlenstoff (C_{org}), mineralischer Stickstoff (N_{min}) sowie Enzymaktivitäten (Dehydrogenase, alkalische und saure Phosphatase) analysiert. Von den Pflanzenproben wurden der Ertrag und die Gehalte an P, N, K, Mg und Ca in der Biomasse ermittelt.

Die Gehalte an pflanzenverfügbarem P im Boden korrelierten nach langjähriger P-Düngung positiv mit den P-Budgets. Das zeigt, dass die P-Budgets ein geeignetes Instrument zur Vorhersage der Auswirkungen des P-Managements auf die pflanzenverfügbaren P-Pools im Boden sein können. Eine unterlassene P-Düngung führte zu einer Verringerung der pflanzenverfügbaren P-Gehalte im Boden, wobei keine lineare Abnahme, sondern deutliche jährliche Schwankungen festgestellt wurden. Wechselnde Umweltbedingungen (Niederschlags- oder Temperaturschwankungen), die einen direkten Einfluss auf mikrobielle Aktivitäten im Boden haben, P-Mobilisierungsprozesse durch Pflanzen, erhöhte P-Aufnahmen durch höhere Erträge,

Veränderungen des pH-Wertes und Mobilisierung aus dem Unterboden durch Leguminosen beeinflussten die P-Verfügbarkeit und sind somit mögliche Ursachen für die Schwankungen der pflanzenverfügbaren P Gehalte im Boden.

Die höchsten Gehalte an pflanzenverfügbarem P im Boden wurden nach langjähriger Düngung in den kombinierten Varianten mit organischer und mineralischer Düngung sowie in den Varianten mit höherem pH (6,5) und höherer TSP-Düngung festgestellt. Die Düngung mit Dung, Kompost und Biomasse-Aschen zeigte eine gleichwertige Ertragswirkung wie eine mineralische TSP-Düngung, wobei die höchsten Erträge in den kombinierten Varianten mit organischer und mineralischer Düngung vorzufinden waren. Eine gleichwertige P-Düngewirkung konnte bei der Düngung mit Gärresten im Vergleich zum unvergorenen Inputsubstrat festgestellt werden. Höhere Gehalte an pflanzenverfügbarem P im Unterboden nach der Gärrestdüngung zeigen, dass dem Unterboden eine größere Bedeutung beigemessen werden muss, um die Ressourceneffizienz der P-Düngung zu verbessern und die Gefahr der P-Auswaschung zu verringern.

Die Ernteerträge wurden nur teilweise von der P-Zufuhr beeinflusst. Dabei wurden Unterschiede in der Empfindlichkeit der Kulturen gegenüber der P-Zufuhr in folgender Reihenfolge festgestellt: Rüben > Mais > Sommergetreide > Wintergetreide. Der P-Bedarf der Pflanzen und ihr Potenzial zur effizienten P-Verwertung sollten bei Düngeempfehlungen und bei der Festlegung von Schwellenwerten für die P-Gehaltsklassen der Bodenuntersuchungen im Rahmen der P-Klassifikationssysteme berücksichtigt werden. Die Vorteile von Mischfruchtanbau (Mais-Bohne, Sorghum-Lupine) gegenüber Reinanbau von Mais oder Sorghum, zeigten sich in der Variante ohne P-Düngung mit höheren und stabileren Erträgen und P-Aufnahmen. Weiterhin wurden höhere Enzymaktivitäten im Boden unter Mais mit Bohne im Vergleich zu Mais allein vorgefunden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die untersuchten alternativen Düngemittel eine gleichwertige P-Düngewirkung erzielten wie konventionelle Mineraldünger und so eine vollständige Substitution für die getesteten Standorte möglich war, um eine ausreichende P-Versorgung der Pflanzen und optimale Erträge zu erreichen. Zudem hält der Einsatz von organischen Düngern und lokal anfallenden Biomasse-Aschen P in einem regionalen Kreislauf, und verringert so die Abhängigkeit von importierten P-Düngern. Saisonale Schwankungen konnten mit Hilfe der Langzeitbetrachtung beurteilt werden. Insbesondere im Hinblick auf klimatische Veränderungen und deren mögliche Auswirkungen auf Boden- und Pflanzenparameter ist eine Fortführung bestehender Langzeit-Feldversuche unerlässlich, um den Einfluss landwirtschaftlicher Bewirtschaftung zu optimieren.

Summary

As an essential nutrient, phosphorus (P) plays an important role in the nutrition of all organisms. However, global P reserves are limited and the majority of P deposits are restricted to a few countries. Therefore, careful use of existing P reserves and the search for alternative P fertilizers in P recycling is needed in order to close regional P cycles. One option is to use alternative P “waste products” such as manure, digestates, compost or biomass ash. These fertilizers have both a short-term and long-term effect on various physical, chemical and biological soil parameters and therefore have an influence on P availability for the crop plants. Consequently, long-term observation under field conditions is essential in order to make meaningful assessments of the various fertilizers. The aim of this work was to evaluate the long-term effects of different P fertilization strategies on P pools in the soil and on soil parameters that influence P availability, as well as on plant traits such as yield and P uptake. Therefore, soil and plant samples and data from previous years of three long-term P fertilization experiments in Germany (Freising, Rostock, Stavenhagen) with P supply from different organic and inorganic sources and under different management practices were analyzed. The experiment in Freising was established in 1978 with three P levels (control without P, 21.8 kg P ha⁻¹, 43.6 kg P ha⁻¹) and three pH variants (pH=5.0, pH=6.2, pH=6.5) and a three-year crop rotation (sugar beet, winter/summer wheat, winter/summer barley). In Rostock, the experiment was set up in 1998 with three organic (control, cattle manure, compost) and three mineral (control, TSP, biomass ash) fertilizer variants in single and combined application and different summer and winter crops as well as mixed crops (maize-bean, sorghum-lupine). The experiment at the Stavenhagen site was established in 2008 with three fertilizer variants (NK control, unfermented input substrate, digestate) in a wide crop rotation (sugar beet, winter wheat, winter rye, winter barley, winter rape, winter wheat, peas). Soil samples were analyzed for water-soluble P content (P_w), double lactate-soluble/calcium acetate-lactate-soluble P content (DL-P/CAL-P), oxalate-soluble content (P_{ox}, Alox, Feox), pH value, organic carbon (C_{org}), mineral nitrogen (N_{min}) and enzyme activity (dehydrogenase, alkaline and acid phosphatase). The yield and the contents of P, N, K, Mg and Ca were determined from the plant samples.

The levels of plant available P in the soil correlated positively with the P budgets after many years of P fertilization. This shows that the P budgets can be a suitable indicator for the effects of P management on the plant available P pools in the soil. Omitted P fertilization led to a reduction in the plant available P content in the soil, although no linear decrease was observed, but rather annual fluctuations over the years. Changing environmental conditions, such as heavy rainfall or temperature fluctuations, which have a direct influence on microbial activities in the soil, P mobilization by plants, increased P uptake in the course of higher yields, changes in the pH value and mobilization processes from the subsoil by legumes influence P availability and are thus controls of fluctuation in the plant available P contents in soil. The highest levels of plant available P in the soil were found after long-term fertilization in the combined variants with organic and mineral fertilization as well as in the variants with high pH (6.5) and higher TSP fertilization (annually 43.6 kg P ha⁻¹). Fertilization with manure,

compost and biomass ash showed an equivalent yield effect to mineral TSP fertilization, whereas the highest yields were found in the combined variants with organic and mineral fertilization. An equivalent P fertilizer effect was also observed for fertilization with digestates compared to the unfermented input substrate. Higher contents of plant available P in subsoil after digestate application indicates that subsoils need to be considered to improve the resource efficiency of P fertilization and reduce the risk of P leaching. The experiments showed that crop yields were only partially dependent on the P supply. Differences in the sensitivity of the crops to P supply were found in the following order: beet > maize > spring cereals > winter cereals. The P requirements of the plants and their P use efficiency should be taken into account for fertilizer recommendations and determining threshold values for the P content classes of the soil. The advantages of mixed crop cultivation compared to sole cultivation of maize or sorghum were evident in the variant without P fertilization with higher and more stable yields and P uptake. Furthermore, higher soil enzyme activities were found under maize with bean compared to maize in sole cultivation.

In summary, alternative fertilizers investigated achieved an equivalent P fertilization effect as conventional mineral fertilizers and thus a complete substitution is possible for the tested sites in order to ensure a sufficient P supply for the plants and optimal yields. In addition, the use of organic fertilizers and locally produced biomass ashes keeps P in a regional cycle, thus reducing dependence on imported mineral P fertilizers. Seasonal fluctuations can be assessed with the help of long-term observation. Regarding climate change and the essential role of the agricultural management on the responsible properties a continuation of existing long-term field trials is essential to control the agricultural effects on nutrient cycling and climate change.