

Pflanzenverfügbarkeit der Phosphatvorräte ackerbaulich genutzter Böden

-Langfristige Feldversuche zur Nutzbarkeit des Bodenphosphors und zur Bewertung der Bodenuntersuchung -

Albrecht Jungk¹⁾, Norbert Claassen²⁾, Volker Schulz¹⁾, Joachim Wendt³⁾

¹⁾ Institut für Agrikulturchemie der Georg-August-Universität, von Siebold-Str. 6, D-37075 Göttingen

²⁾ jetzt: Institut für Pflanzenernährung der TU München, D-85350 Freising-Weihenstephan

³⁾ D-27318 Hilgermissen, OT Oberboien

Angenommen: 12. Februar 1993

Zusammenfassung - Summary

Es wird die Frage behandelt, in welchem Maße die in landwirtschaftlich genutzten Böden heute vorhandenen, meist durch frühere Düngung angereicherten Phosphatvorräte pflanzenverfügbar sind, inwieweit sie durch ackerbauliche Nutzung abgebaut werden können und welche P-Gehalte im Boden für die Ertragsbildung notwendig sind. Hierzu wird über langfristige Feldversuche auf Parabraunerden von pH 6,8 - 7,4 im süd-niedersächsischen Lößgebiet berichtet, die seit 1977 in Ackerbaubetrieben auf Großparzellen ohne Wiederholung mit jährlichen P-Gaben von 0, 45, 90, 135 und 180 kg P₂O₅/ha in Form von Triplephosphat im Gang sind. Die übrigen Düngergaben und die Bewirtschaftung erfolgten praxisüblich.

Die Erträge - Wintergetreide und Zuckerrüben - wurden durch P-Düngung im Mittel von 15 Versuchsjahren trotz hoher Ernten nur bis zu 2 % gesteigert. Kleinparzellenversuche mit vier Wiederholungen, die nach neun Jahren, nachdem sich die P-Gehalte des Bodens differenziert hatten, in die Großparzellen hineingelegt wurden, bestätigten das Ergebnis. Hiermit in Einklang lagen die P-Gehalte der Pflanzen auch ohne P-Düngung in dem Bereich, der als ausreichend gilt. Die Pflanzen haben ihren P-Bedarf demnach ohne Ertragseinbuße aus dem P-Vorrat der Böden gedeckt.

Die P-Gehalte der Böden, P(H₂O) nach *Sissingh*, sanken ohne P-Düngung in den 15 Jahren deutlich ab, bei P-Düngung in Höhe der P-Abfuhr blieben sie annähernd konstant, sie stiegen an, wenn die P-Gabe den Entzug überstieg. Auf einem weiteren Standort mit anfänglich nur 4 mg P/L Boden lag deutlicher P-Mangel vor. Der Höchstertag wurde hier nach Aufdüngung auf 11 mg P(H₂O)/L erzielt.

Aus den Ergebnissen wird der Schluß gezogen, daß die oft hohen P-Vorräte dieser Böden durch Ackerkulturen auf etwa 10 mg P/L zurückgeführt werden können. Dabei wird für die Praxis empfohlen, die P-Düngung, soweit sie erforderlich ist, in der Rotation auf Hackfrüchte zu beschränken, weil sie auf P-Mangel stärker als Getreide reagieren.

Availability of Phosphate Reserves in Arable Soils

- Long Term Field Experiments for Assessing Soil P Reserves and Critical Soil Test Values -

The objective of this work is to quantify the plant availability of soil P reserves accumulated by former fertilizer applications, the possibility of utilizing them by arable field crops and to determine critical soil test values. For this purpose several long term field experiments with large plots without replicates were initiated in 1977 on luvisols from loess (pH 6.8 - 7.4) in Lower Saxony with a sugar beet - winter wheat - winter barley/winter wheat crop rotation. Annual P applications were 0, 45, 90, 135 and 180 kg P₂O₅/ha as triple phosphate. Application of other fertilizers and plot management were according to farmer's practice.

Despite of high yield levels phosphate response of plants was only 2 % at its maximum in the average of all crops in 15 years. This was confirmed by small plot experiments with four replicates placed into the large plots after 9 years, when soil P levels had been differentiated under the influence of plant P removal and P application. Herewith in agreement, shoot P concentration was found within the range generally regarded sufficient. It is therefore concluded that plant P demand has been fully satisfied by soil P reserves.

Soil P test values, monitored by the P(H₂O) method of *Sissingh*, decreased markedly in 15 years, when no P was applied, they remained approximately constant when P application was equal to P removal and they increased when P addition was higher than P removal. Plants on a site with 4 mg P(H₂O)/L initially had severe P deficiency. Maximum yield was obtained when the soil P level was raised to 11 mg P(H₂O)/L.

It is concluded that P reserves, which are often high in German arable soils, can be utilized by field crops and thus be lowered to about 10 mg P(H₂O)/L by reducing or omitting P dressings. For practical purposes it is suggested to restrict P application, if necessary at all, to the sugar beet crop in the rotation because they often respond more than small grain.

Einleitung

Der Einfluß des Phosphat(P)-Gehaltes im Boden auf die Wirkung der P-Düngung ist wiederholt untersucht worden (*Finger*, 1965, 1966; *Vetter und Fruchtenicht*, 1975; *Köhn-*

lein, 1976; *Munk*, 1975, 1985; *Sturm und Isermann*, 1978; *Schachtschabel und Köster*, 1985; *Munk und Rex*, 1990; *Baumgärtel*, 1989). Dennoch ist das Thema bis heute umstritten. Mit dem Argument, daß Düngerphosphat durch "Alterung" im Boden festgelegt wird (*Werner und Wiech-*

mann, 1972) oder daß der im Boden erforderliche P-Gehalt mit dem Ertragsniveau steigt (Munk, 1985), sind in der Landwirtschaft P-Gaben empfohlen und verabreicht worden, die in der Vergangenheit oft höher als die P-Abfuhr im Erntegut waren (Köster et al., 1988; Witter, 1988). Auch die P-Rückführung durch Ernterückstände und Wirtschaftsdünger blieb vielfach unbeachtet. Daher sind die Bodenvorräte mit der Zeit angestiegen. Nach dem auf Bodenuntersuchung basierenden Bewertungsschema des VDLUFA sind heute mehr als zwei Drittel der landwirtschaftlich genutzten Böden den Gehaltsklassen C, D und E zuzuordnen, d.h. ihre P-Gehalte gelten als optimal oder unnötig hoch (Wiechens, 1980).

Der durch die Lactat- (DL, CAL) und die $P(H_2O)$ -Methode ermittelte P-Gehalt des Bodens dient der Officialberatung als Kriterium für die P-Düngungshöhe. Die Grenzwerte für die Einstufung der P-Gehalte sind daher von großer praktischer Bedeutung. Die Landwirtschaftskammer (LK) Hannover hat als Gehaltsklasse C, d.h. als anzustrebenden Bereich, 11 bis 18 mg $P(H_2O)/L$ Boden festgelegt (LK, 1984). Dies steht in Einklang mit der Auswertung zahlreicher Feldversuche durch Köster und Schachtschabel (1983), aus der hervorgeht, daß oberhalb von 10 mg keine deutliche Ertragswirkung der P-Düngung, insbesondere keine Beziehung zum P-Gehalt besteht. Unter 10 mg nimmt die P-Wirkung mit Abnahme des P-Gehalts zwar im Durchschnitt zu, es gibt jedoch große Unterschiede zwischen den Standorten, d.h. im Bereich von 5 - 10 mg reagiert der Ertrag in vielen Fällen nicht, in anderen Fällen dagegen stark auf P-Düngung. Eine Präzisierung der Aussage von Bodenuntersuchungen ist durch Einbeziehung von Standortfaktoren versucht worden (Vetter und Früchtenicht, 1975; Munk, 1985). Eine allgemein akzeptierte Quantifizierung des Einflusses dieser Faktoren auf die P-Verfügbarkeit ist bisher jedoch nicht gelungen.

Neuere Resultate von Baumgärtel (1989) aus ein- bis dreijährigen Feldversuchen auf niedersächsischen Lössböden zeigen im gesamten Bereich von 5 bis 38 mg $P(H_2O)/kg$ Boden nur eine geringe P-Wirkung auf Zuckerrübe und Getreide und keine Abhängigkeit des Ertrags vom P-Gehalt der Böden. Dies läßt vermuten, daß die Böden (inzwischen) ausreichend mit P versorgt sind. Demgegenüber vertritt Munk (1985) aufgrund von Ergebnissen aus mehrjährigen Feldversuchen und Anwendung der Mitscherlich-Formel für die Ertragsbeschreibung die Auffassung, daß ertragreiche Ackerböden etwa 27 mg $P_2O_5/100$ g Boden (CAL-Methode) enthalten müssen, um mit einer P-Düngung in Höhe des P-Entzugs das ökonomische Optimum zu erzielen. Dieser Wert ist von Munk und Rex (1990) für die CAL- und die $P(H_2O)$ -Methode bei „Basis“-Düngung auf 20 mg zurückgenommen worden. (Es sei erwähnt, daß die Lactatwerte in mg $P_2O_5/100$ g Boden im Mittel etwa so groß sind wie die $P(H_2O)$ -Werte in mg P/L (Baumgärtel, 1988, S. 46)).

Ökonomische Zwänge des Landwirts und ökologische Sensibilität der Öffentlichkeit forcieren die Tendenz, Dün-

gemittel einzusparen, ohne Ertrag zu verlieren. Die Anwendung dieses Grundsatzes erfordert vor allem Kenntnisse über die Wirkung der P-Vorräte im Boden auf die P-Versorgung der Pflanzen. Um dazu einen Beitrag zu leisten, befassen wir uns mit der Frage, in welchem Maße die heute in den Ackerböden vorhandenen P-Vorräte genutzt, inwieweit sie ohne Ertragseinbuße auf niedrigere Werte zurückgeführt werden können und ob die Richtwerte der Bodenuntersuchung auch in Phasen der Abreicherung als Kriterium der P-Versorgung von Ackerfrüchten geeignet sind. Außerdem soll untersucht werden, ob eine P-Düngung in Höhe des P-Entzugs vom Acker ausreicht, um den durch Bodenuntersuchung angezeigten Wert zu erhalten.

Material und Methoden

Bei der Wahl der Methodik war anzunehmen, daß die Wirkung der P-Düngung vom Standort, der Jahreswitterung und der Pflanzenart abhängt. Um diesen Einflüssen Rechnung zu tragen, erschieben die Feldversuch mit gestaffelten P-Gaben in einer Dauer von mehreren Fruchtfolgen das zweckmäßige Verfahren, und die Messung der P-Düngewirkung am Ertrag und der P-Aufnahme der Pflanzen in Beziehung zum P-Gehalt der Böden.

Versuchsanlage

Großparzellenversuche: Um die Wirkung der P-Düngung unter praxisnahen Bedingungen zu erfassen, wurden in Niedersachsen im Jahr 1977 an den Standorten Börby (bei Hameln), Broistedt (bei Salzgitter) und Dorstadt (bei Braunschweig) auf tiefgründigen Lössböden statische Felddüngungsversuche begonnen. Sie umfassen fünf Versuchsglieder (VG) mit jährlichen Triple-Phosphat-Gaben von je

0 - 45 - 90 - 135 - 180 kg P_2O_5/ha ,

im folgenden kurz als P-0, P-45 usw. bezeichnet. Es wurden je fünf Großparzellen von je 24 x 100 m Größe ohne Wiederholung in Betrieben des Ackerbauberatungsringes Südhannover eingerichtet und -außer der P-Düngung - in betriebsüblicher Weise bewirtschaftet.

Die Versuchsflächen wurden in gleichmäßige Schläge gelegt (Abb. 1). Ihre Auswahl erfolgte nach der Einheitlichkeit des Getreidebestandes, die durch Streifenbeerntung mit dem Mährescher im Jahr 1977 geprüft wurde. Die Fruchtfolge bestand aus Zuckerrübe-Winterweizen-Winterweizen oder Wintergerste. Stroh und Rübenblatt verblieben auf dem Feld. Die N- und K-Düngung erfolgte nach den Empfehlungen der LK Hannover (1984). Pflanzenschutzmaßnahmen wurden auf den Versuchsflächen einheitlich nach Einschätzung der Landwirte vorgenommen. Der Getreideertrag wurde mit dem Mährescher durch Herausmähen eines Längs-Streifens aus jeder Parzelle und Wägung des Kornes erfaßt. Zuckerrüben wurden auf vier Teilstücken von 10 m² pro Versuchsglied von Hand gerodet. Reinigung, Wägung und Qualitätsanalyse dieser Teilmengen wurden vom Institut für Zuckerrübenforschung, Göttingen, vorgenommen.

Im Jahr 1984 kamen zwei weitere Versuche auf den niedersächsischen Staatsdomänen Derneburg (bei Hildesheim) und Isenhagen (bei Wittingen) hinzu. Bei gleicher Methodik wurde lediglich das VG mit 135 kg P_2O_5/ha ausgelassen. Ein weiterer Versuch wurde 1985 auf einem Boden mit deut-

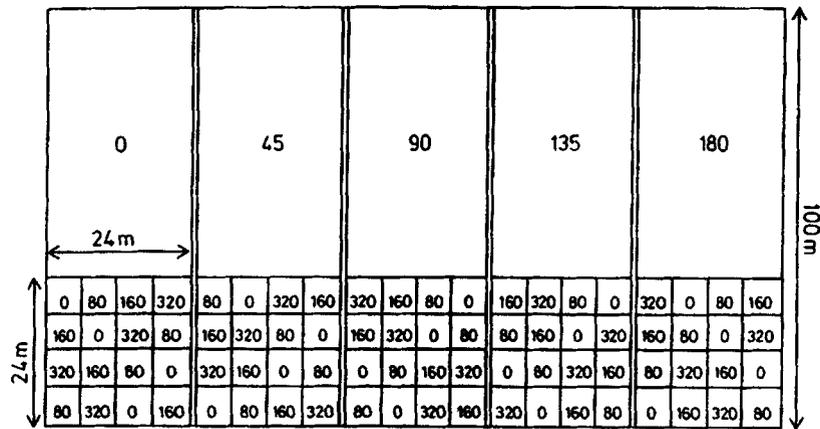


Abbildung 1: Lageplan von Groß- und Kleinparzellen der Langzeit-Felddüngungsversuche Börry, Dorstadt und Broistedt. Düngergaben in $\text{kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$. Die Kleinparzellen wurden nach 9-jähriger Versuchszeit in die Großparzellenversuche gelegt.
Figure 1: Design of long-term field experiments in Börry, Dorstadt and Broistedt. Fertilizer application in $\text{kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$. Small plots were placed into the large-plot experiment after 9 years.

lich ausgeprägtem P-Mangel in Dinklar (bei Hildesheim) angelegt. In diesem Fall wurde nur einmalig eine gestaffelte P-Gabe von

0 - 50 - 100 - 200 - 500 - 1000 $\text{kg P}_2\text{O}_5/\text{ha}$

verabreicht und deren Wirkung über mehrere Jahre verfolgt.

Kleinparzellenversuche: Nachdem durch P-Düngung und P-Entzug im Verlauf mehrerer Versuchsjahre eine Differenzierung des P-Gehaltes der Böden eingetreten war, wurden zur genaueren Erfassung der P-Wirkung Kleinparzellenversuche mit erneut gestaffelter P-Düngung in die Großparzellen hineingelegt. Damit sollte insbesondere geprüft werden, welche Wirkung eine frische P-Düngung auf den bis dahin mehr oder weniger ausgehagerten Flächen im Vergleich zu dem im Boden über längere Zeit angereicherten, evtl. gealterten Phosphat hat. Diese Versuche wurden in Börry, Broistedt und Dorstadt nach neun Versuchsjahren angelegt. Die P-Düngung erfolgte zweimalig, im Herbst 1986 und 1987, mit Triple-Phosphat in Gaben entsprechend

0 - 80 - 160 - 320 $\text{kg P}_2\text{O}_5/\text{ha} \cdot \text{a}$.

Die Parzellen von 6 x 6 m Größe wurden mit vier Wiederholungen in Form des Lateinischen Quadrats auf jeder Großparzelle gemäß Abb. 1 angeordnet und mit einem Parzellenmähdrescher bzw. durch Handrodung beemtet.

Weitere Einzelheiten sind bei *Wendt* (1991) angegeben.

Standortbeschreibung

Die Standorte liegen im niedersächsischen Lößgebiet. Es sind tiefgründige, fruchtbare Ackerböden. Wittingen liegt nördlich von Hannover im Gebiet der Sandböden. Einige analytische Kenngrößen sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Analysenmethoden

Die Bestimmung des Phosphatgehaltes der Böden erfolgte mit der $\text{P}(\text{H}_2\text{O})$ -Methode (*Sissingh*, 1971). Die Proben wurden durch Mischen und Sieben von je 16 einzelnen Bohrproben aus dem Oberboden (0 - 30 cm) gewonnen. Die P-Abfuhr vom Feld, die zur Bestimmung der P-Bilanz erforderlich ist, wurde aus der Menge an Erntegut und dessen P-Gehalt ermittelt. Zur P-Analyse diente die Vanadat-Molybdat-Methode nach nasser Veraschung.

Ergebnisse

Ertragsentwicklung von Winterweizen und Zuckerrübe auf Großparzellen

In Tabelle 2 sind die Mittelwerte aller Erträge der drei Versuche Börry, Dorstadt und Broistedt von 1978 bis 1992

Tabelle 1: Bodeneigenschaften (0 - 30 cm) und Niederschläge (langjähriges Mittel) der Versuchsstandorte

Table 1: Soil properties (0 - 30 cm) and average annual precipitation of the experimental sites

| Standort | Bodentyp | Bodenart | pH-Wert (CaCl_2) | Humus (%) | Korngrößenverteilung (%-Anteil) | | | | | Niederschlag (mm) |
|-----------|-------------------|----------|--------------------------------|--------------|---------------------------------|-------|------|-----|-----------------------|----------------------|
| | | | | | > 60 | 20-60 | 6-20 | 2-6 | < 2 (μm) | |
| Börry | Auen-Braunerde | tU | 6,9 | 2,22 | 5 | 44 | 24 | 7 | 20 | 747 ¹⁾ |
| Dorstadt | Löß-Braunerde | tU | 7,1 | 1,89 | 14 | 53 | 16 | 4 | 13 | 619 ²⁾ |
| Broistedt | Löß-Braunerde | tU | 7,0 | 1,89 | 2 | 56 | 23 | 5 | 14 | 619 ²⁾ |
| Wittingen | Braunerde-Podsol | IS | 5,8 | 2,41 | 64 | 19 | 8 | 1 | 8 | 620 ³⁾ |
| Dernburg | Parabraunerde | tU | 6,8 | 2,10 | 8 | 46 | 17 | 7 | 22 | 667 ⁴⁾ |
| Dinklar | degr. Schwarzerde | tU | 7,4 | 2,75 | 6 | 51 | 20 | 5 | 18 | 667 ⁴⁾ |

Wetterstationen ¹⁾ Hameln ²⁾ Braunschweig ³⁾ Hankensbüttel ⁴⁾ Hildesheim

Tabelle 2: Wirkung der Phosphatdüngung auf den mittleren Relativvertrag von Getreide-Zuckerrübe-Fruchtfolgen in drei langfristigen Feldversuchen auf Lößböden. 1978 - 1992; P-0 = 100

Table 2: Effect of phosphate fertilizer application on the average relative yield of small grain-sugar beet rotations in three long term field experiments on luvisols from loess. 1978 - 1992; P-0 = 100

| Düngung kg P ₂ O ₅ · ha ⁻¹ · a ⁻¹ | Standorte | | |
|--|-----------|----------|-----------|
| | Börry | Dorstadt | Broistedt |
| 0 | 100 | 100 | 100 |
| 45 | 100 | 101 | 101 |
| 90 | 99 | 101 | 102 |
| 135 | 99 | 100 | 102 |
| 180 | 99 | 101 | 101 |
| GD _{5%} (Tukey) | 4,6 | 7,1 | 5,3 |
| Ernten (n) | 15 | 13 | 13 |

in Relativzahlen zusammengefaßt. Daraus geht hervor, daß die P-Düngung im Durchschnitt nur sehr wenig ertragswirksam geworden ist. Eine statistische Rechnung, in der die Erträge aus den verschiedenen Jahren auf gleicher Fläche als Wiederholung genommen wurden, zeigt, daß die P-Düngewirkung nicht signifikant war. Die hohe Grenzdifferenz in Dorstadt ist durch die hohe Streuung der Zuckerrübenerträge begründet.

In Abbildung 2 sind der Verlauf der Erträge der VG P-90 und P-180 über die Zeit, ebenfalls in Relativzahlen zu P-0 = 100, und außerdem die Absoluterträge der Versuchsglieder

ohne P-Düngung angegeben. Die letzteren zeigen mit 58 bis 111 dt/ha Getreide und 462 bis 731 dt/ha Zuckerrüben ein hohes, für das Gebiet typisches Ertragsniveau an. (Die VG P-45 und P-135 sind aus Gründen der Übersichtlichkeit ausgelassen worden. Sie liefern keine andere Information).

Es war erwartet worden, daß die Erträge der P-gedüngten VG nach Abbau des pflanzenverfügbaren P-Vorrats der Böden, früher oder später über die Erträge von P-0 dauerhaft ansteigen würden. Dies trifft bisher, also nach 15 Jahren, nicht zu; die Abweichungen liegen in der Regel innerhalb einer Grenze von circa 10 %. Eine systematische, als Trend erkennbare Phosphatdüngewirkung ist nicht eingetreten. Die Fehlstellen in Dorstadt sind 1979 durch Hagelschlag, 1982 durch Auswinterung begründet. In Broistedt war es in den Jahren 1979 und 1982 aus technischen Gründen nicht möglich, den Getreideertrag zu bestimmen.

Da Parallelfelder fehlen, ist in Großparzellen eine variationsstatistische Behandlung auf dem üblichen Wege nicht möglich. Um eine solche durchführen und damit genauer prüfen zu können, welche Wirkung frische P-Düngung nach mehrjähriger Ausbeutung des Bodenvorrats hat, wurde ein Kleinparzellenversuch mit vier Wiederholungen in jede der Großparzellen hineingelegt. Auf diese Weise ist in den Jahren 1987 und 1988 die P-Düngewirkung zusätzlich geprüft worden.

Aus Platzgründen werden nur die Ergebnisse der ursprünglichen P-0-Varianten mitgeteilt. Man erkennt

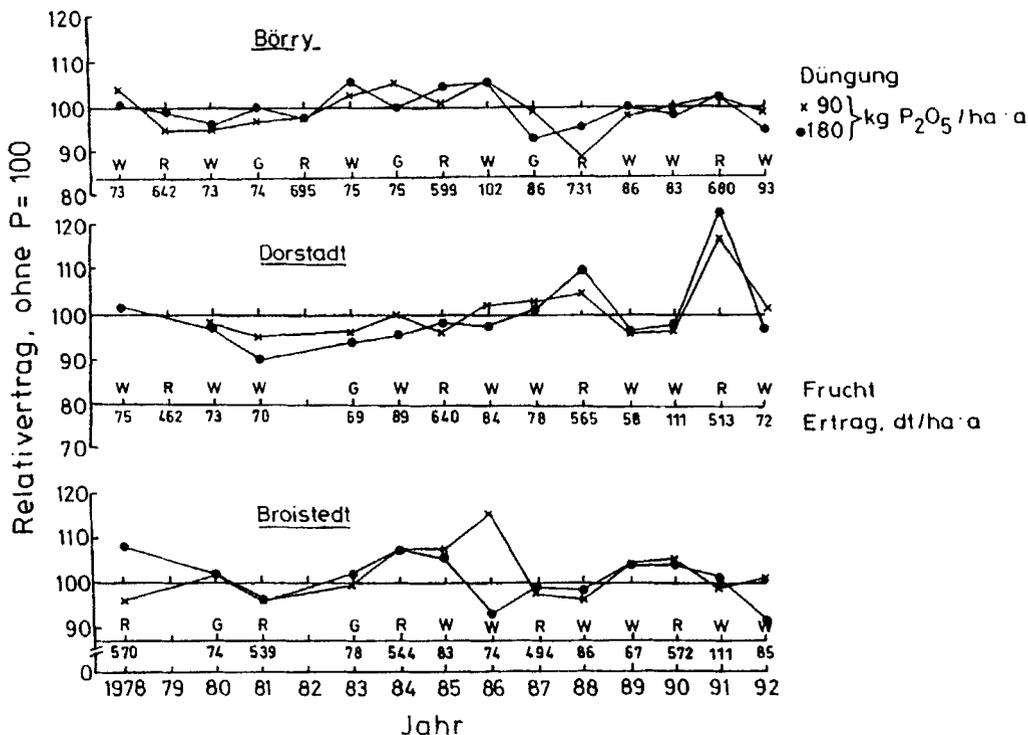


Abbildung 2: Wirkung der P-Düngung auf den Kornertrag von Getreide und den Rübenantrag von Zuckerrübe auf 3 Lößböden in Niedersachsen im Zeitablauf; ohne P-Düngung = 100; W = Winterweizen, G = Wintergerste; R = Zuckerrübe (Großparzellenversuche).

Figure 2: Influence of P application on grain yield of wheat and barley and root yield of sugar beet on luvisols from loess in Lower Saxony in the course of time; without P application = 100; W = Winter wheat; G = Winter barley, R = Sugar beet (large-plot experiments).

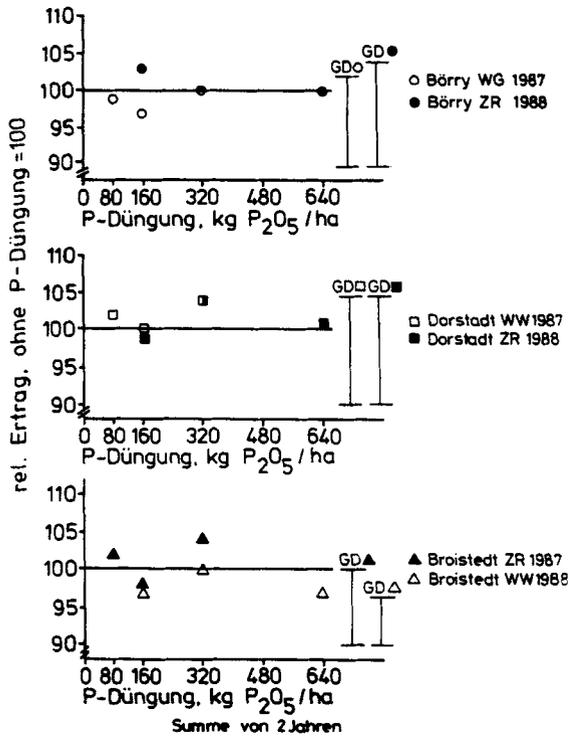


Abbildung 3: Wirkung der P-Düngung auf den Kornertrag von Getreide und den Rübenantrag von Zuckerrübe auf Lößböden in Niedersachsen nach zehnjähriger unterlassener P-Düngung (Kleinparzellenversuche).

Figure 3: Fertilizer P-response of wheat, barley (grain) and sugar beet (roots) on luvisols from loess in Lower Saxony after ten years without P application (small-plot experiments).

(Abb. 3), daß die P-Anwendung den Ertrag auch nach 10-jähriger Unterbrechung der P-Düngung weder bei Winterweizen noch bei Zuckerrübe signifikant beeinflusst hat.

P-Gehalt der Pflanzen

Der P-Gehalt der Pflanzen, der in den Jahren 1990 und 1991 bei Winterweizen zum Schossen und bei Zuckerrübe im Stadium des Reihenschlusses im Großparzellenversuch bestimmt worden ist (Tab. 3), zeigt die Wirkung der P-Düngung in allen Fällen deutlich an. Die von Finck (1992) und Podlesak (1988) angegebene Konzentrationsspanne ausreichender P-Versorgung ist jedoch in keinem Fall unterschritten worden. Dies gilt insbesondere auch für Zuckerrübe 1991 des VG P-0 in Dorstadt. Die abweichende Ertrags-höhe dieses VG (Abb. 2) ist demnach nicht durch P-Mangel zu erklären.

Verlauf des P-Gehaltes der Böden

Der Trend des P-Gehaltes der Böden folgte in der Versuchszeit im Prinzip der P-Bilanz. Wie Abb. 4 zeigt, nahmen die P(H₂O)-Werte nach einer etwa vierjährigen Phase mit unklarem Verlauf deutlich ab, wenn kein Phosphat gedüngt wurde. Die Werte blieben dagegen ungefähr auf der anfänglichen Höhe, wenn die P-Düngung etwa der P-

Tabelle 3: Wirkung der P-Düngung auf den P-Gehalt des Sprosses von Winterweizen und Zuckerrübe auf drei Löß-Standorten nach 14jährigem Feldversuch (% P i.d. TS; Großparzellenversuche)

Table 3: P concentration of winter wheat and sugar beet plants after 14 years application of different fertilizer P levels on three luvisols from loess (% P in dry matter; large plot experiments)

| P-Düngung kg P ₂ O ₅ · ha ⁻¹ · a ⁻¹ | Börny | Dorstadt | Broistedt |
|--|-------|----------|-----------|
| W-Weizen (Schossen; DC 30/31) | | | |
| | 1990 | 1990 | 1991 |
| 0 | 0,38 | 0,33 | 0,35 |
| 45 | 0,39 | 0,34 | 0,39 |
| 90 | 0,44 | 0,35 | 0,42 |
| 135 | 0,42 | 0,35 | 0,43 |
| 180 | 0,42 | 0,35 | 0,43 |
| Z-Rübe (Reihenschluß; DC 42/43) | | | |
| | 1991 | 1991 | 1990 |
| 0 | 0,30 | 0,42 | 0,39 |
| 45 | 0,32 | 0,55 | 0,46 |
| 90 | 0,32 | 0,57 | 0,44 |
| 135 | 0,36 | 0,58 | 0,48 |
| 180 | 0,43 | 0,64 | 0,53 |

ausreichender P-Gehalt nach Finck (1992) und Podlesak (1988): W-Weizen: 0,25 - 0,50 %; Z-Rübe: 0,30 - 0,60 %.

Abfuhr im Erntegut glich, d.h. bei 90 kg P₂O₅/ha. Sie stiegen an, wenn die P-Düngung, wie bei P-180, weit über der P-Abfuhr lag. Die Entwicklung verlief jedoch nicht gleichmäßig, d.h. Phasen mehrjährig regelmäßiger Änderung wechselten, trotz gleichbleibender Versuchsdurchführung, mit Phasen der Stagnation des wasserlöslichen P-Gehalts im Boden ab. Dies war im VG P-0 besonders augenfällig. Trotz jährlicher P-Abfuhr von etwa 80 kg P₂O₅/ha blieben die P(H₂O)-Werte in Dorstadt und Broistedt von 1986 bis 1992 fast unverändert.

Beziehungen zwischen dem P-Gehalt der Böden und der P-Düngewirkung

Der Abbau der P-Vorräte der Böden hat den Pflanzenertrag bisher nicht beeinträchtigt, wie der Vergleich von Abb. 2 und Abb. 4 erkennen läßt. In Börny hat selbst die Rücknahme bis auf 8 mg P/L Boden, also bis in die Gehaltsklasse B, noch den vollen Ertrag ermöglicht. In Dorstadt gilt dies - zumindest für Getreide - bis herab zu 12 mg P/kg Boden. In Broistedt ist ein Abbau von 35 auf etwa 20 mg P/kg Boden erfolgt. Da keine Ertragswirkung vorliegt, kann für diese Böden kein Grenzwert bestimmt werden.

Dies war nur auf dem Standort Dinklar möglich, bei dem der Ertrag in mehreren Jahren durch P-Düngung deutlich gestiegen war. Eine Bestimmung des P-Grenzwertes im Boden ist in diesem Fall durch Aufdüngung angestrebt worden. Durch die einmalig verabreichte, bis zu 1000 kg

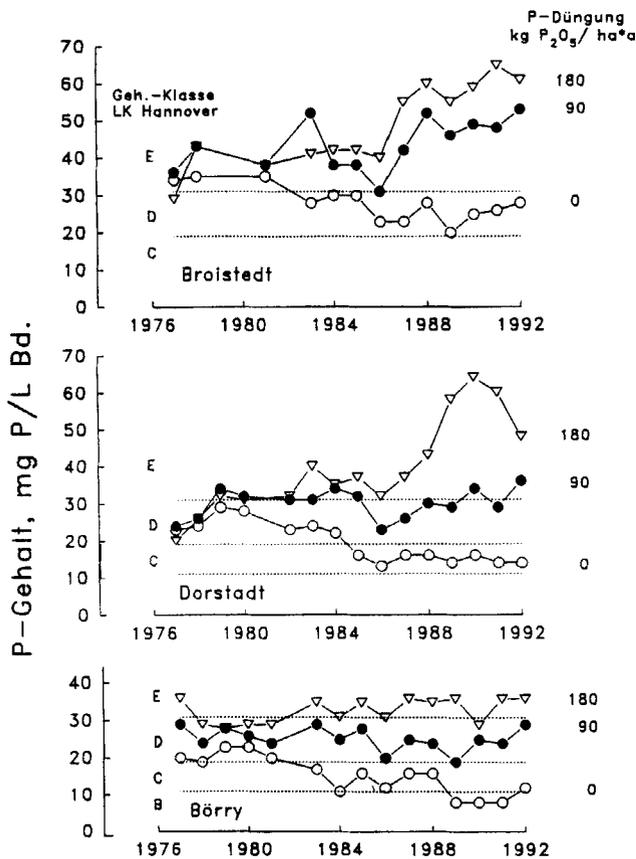


Abbildung 4: Verlauf der P(H₂O)-Gehalte von 3 Lößböden in Ackerkultur bei P-Düngung von 0; 90 und 180 kg P₂O₅ · ha⁻¹ · a⁻¹ (Großparzellenversuche).
Figure 4: Effect of P application on soil P(H₂O) content of 3 luvisols from loess in the course of time. P levels: 0; 90 and 180 kg P₂O₅ · ha⁻¹ · a⁻¹ (large-plot experiments).

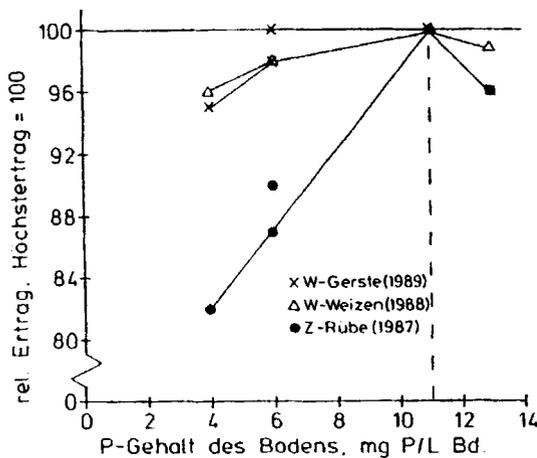


Abbildung 5: Wirkung des P(H₂O)-Gehaltes des Bodens nach einmaliger P-Düngung 1985 auf den Relativertrag von Getreide und Zuckerrübe (Korn und Rübe) im Großparzellenversuch Dinklar.
Figure 5: Effect of soil P(H₂O) content modified by P applications once in 1985 on the yield of winter wheat, winter barley and sugar beet (field experiment Dinklar; grain and roots).

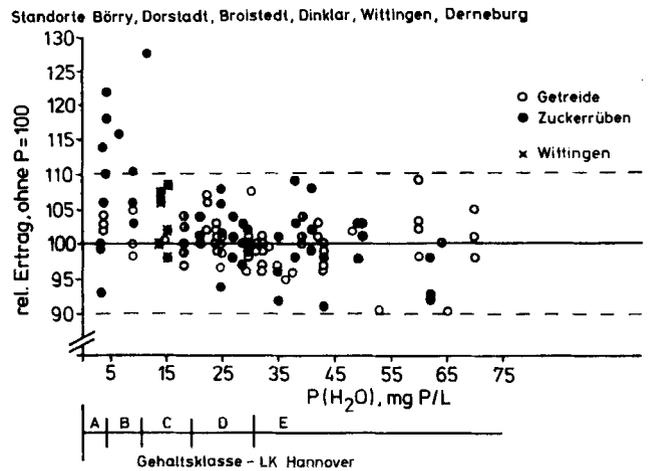


Abbildung 6: Wirkung der P-Düngung auf den Relativertrag von Getreide und Zuckerrübe in Beziehung zum P(H₂O)-Gehalt der Böden.
Figure 6: Fertilizer P response of winter wheat, winter barley and sugar beet as related to soil P(H₂O) level.

P₂O₅/ha gestaffelte P-Düngung ist der P-Gehalt von 4 bis auf 13 mg P(H₂O)/L Boden angestiegen. In den drei Vegetationsperioden 1987 bis 1989 ist nach Abb. 5 ohne P-Düngung eine ErtragseinbuÙe bei Winterweizen um 4 %, bei Wintergerste um 5 % und bei Zuckerrübe um 18 % der auf 11 mg P aufgedüngten Variante eingetreten. Der Wert von 11 mg P/L bildet die Grenze der Gehaltsklassen B und C der LK Hannover.

Setzt man die Relativ-Erträge aller Großparzellenversuche in Beziehung zum P-Gehalt der Böden (Abb. 6), so erkennt man, daß im Bereich von etwa 10 bis zu 70 mg P/L Boden kein Zusammenhang zwischen der P-Düngewirkung und P(H₂O) besteht. Auch der Standort Wittingen mit lehmigem Sandboden fügt sich in dieses Bild ein. Die Streuung der Werte nach oben ist in diesem Bereich insgesamt annähernd so groß wie die nach unten. Die Zahl der über 100 liegenden Ertragswerte ist jedoch etwas größer als die der darunter liegenden. Dies deutet eine kleine Düngewirkung an. Über die Grenze von 10 %, die sich hier als Streuungsgrenze der Erträge im Großparzellenversuch zeigt, geht der Mehrertrag durch P-Düngung nur bei Zuckerrübe hinaus, wenn der P-Gehalt des Bodens unter 12 mg P(H₂O) liegt. Auch die Zahl der MeÙpunkte, die sich unter der 100-Linie befinden, ist in diesem Bereich kleiner als bei höheren Werten. Nur unter 12 mg P(H₂O) liegt demnach eine konzentrationsabhängige P-Düngewirkung vor, die mit Abnahme von P(H₂O) im Boden zunimmt.

Veränderung des P-Gehaltes der Böden in Beziehung zur P-Bilanz

Um abzuschätzen, welche Mengen an pflanzenverfügbarem P durch die P-Konzentration des Bodens repräsentiert werden, wurde die Änderung von P(H₂O) in der Versuchszeit, also ΔP(H₂O), mit der P-Bilanz, d.h. der Differenz zwischen der P-Düngung und der im Erntegut vom Feld

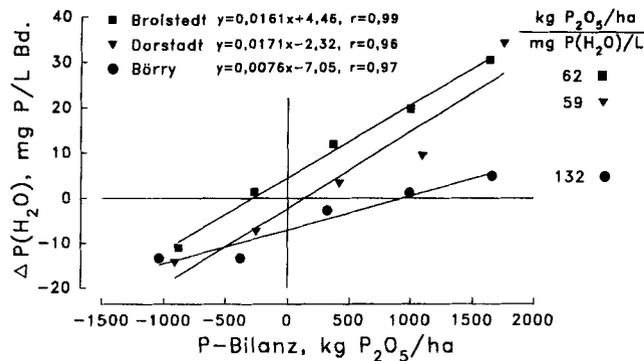


Abbildung 7: Veränderung des $P(H_2O)$ -Gehalts der Böden in Beziehung zur P-Bilanz von 3 Feldversuchen nach 15 Jahren.

Figure 7: Change of soil $P(H_2O)$ in relation to the phosphorus balance of 3 fertilizer field experiments after 15 years cropping.

abgeführten P-Menge, in Beziehung gesetzt. Um dabei den Einfluß der Streuung einzuengen, wurde die Beziehung zwischen $P(H_2O)$ und den Versuchsjahren (Abb. 4) als lineare Regression errechnet und aus den Endpunkten dieser Linien $\Delta P(H_2O)$ ermittelt. So ergab sich für jedes VG ein $\Delta P(H_2O)$ und ein P-Bilanzwert über 15 Jahre, die in Abb. 7 in Beziehung gesetzt werden. Man erkennt, daß sich die Meßpunkte weitgehend im ersten und dritten Quadranten befinden. Eine positive P-Bilanz, d.h. eine Netto-P-Zufuhr, wird demnach durch die Zunahme, eine negative P-Bilanz durch die Abnahme des $P(H_2O)$ -Wertes der Böden angezeigt.

Diskussion und Folgerungen

Die Ergebnisse zeigen, daß der Ertrag von Getreide und Zuckerrübe auf drei lößbürtigen Lehmböden in 15-jährigen Feldversuchen nur sehr wenig auf Phosphatdüngung reagiert hat.

Die Methode des Großparzellenversuchs hat es ermöglicht, die vorliegenden Ergebnisse unter praxisnahen Bedingungen über die Dauer von 15 Jahren zu erlangen. Sie hat jedoch den Nachteil, daß sie keine Information über die Streuung des Einzelertrags liefert, weil Parallelfelder fehlen. Man kann jedoch die nacheinanderfolgenden Ernten als eine Art Wiederholung ansehen. Ihre statistische Prüfung zeigt (Tab. 2), daß sich die Erträge durch P-Düngung im Mittel der 15 Jahre nicht signifikant differenziert haben. Die Ergebnisse der 2-jährigen Kleinparzellenversuche nach 10 Jahren bestätigen und präzisieren diesen Befund. Die Phosphatgehalte der Pflanzen lagen in der Schoßphase des Getreides bzw. bei Reihenschluß von Zuckerrüben auch ohne P-Düngung innerhalb des von Finck (1992) und Podlesak (1988) angegebenen Bereichs ausreichender P-Versorgung. Die Kombination dieser beiden Befunde läßt den

Schluß zu, daß sich die Pflanzen 15 Jahre aus dem Bodenvorrat ausreichend mit Phosphat versorgt haben.

Der P-Gehalt der Böden hat sich in der Versuchszeit im Wechselspiel von Düngung und Pflanzenentzug erheblich differenziert. Da sich die Erträge nicht signifikant unterscheiden, läßt sich kein Grenzwert bestimmen. Man kann jedoch schließen, daß auch die niedrigsten $P(H_2O)$ -Werte für den vollen Ertrag ausreichend waren, also 20 mg in Broistedt, 12 mg in Dorstadt und 8 mg in Börny. In Dorstadt wies P-0 im Jahr 1991 zwar erhebliche Ertragsminderungen bei Zuckerrübe auf. Der P-Gehalt der Blätter (Tab. 3) lag jedoch mit 0,42 % P deutlich über dem Ertragsgrenzwert von 0,30 % P nach Podlesak (1988). Die Einschätzung, daß kein P-Mangel vorlag, wird auch dadurch gestützt, das in Börny bei nur 0,30 und in Broistedt bei 0,39 % P eine Ertragsminderung nicht eingetreten war. Demnach ist - auch unter Einschluß dieses Falles - auf diesen Standorten ein Abbau der bodeneigenen, sicherlich durch frühere Düngergaben angereicherten Bodenvorräte zumindest bis auf 12 mg $P(H_2O)/L$ und z.T. noch niedrigere Werte ohne erheblichen Ertragsverlust möglich.

Am Standort Dinklar lag mit 4 mg $P(H_2O)/L$ deutlicher P-Mangel vor. Hier bestand die Möglichkeit, den Grenzwert durch Aufdüngung zu bestimmen. Wie Abb. 5 zeigt, trat der Höchstertrag bei 11 mg $P(H_2O)/L$ ein. Nach der Lage der Meßpunkte ist anzunehmen, daß dies dem Grenzwert für Zuckerrübe entspricht, während dieser für Getreide eher zwischen 6 und 10 mg anzunehmen ist.

Setzt man alle erhaltenen $P(H_2O)$ -Werte in Beziehung zum Ertrag, so bestätigt sich, daß nur unterhalb von 12 mg $P(H_2O)$ bei Zuckerrübe eine P-Düngewirkung aufgetreten ist, die die mittlere Streuung deutlich übersteigt. Dieses Ergebnis bestätigt die Düngungsempfehlungen der LK Hannover (1984), nach der die Gehaltsklasse C bei 11 mg $P(H_2O)/L$ beginnt.

Die Anwendbarkeit solcher Resultate für die Düngung hängt davon ab, inwieweit sie verallgemeinerungsfähig sind. Diese wichtige Frage soll anhand der Literatur geprüft werden. Nimmt man mit Baumgärtel (1988, S. 46) und Munk und Rex (1990) an, daß „mg $P(H_2O)/L$ “ im Mittel etwa gleich „mg $P_2O_5(CAL, DL)/100 g$ “ Boden ist, so kann auch die ältere Literatur einbezogen werden. In einer Zusammenstellung zahlreicher, ein breites Spektrum von Böden umfassender Feldversuche durch Köster und Schachtschabel (1983), sind deutliche Wirkungen der P-Düngung auf den Ertrag nur unterhalb 10 mg zu erkennen. Andererseits trat auf nicht wenigen Standorten keine P-Düngewirkung ein, obwohl die P-Gehalte des Bodens unter 10 mg lagen. Dies stimmt mit unseren Ergebnissen völlig überein.

Die langfristigen Versuche von Köhnlein (1976) wie auch die Ergebnisse von Finger (1965 und 1966) stehen mit diesen Resultaten ebenfalls gut in Einklang. Gegen sie ist eingewendet worden, sie seien nicht mehr anwendbar, weil das heutige Ertragsniveau höhere P-Gehalte im Boden erfordere. Der Einwand trifft offenbar aber nicht zu, möglicherwei-

se u.a. deswegen, weil Krumenvertiefungen, die in den letzten Jahrzehnten vorgenommen wurden, bei gleicher P-Konzentration eine Erhöhung der P-Menge bedeuten und dadurch ein größerer Teil des Wurzelsystems mit dem P-reichen Oberboden in Kontakt steht und so die P-Aufnahme gegenüber flacher gepflügten Böden begünstigt. Dies lassen insbesondere Ergebnisse aus jüngster Zeit von *Baumgärtel* (1989) erkennen, der auf zahlreichen niedersächsischen Lößböden selbst bis hinunter zu 5 mg P/kg Boden keine Beziehung zwischen $P(H_2O)$ und der Wirkung der P-Düngung auf den Ertrag von Zuckerrübe und Winterweizen fand. Dies gilt nach persönlicher Mitteilung von *Baumgärtel* in erstaunlich hohem Maße auch für sandige Böden im nördlichen Niedersachsen, wie derzeit laufende Versuche der LK Hannover ergeben haben.

Diese Befunde bestätigen insgesamt die Folgerung von *Vetter und Früchtenicht* (1975), daß die Grenze des P-Mangels nach Standorten verschieden sein kann. Die Unterschiede treten jedoch, wie die eigenen Ergebnisse und die der Literatur zeigen, im wesentlichen nur im Bereich unter 10 mg hervor. Die Notwendigkeit von P-Gehalten im Boden, die deutlich über 10 mg liegen, um das Ertragsniveau auszuschöpfen (*Munk*, 1975, 1985; *Munk und Rex*, 1990), ist nicht zu erkennen.

Folgt man dem Schluß, daß die hier vorgelegten Ergebnisse relativ breite Gültigkeit für Standorte Mitteleuropas haben, so zeigt die Bodenuntersuchung ausreichende P-Versorgung an, wenn die $P(H_2O)$ - und wohl auch die $P(CAL, DL)$ -Werte höher als etwa 10 mg sind. Die Gehaltsklasse C der LUFA ist mithin ein Bereich, der Ertragseinbußen ziemlich sicher ausschließt; er umfaßt sogar in vielen Fällen noch große Reserven. Unterhalb dieser Grenze ist die Aussage dagegen im Einzelfall unsicher. Man kann nur sagen, daß die Wahrscheinlichkeit von P-Mangel, bzw. einer positiven P-Düngewirkung, mit abnehmendem P-Gehalt des Bodens im Durchschnitt zunimmt. Für den Einzelfall ist keine Aussage möglich. In Deutschland ist dieser Bereich aber praktisch nur wenig relevant, weil die meisten Böden bereits höher versorgt sind (*Wiechens*, 1980).

Neben dieser konzentrationsabhängigen P-Düngewirkung tritt eine solche offenbar auch unabhängig vom P-Gehalt des Bodens ein, also auch bei hohen P-Gehalten. Sie ist so gering, daß man sie im Einzelversuch meist nicht nachweisen kann. Sie kommt darin zum Ausdruck, daß die Mittelwerte des Relativertrags bei *Köster und Schachtschabel* (1983) im Bereich $> 10 \text{ mg } P_2O_5/100 \text{ g Boden}$, wie auch hier in Abb. 6, geringfügig oberhalb der 100%-Linie liegen. Auch Daten von *Rathsack und Schachtschabel* (1963) zeigen sie. *Baumgärtel* (1989) hat den Effekt auf 3 % Ertragszuwachs bei Zuckerrübe und 0,1 % bei Getreide quantifiziert. Seine Ursache ist unbekannt. Es ist an Begleitstoffe zu denken, die in den P-Düngemitteln enthalten sind, aber auch an P-Wirkungen, die nur eine begrenzte Zeit, etwa in der frühen Jugendphase der Pflanzen, wirksam sind.

Für die Düngepraxis ist zu folgern: da dieser Effekt, wie

auch die konzentrationsabhängige P-Düngewirkung, bei Hackfrüchten stärker als bei Getreide auftritt (Abb. 6; s.a. *Finger*, 1965, 1966), erscheint es sinnvoll, die P-Düngung in der Fruchtfolge auf die Hackfrucht zu beschränken und das Getreide auszulassen. Das Risiko von Ertragseinbußen kann dadurch besonders bei niedrigen P-Gehalten im Boden weiter gemindert werden.

Vergleicht man die Pflanzenanalysen (Tab. 3) mit der Ertragsentwicklung, so ist der Schluß zu ziehen, daß die P-Gehalte der Pflanzen in keinem Fall dem Mangelbereich zuzuordnen sind. Dies gilt auch für den niedrigsten der Werte, 0,30 % P in den Zuckerrübenpflanzen von Börry P-0, 1991. Demnach werden die Ertragsgrenzwerte von *Finck* (1992) und *Podlesak* (1988) durch diese Untersuchung insoweit bestätigt. Die Diskrepanz zwischen der erheblichen Ertragswirkung, die in Dorstadt 1991 bei Zuckerrübe eingetreten war (Abb. 2) und dem relativ hohen P-Gehalt von 0,42 % im Sproß, hinterläßt jedoch eine Unsicherheit, die nur durch die Fortführung des Versuchs zu beheben ist.

Aus Abb. 7 ist ersichtlich, daß die Böden in der Versuchszeit bis zu 1000 kg P_2O_5/ha netto an die Pflanzen abgegeben haben. Dies zeigt in Verbindung mit der weitgehend fehlenden P-Düngewirkung, daß das früher angereicherte Phosphat (*Köster et al.*, 1988) sehr weitgehend pflanzenverfügbar geblieben ist. Die „Alterung“, d.h. der allmähliche Rückgang der P-Löslichkeit nach P-Düngung, den man im Labor leicht messen kann (*Werner und Wiechmann*, 1972; *Buhse*, 1992; S. 80), ist demnach in den Feldversuchen kaum ertragswirksam geworden. Dies wird durch Erkenntnisse aus jüngerer Zeit verständlich. So kann der wurzelnahe Boden in wenigen Tagen P-Mengen an die Pflanze abgeben, die bei Bezug auf das gesamte Bodenvolumen weit über 1000 kg P_2O_5/ha liegen können (*Hendriks et al.*, 1981; *Jungk und Claassen*, 1989). Die Extraktionswirkung der Pflanze ist demnach viel größer als die der $P(H_2O)$ -Methode. Die Pflanzen erfassen aber in einem Jahr nur einen Teil des Bodenvolumens, die übrigen Teile bleiben unausgeschöpft und stehen später zur Verfügung.

Aus Abb. 7 sind mehrere Informationen über den Phosphathaushalt der Standorte zu entnehmen. Die Linien unterscheiden sich in ihrer Steigung. Sie ist als Maß für die langfristige Phosphatpufferung unter Feldbedingungen aufzufassen. Dabei ist die P-Düngermenge bzw. die P-Abgabe des Bodens an die Pflanzen als Kapazitätsgröße und der $P(H_2O)$ -Wert als Intensitätsgröße anzusehen. Man erkennt an den in Abb. 7 genannten Zahlen, daß die Böden pro mg $P(H_2O)/L$ zwischen 59 (Dorstadt) und 132 kg P_2O_5/ha (Börry) an die Pflanzen abgegeben bzw. als P-Dünger für die Aufdüngung erfordert haben.

Die Linien unterscheiden sich auch in ihrer Lage im Koordinatenkreuz. Daran ist die Tendenz zur P-Festlegung bzw. Freisetzung zu erkennen. Hinsichtlich des VDLUFA-Konzeptes der Erhaltungsdüngung ist der Schnittpunkt der Linien mit der Ordinate, also das Interzept, von Interesse. Es zeigt an, wie sich der anfängliche $P(H_2O)$ -Wert verändert, wenn die Düngung dem Entzug gleicht. Man erkennt

(Abb. 7), daß in Broistedt (+ 4,46 mg P/L in 15 Jahren) eine Netto-Mobilisierung eingetreten ist. Ihre Ursache ist so zu deuten, daß dieser Boden - in der Nähe der Stahlwerke Salzgitter gelegen - reichlich mit Thomasphosphat gedüngt worden ist, welches langfristig P freisetzt. In Dorstadt ist das Interzept mit -2,32 gering. Die P-Düngung nach Entzug entspricht demnach in diesem Fall ziemlich genau der Erhaltungsdüngung. Dagegen liegt in Börry mit -7,05 mg P/L eine merkbare Abnahme des anfänglichen $P(H_2O)$ -Wertes vor. Der Grund liegt möglicherweise in dem höheren Feinanteil dieses Bodens (Tab. 1). Trotz Düngung nach Entzug hat der anfängliche Wert von etwa 25 mg P/L (Abb. 4) im Mittel um 0,5 mg pro Jahr abgenommen. Da die Regressionsgerade, die den Charakter einer „Pufferkurve“ besitzt, bei diesem Boden relativ flach verläuft, verbirgt sich hinter der Abnahme um 7 mg P eine P_2O_5 /ha-Menge von 1000 kg insgesamt bzw. 67 kg pro Jahr. Wollte man hier auf Erhaltung des anfänglichen $P(H_2O)$ -Wertes düngen, so wären P-Gaben in nahezu doppelter Höhe der P-Abfuhr nötig. Die P-Menge im Boden stiege weiter an, ohne daß dies am Bodenuntersuchungswert sichtbar würde.

Die Netto-Bindung von Phosphor, die hier erkennbar wird, ist so zu interpretieren, daß der $P(H_2O)$ -Wert zu Versuchsbeginn, ≈ 25 mg/L, nicht einer Gleichgewichtslage zwischen fester und mobiler Phase entspricht, so daß die Tendenz zur P-Festlegung, d.h. zum Übergang in nicht wasserlösliche Form überwiegt. Der Feldversuch hat jedoch ergeben, daß die Pflanzenverfügbarkeit ausreicht, d.h. die Festlegung mit hinreichender Geschwindigkeit reversibel ist. Wie Abb. 4 zeigt, sanken die $P(H_2O)$ -Werte in den Varianten P-0 bis 1985 deutlich ab, während sie sich danach - trotz etwa gleichbleibendem Pflanzenentzug - im Trend nur noch sehr langsam, in Dorstadt fast gar nicht veränderten. In dieser Phase hat demnach die P-Mobilisierung überwogen. Daraus ist der Schluß zu ziehen, daß eine Aufdüngung auf 25 mg/L $P(H_2O)$ in diesem Boden zur Festlegung („Alterung“) führt. Erhaltungsdüngung ist demnach nur dann sinnvoll, wenn sie einen löslichen P-Gehalt anstrebt, der nicht wesentlich über dem zur Ertragsbildung notwendigen liegt. Auch unter Berücksichtigung von oft ausgeprägten Sicherheits- und Vorsorgeüberlegungen der Landwirte halten wir allenfalls 15 mg $P(H_2O)$ /L für vertretbar; in den meisten Fällen genügt weniger. Der wirtschaftliche Vorteil des Landwirts und das Ziel der Umweltschonung gehen konform.

Wenn andererseits wirklich P-Mangel im Boden vorliegt, so erscheint es zweckmäßig, durch eine einmalige massive oder wenige hohe P-Gaben den löslichen P-Gehalt im Boden rasch zu erhöhen und damit sofort volle Erträge zu erzielen, anstatt ihn durch mehrere nur mäßig über den Entzug hinausgehende Gaben langsam aufzubauen. Diese Folgerung wird von Hagemann et al. (1972) nicht geteilt, obwohl ihre Ergebnisse z.T. in die gleiche Richtung weisen. Im Falle des Versuchs Dinklar waren 500 kg P_2O_5 /ha nötig, um dieses Ziel zu erreichen.

Danksagung

Die Versuche sind auf Anregung und mit Unterstützung von Herrn Dr. G. Golisch, Weetzen, Ackerbauberatungsring Südhannover, zustande gekommen. Die Herren Herweg, Broistedt; von Löbbecke, Dorstadt; Wollring, Börry, und Dierks, Dinklar haben Flächen zur Verfügung gestellt und die Versuche betreut. Das Niedersächsische Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten hat auf seinen Domänen Isenhagen und Derneburg die gleiche Hilfe gewährt und Geldmittel bewilligt. Das Institut für Zuckerrübenforschung, Göttingen, hat die Rüben untersucht. Für das Interesse an den Versuchen und alle Unterstützung übermitteln wir auf diesem Wege unseren besonderen Dank. Ebenso danken wir unseren früheren und heutigen wissenschaftlichen Mitarbeitern L. Hendriks, Chr. Hoffmann, J. Kaselowsky, R. Kuchenbuch, E. Ladewig, D. Meyer, R. Müller, B. Seeling und F. Wulff sowie den technischen Angestellten E. Schreiber und H. Schröder, S. Koch, S. Claus, B. Eichenberg und M. Jakobi für ihre Arbeit. Frau S. Bartsch sind wir für das Schreiben des Manuskriptes, Herrn PD Dr. W. Römer für dessen kritische Durchsicht verbunden.

Literatur

- Baumgärtel, G. (1988): Beurteilung der Phosphatversorgung von Lößböden in Südniedersachsen durch Düngungsversuche, Boden- und Pflanzenanalysen. Diss. Universität Hannover.
- Baumgärtel, G. (1989): Phosphat-Düngerbedarf von Getreide und Zuckerrüben im südniedersächsischen Lößgebiet. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 152, 447-452.
- Buhse, J. (1992): Wirkung der Wurzelraumtemperatur auf das Phosphataneignungsvermögen von Pflanzen und die Phosphatverfügbarkeit im Boden. Diss. Universität Göttingen.
- Finck, A. (1992): Dünger und Düngung. 2. Aufl. VCH-Verlagsgesellschaft, Weinheim.
- Finger, O. (1965): Mehrjährige und einjährige Düngungsversuche mit gesteigerten Gaben an Phosphorsäure und Kali zur Nachprüfung der Grenzwerte bei der chemischen Bodenuntersuchung. Landw. Forschung 18, 1-36.
- Finger, O. (1966): Mehrjährige und einjährige Düngungsversuche mit gesteigerten Gaben an Phosphorsäure und Kali zur Nachprüfung der Grenzwerte bei der chemischen Bodenuntersuchung. 2. Mitteilung. Landw. Forschung 19, 1-8.
- Hagemann, O., H. Ansorge und R. Jauert (1972): Möglichkeiten für eine Verbesserung des P-Versorgungszustandes der Böden durch hohe P-Gaben. Arch. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenk. 16, 329-339.
- Hendriks, L., N. Claassen und A. Jungk (1981): Phosphatverarmung des wurzelnahen Bodens und Phosphataufnahme von Mais und Raps. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 144, 486-499.
- Jungk, A. und N. Claassen (1989): Availability in soil and acquisition by plants as the basis for phosphorus and potassium supply to plants. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 152, 151-157.
- Köhnlein, J. (1976): Ergebnisse 14-jähriger Fruchtfolgedüngungsversuche mit Phosphat und Kalk auf jungdiluvialer Parabraunerde in Schleswig-Holstein. Bayerisches Landw. Jahrbuch 53, 594-637.
- Köster, W. und P. Schachtschabel (1983): Beziehung zwischen dem durch Phosphatdüngung erzielbaren Mehrertrag und dem Phosphatgehalt im Boden. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 146, 539-542.
- Köster, W., K. Severin, D. Möhring und H.-D. Ziebell (1988): Stickstoff-, Phosphor- und Kaliumbilanzen landwirtschaftlich genutzter Böden der Bundesrepublik Deutschland von 1950 - 1986. Landwirtschaftskammer Hannover, LUFA Hameln.

- Landwirtschaftskammer Hannover (LK)* (1984): Düngungsempfehlungen.
- Munk, H.* (1975): Zur Grenzwertfeststellung bei der Bodenuntersuchung im DL-, CAL- und H₂O-Auszug. *Landw. Forschung, Sonderheft 32/I*, 158-176.
- Munk, H.* (1985): Ermittlung wirtschaftlich optimaler Phosphatgaben auf Löß- und Geschiebelehm Böden auf der Basis der CAL-Methode. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 148, 193-213.
- Munk, H. und M. Rex* (1990): Zur Eichung von Bodenuntersuchungsmethoden auf Phosphat. *Agribiological Research* 43, 164-174.
- Podlesak, W.* (Hrsg.) (1988): *Agrochemische Untersuchung und Beurteilung von Böden und Pflanzen.* Verlag Agrabuch, Leipzig.
- Rathsack, K. und P. Schachtschabel* (1963): Beziehungen zwischen den Ergebnissen von Bodenuntersuchungen und der Wirkung einer P- und K-Düngung auf den Ertrag von Gemüse. *Gartenbauwiss.* 28, 1-18.
- Schachtschabel, P. und B. Beyme* (1980): Löslichkeit des anorganischen Bodenphosphors und Phosphatdüngung. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 143, 306-316.
- Schachtschabel, P. und W. Köster* (1985): Beziehung zwischen dem Phosphatgehalt im Boden und der optimalen Phosphatdüngung in langjährigen Feldversuchen. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 148, 459-464.
- Schüller, H.* (1969): Die CAL-Methode, eine neue Methode zur Bestimmung des pflanzenverfügbaren Phosphats in Böden. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 123, 48-63.
- Sissingh, H. A.* (1971): Analytical technique of the P_w method used for the assessment of the phosphate status of arable soils in the Netherlands. *Plant and Soil* 34, 483-486.
- Sturm, H. und K. Isermann* (1978): Überlegungen zur langfristigen Ausnutzung von Mineraldünger-Phosphat auf Ackerböden. *Landw. Forschung, Sonderheft 35, Kongreßband 1978*, 180-192.
- Vetter, H. und K. Früchtenicht* (1975): Wege zur Ermittlung des Düngersbedarfs mit größerer Treffsicherheit. 31/I. *Sonderheft Landw. Forsch.* 290-320.
- Wendt, J.* (1991): *Wirkung von Dünger- und Bodenphosphor auf die Phosphatversorgung von Ackerkulturen.* Diss. Universität Göttingen.
- Werner, W. und H. Wiechmann* (1972): Untersuchungen zur Pflanzenverfügbarkeit des durch langjährige Phosphatdüngung angereicherten Bodenphosphats. 3. Mitteilung: Die Verfügbarkeit der Umwandlungsprodukte in neutralen und kalkhaltigen Böden. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 133, 5-17.
- Wiechens, E.* (1980): Ergebnisse von Bodenuntersuchungen im Bundesgebiet von 1973 bis 1978 mit einem Überblick über die Entwicklung der Nährstoffversorgung der Böden seit 1950. *Landwirtsch. Forsch.* 33, 337-348.
- Witter, B.* (1988): Entwicklung des Kalkzustandes und der Nährstoffversorgung der Böden der DDR. *Tag.-Ber., Akad. Landwirtsch.-Wiss. DDR, Berlin* 267, 191-198. [P4926P]