

Aus dem Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde

**Ewald Schnug
Jutta Rogasik
Silvia Haneklaus**

**Die Ausnutzung von Phosphor aus Düngemitteln unter
besonderer Berücksichtigung des ökologischen
Landbaus**

Manuskript, zu finden in www.fal.de

Published in: Landbauforschung Völkenrode 53(2003)1, pp. 1-11

**Braunschweig
Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL)
2003**

Die Ausnutzung von Phosphor aus Düngemitteln unter besonderer Berücksichtigung des ökologischen Landbaus

Ewald Schnug, Jutta Rogasik und Silvia Haneklaus¹

in memoriam Prof. Dr. Armi Kaila, Helsinki

Zusammenfassung

Die Vorräte an Phosphor (P) werden als erste, nicht erneuerbare und nicht substituierbare Ressource der landwirtschaftlichen Produktion in absehbarer Zeit knapp werden. Vor dem Hintergrund einer nachhaltigen Bewirtschaftung sind daher Konzepte und Maßnahmen zur Schließung anthropogener P-Kreisläufe zwingend erforderlich. Hierzu zählt insbesondere auch eine möglichst vollständige Ausnutzung des in landwirtschaftlichen Ökosystemen mit der Düngung eingebrachten P.

Bei jetzigem Produktionsniveau werden den Böden in Deutschland jährlich etwa $560 \cdot 10^3$ t P in Form pflanzlicher Produkte entzogen. In diesem Beitrag wird ein Modell zur Beschreibung der Ausnutzung von Nährstoffen unter Berücksichtigung der Besonderheiten von P vorgestellt. Dieses Modell zeigt, dass beim Einsatz wasserlöslicher P-Verbindungen (auf Böden mit niedrigeren pH Werten auch citratlösliche P Formen) auf physikalisch, chemisch und biologisch intakten Böden langfristig eine vollständige Ausnutzung von P aus Düngemitteln unterstellt werden kann. Bei ausschließlicher Verwendung wasserlöslicher P-Formen kann daher die für die pflanzliche Produktion in Deutschland erforderliche Mindestmenge an P auf $560 \cdot 10^3$ t J⁻¹ P geschätzt werden.

Für den ökologischen Landbau stellt die zwingende Kopplung der langfristig vollständigen Ausnutzung des Düngers P an die Löslichkeit in Wasser oder mindestens Zitronensäure insofern ein Problem dar, als derzeit lediglich Rohphosphate oder andere schwerlösliche P-Formen zur Verbesserung des P-Status von ökologisch bewirtschafteten Böden zugelassen sind. Eine bilanzorientierte Düngung auf Entzug ist mit diesen Produkten jedoch nicht möglich und es besteht die Gefahr des Verlustes an Bodenfruchtbarkeit. Einen Ausweg bieten hier granuliert Formulierungen von elementarem Schwefel und schwerlöslichen Kalziumphosphaten, wo nach deren Einbringung in den Boden ein mikrobiell induzierter "in situ-Aufschluß" schwerlösliche Phosphate in wasserlösliche überführt. Hierdurch wird auch im ökologischen Landbau die Umsetzung des Konzeptes bilanzierter Düngung möglich.

Schlüsselworte: Düngung, Nachhaltigkeit, Nährstoffbilanz, Nährstoffausnutzung, ökologischer Landbau, Phosphor, Phosphat

Abstract

The utilisation of fertiliser P with special view to organic farming

Phosphorous (P) is the first non renewable resource which is becoming scarce in less than 100 years. Thus it is vital for sustainable agriculture to develop strategies and measures to close anthropogenic P cycles. In this context agriculture has to strive for a total utilisation of the P employed in production. At a recent crop production level, $560 \cdot 10^3$ t yr⁻¹ P is removed from German soils by plant products. The paper presents a model to describe the utilisation of fertiliser nutrients with special regard to P. Provided that only water soluble (or in some cases citric acid soluble) P is used on physical, chemical and biological intact soils and within infinite time, a fully utilisation of the P applied can be expected. In organic farming easily soluble P forms are banned, but with phosphates of low solubility which do not enter the site-specific P cycle, even within infinite time a full utilisation can not be expected. Under the restrictions of a balanced fertilisation where fertiliser inputs shall not exceed the amount of P removed, organic farming easily may drift into nutrient mining, diminishing soil fertility and sustainability of production. A possible way out of this dilemma offers the concept of "in situ digestion" where low soluble forms of P (rock phosphates or meat/bone ashes) are granulated with elemental sulphur and the release of sulphuric acid during microbial sulfoxidation transforms low into easy soluble P forms. This concept enables the realisation of balanced P fertilisation in organic farming, too.

Key words: balanced fertilisation, fertilisation, sustainability, nutrient utilisation, organic farming, phosphorous, phosphate

¹ Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Bundesallee 50, D-38116 Braunschweig

1 Einleitung

Phosphor (P) ist ein für alle Lebewesen essenzielles Element. Der wichtigste Eintrittspfad in die Nahrungskette ist über Pflanzen, die P überwiegend in Form von Phosphaten aus dem Boden aufnehmen. Neben der Bedeutung als lebensnotwendiges Element zeichnet P aber auch noch seine hohe Relevanz als umweltbelastender Stoff (Frede und Bach, 2003) und die Endlichkeit seiner natürlichen Ressourcen (Pradt, 2003) aus. Aus diesen beiden Gründen ist eine möglichst verlustfreie und effiziente Verwendung von P in der Landwirtschaft ein Schlüsselmerkmal der Nachhaltigkeit.

Zur Förderung der Nachhaltigkeit bei der Verwendung von P in der Landwirtschaft bedarf es zweier neuer Strategien und zwar: der balanzierten P Düngung als Konzept für die Steuerung des mengenmäßigen Aufwandes und das verstärkte Recycling von in anthropogenen, biotischen und abiotischen Kreisläufen befindlichem P. Wissenschaftlich technisches Problem hierbei ist, dass während dieses Umlaufes die P-haltigen Träger kontaminiert werden (Schwermetalle, organische Schadstoffe) und P seine chemischen Eigenschaften verändert. Hier sind insbesondere der Verlust an Löslichkeit, durch Einbau von P in die Knochensubstanz von höheren Lebewesen bzw. durch physikalisch-chemische Behandlung von Reststoffen (z. B. Verbrennungsvorgänge) zu nennen.

Ziel dieses Beitrages ist es, die Mengen an P zu quantifizieren, die zur Aufrechterhaltung der landwirtschaftlichen Produktion notwendig sind und die hierfür erforderlichen Stoffqualitäten zu definieren.

Historisch bedingt, heute jedoch kaum noch sinnvoll, aber dennoch im europäischen und vor allem deutschen Sprachraum immer wieder gepflegt, wird im landwirtschaftlichen Bereich der Begriff "Phosphat" verwendet und Gehalte und Stoffmengen als Phosphorpentoxid (P_2O_5) angegeben. In diesem Beitrag sind alle Gehalte und Stoffmengen als rein P angegeben.

2 Phosphorentzug und Phosphorbedarf der Primärproduktion in Deutschland

Die deutsche Landwirtschaft erzeugt jährlich auf einer Fläche von $7 \cdot 10^6$ ha Getreide, $0,15 \cdot 10^6$ ha Hülsenfrüchte, $1,1 \cdot 10^6$ ha Wurzel- und Knollenfrüchte, $1,2 \cdot 10^6$ ha Ölsaaten, $1,2 \cdot 10^6$ ha Silomais und ca. $4,5 \cdot 10^6$ ha Futter auf Wiesen und Weiden. Bei mittleren Erträgen von 4, 3,5, 40, 3,5, 45 und 9 t ha^{-1} und P-Gehalten des Erntegutes von jeweils 0,37, 0,44, 0,05, 0,79, 0,09 und 0,44 % P entspricht dies einem Entzug von insgesamt $467 \cdot 10^3$ t P im Jahr. Berücksichtigt man zusätzlich noch Unsicherheiten hinsichtlich der nicht von der amtlichen Statistik erfassten Kulturen und der teilweisen Abfuhr von Ernterückständen (Getreidestroh), so liegt die insgesamt mit Ernteprodukten entzogene Menge an P bei etwa $560 \cdot 10^3$ t P im Jahr.

3 Qualitative Anforderungen an die Löslichkeit von Phosphorverbindungen in Düngemitteln

Düngung soll einem Pflanzenbestand die für das Erreichen eines bestimmten Ertragszieles notwendigen Nährstoffmengen zuführen. Der Bedarf an Düngernährstoffen muss dabei neben dem Entzug des Erntegutes auch noch systembedingte Verluste berücksichtigen, weshalb Nährstoffentzug und Düngbedarf einander nicht unbedingt entsprechen. Bei P sind zudem Bindungsformen mit unterschiedlichem Lösungsverhalten zu berücksichtigen.

Als wichtige Qualitätsmerkmale sollen die im Dünger enthaltenen Nährstoffe "pflanzenverfügbar" sein und das Düngemittel (einschließlich seiner Ausbringungsmethodik) einen möglichst hohen Grad der Ausnutzung der Nährstoffe durch die Pflanze gewährleisten. Hierzu erscheint es zunächst notwendig, grundlegende Kenntnisse über die Ausnutzung von Düngernährstoffen zu betrachten, zumal, bedingt durch rapide Veränderungen der Rahmenbedingungen, dieses Wissensgebiet in den letzten 25 Jahren kaum noch Interesse in der Pflanzenernährungsforschung gefunden hat und daher relevante Forschungsergebnisse vorwiegend in älterer Literatur zu finden sind.

3.1 Grundsätzliche Bedeutung des Ausnutzungsgrades für die Höhe der Düngung

Pflanzen decken ihren Nährstoffbedarf entweder aus den nativen Bodennährstoffen oder aus Nährstoffen, die von früheren Düngungen her im Boden gespeichert worden sind. Die zum Erreichen eines gewünschten Ertragsniveaus fehlende Menge muss durch Düngung ergänzt werden, wobei sich der Einfluss des Ausnutzungsgrades auf die Höhe der Düngung durch folgende Beziehung darstellen lässt (Abb. 1):

$$(1) \quad D = \frac{E - \left(\frac{B \times b}{100} + \frac{C \times c}{100} \right)}{d} \times 100$$

- D = Düngermenge in $kg \ ha^{-1}$ Nährstoff
- B = Gehalt des Pflughorizontes an Nährstoffen aus früheren Düngungen in $kg \ ha^{-1}$
- C = Gehalt des Pflughorizontes an nativen Bodennährstoffen in $kg \ ha^{-1}$
- E = Nährstoffentzug der Ernte in $kg \ ha^{-1}$
- b = Ausnutzungsgrad der angereicherten Düngernährstoffe in %
- c = Ausnutzungsgrad der nativen Bodennährstoffe in %
- d = Ausnutzungsgrad der Düngernährstoffe im Anwendungsjahr in %

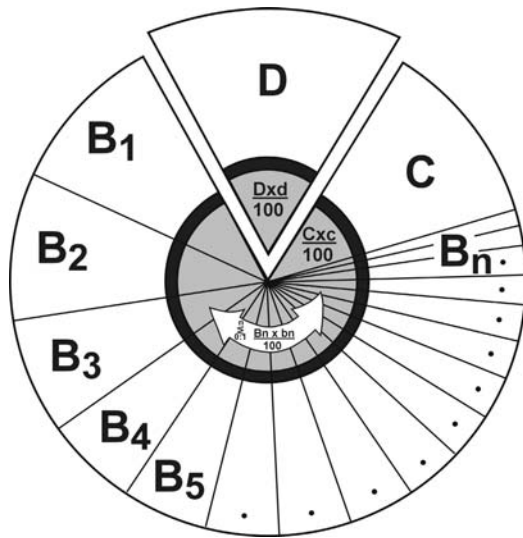


Abb. 1:
Herkunft der Nährstoffe im Erntegut landwirtschaftlicher Kulturpflanzen

Erläuterungen: ● Entzug für Ertragsziel; D = Dünger; B = Nährstoffe aus früheren Düngungen; C = native Bodennährstoffe; b = Ausnutzungsgrad der angereicherten Düngernährstoffe; c = Ausnutzungsgrad der nativen Bodennährstoffe; d = Ausnutzungsgrad der Düngernährstoffe im Anwendungsjahr

Von den Düngernährstoffen nutzen die Pflanzen im Anwendungsjahr nur einen bestimmten Teil aus. Der nicht ausgenutzte Rest verbleibt, sofern er nicht durch Auswaschung (von großer Bedeutung bei Stickstoff und Schwefel), Entgasung (von großer Bedeutung bei Stickstoff) oder Erosion (z. T. bedeutsam für P) verloren geht, im Boden und kann von den Früchten der nachfolgenden Jahre je nach Ausmaß einer möglichen Immobilisierung weiter ausgenutzt werden. Da diese Ausnutzung ratenweise im Verlauf der Jahre erfolgt, stellt der Ausdruck

$$\left(\frac{B \times b}{100}\right)$$

in Gleichung (1) eine kumulative Größe aus den im Boden verbleibenden Restmengen an Düngernährstoffen aus den Düngungen der vergangenen Jahre dar (2):

$$(2) \quad \frac{B \times b}{100} = \frac{B_1 \times b_1}{100} + \dots + \frac{B_n \times b_n}{100}$$

$B_1, B_2 \dots B_n$ = Restliche Nährstoffmenge aus der Düngung:
1 = des letzten Jahres;
2 = des vorletzten Jahres;
n = vor n Jahren

$b_1, b_2 \dots b_n$ = Entsprechende Ausnutzungsgrade zu B_1, B_2 in den betreffenden Jahren.

Auf den regelmäßig gedüngten landwirtschaftlichen Böden ist es notwendig, bei der Bemessung der Düngungshöhe, abgesehen von einer eventuellen Nachlieferung aus nativen Bodennährstoffen

$$\left(\frac{C \times c}{100}\right)$$

sowohl die Ausnutzung der Düngernährstoffe im Anwendungsjahr,

$$\left(\frac{D \times d}{100}\right)$$

als auch deren mögliche Nachwirkung

$$\left(\frac{B \times b}{100}\right)$$

zu erfassen, um einen Eindruck über die Gesamtwirkung eines Düngernährstoffes

$$\left(\frac{D \times d}{100}\right) + \left(\frac{B \times b}{100}\right)$$

zu bekommen. Je nach Höhe des Nährstoffentzuges (somit abhängig von der Höhe des angestrebten Ertrages) und der Nachlieferung aus nativen Bodennährstoffen wird bei Bemessung der Düngermenge nach dem Ausnutzungsgrad im Anwendungsjahr (Gleichung (1)) infolge der Anreicherung des Bodens mit Düngernährstoffen im Laufe der Zeit der Ausdruck:

$$(3) \quad E - \left(\frac{B \times b}{100} + \frac{C \times c}{100}\right) = 0$$

werden, so dass es für die weitere Bemessung der Düngung ausreicht, die Verluste an pflanzenverfügbaren Nährstoffen durch Pflanzenentzug, Auswaschung, Erosion und Fixierung zu ergänzen (Abb. 2). Eine Düngungsintensität, welche die Erhaltung dieses Zustandes gewährleistet, stellt das unter den gegebenen Bedingungen ökonomische und ökologische Optimum dar. Der hierzu zu berücksichtigende Ausnutzungsgrad der Düngernährstoffe beinhaltet deshalb sowohl die Ausnutzung im Anwendungsjahr, als auch die in den Folgejahren mögliche Nachwirkung. Versteht man unter dem Ausnutzungsgrad im Anwendungsjahr die "tatsächliche" Ausnutzung, so bezeichnet man die über lange Zeiträume kumulierte Gesamtwirkung als die "effektive" (Karlovsky, 1962) oder "scheinbare" (Kaila 65; Finck, 1979) Ausnutzung (s):

$$(4) \quad \frac{D \times s}{100} = \frac{D \times d}{100} + \frac{B \times b}{100}$$

wobei sich der scheinbare Ausnutzungsgrad aus

$$(5) \quad s = \frac{\frac{D \times d}{100} + \frac{B \times b}{100}}{D} \times 100$$

ergibt. Die Änderungen des Nährstoffgehaltes im Boden bei Düngung nach dem Ausnutzungsgrad im Anwendungsjahr, bzw. nach dem scheinbaren Ausnutzungsgrad sind in Abb. 2 dargestellt.

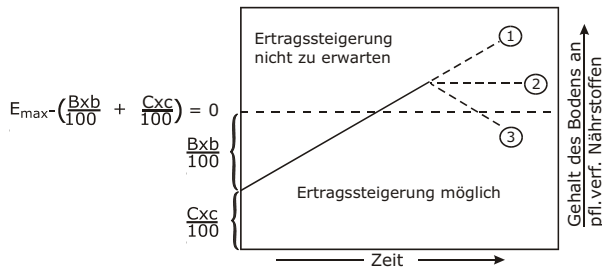


Abb. 2: Änderungen des Nährstoffgehaltes im Boden bei Düngung nach dem Ausnutzungsgrad im Anwendungsjahr (1), bzw. nach dem "effektiven" oder "scheinbaren" Ausnutzungsgrad (2), keine Düngung (3), nach Erreichen des optimalen Versorgungsgrades nach Engelstad und Parks (1976).

Die Umsetzungen der dem Standort mit der Düngung zugeführten Nährstoffe können insgesamt wie folgt bilanziert werden:

$$(6) \quad D = E + V + F \quad \begin{array}{l} V = \text{Verluste durch Auswaschung und Erosion} \\ F = \text{Verluste durch Nährstofffixierung im Boden} \end{array}$$

woraus unter Berücksichtigung einer eventuellen Nachlieferung aus nativen Bodennährstoffen folgt:

$$(7) \quad \frac{E + V + F - \frac{C \times c}{100}}{D} = 1$$

4 Besonderheiten der Ausnutzung des Phosphors aus Düngemitteln

Mit Ausnahme niedrigmolekularer organischer Verbindungen nehmen Pflanzen nur Orthophosphat aus der Bodenlösung auf (Barber, 1980). Dennoch besitzen Pflanzen unterschiedliche Fähigkeiten sich P aus dem Boden anzueignen. Neben einer Reihe von allgemeinen Faktoren, welche die Ausnutzung von Düngernährstoffen beeinflussen (Schnug et al., 2003) sind bei P spezifisch Wurzelexkretionen zu nennen, welche die Rhizosphäre chemisch beeinflussen. Von Pflanzenwurzeln ausgeschiedene Citrat-, Oxalat- und Polygalakturonatanionen können mit Metallionen stabile Komplexe bilden und so auch fester sorbiertes Phosphat austauschen und aufnehmen (Rovira, 1965). Polygalacturonsäuren bilden in methylierter Form

auch den Hauptbestandteil der Pektinsubstanz, welche die dünne Gelschicht in der Kontaktfläche zwischen Wurzeln und Boden bildet (Brams, 1968). So zeigte Hafer mit Klee-Untersaat eine um 60 % höhere P-Aufnahme im Vergleich zu alleinigem Anbau von Hafer. Daraus ist abzuleiten, dass Klee eine wesentlich höhere Wurzelaktivität im Hinblick auf die Fähigkeit Phosphate zu lösen hat als Hafer (Drake und Steckel, 1955).

Der niedrige Ausnutzungsgrad des Dünger-P im Anwendungsjahr von selten mehr als 15 % (Schnug u. a., 2003) zeigt, dass die Pflanzen ihren P-Bedarf zum größten Teil aus den Umwandlungsprodukten, des aus früheren Düngungen angereicherten Phosphates decken. Verluste an P aus dem Boden durch Auswaschung sind sehr gering (nach Boysen (1977) und Hoffmann (1978) jährlich maximal 0,1 - 0,2 kg ha⁻¹ P), so dass fast sämtlicher von außen zugeführter und nicht durch Pflanzen ausgenutzter P, im Boden erhalten bleibt. Mit Ausnahme der Diffusion über sehr kurze Distanzen wandert P im Boden kaum (Barber, 1980) und physikalische Verlagerung ist gebunden an partikulär oder hochmolekular gebundenes P, entweder durch Bioturbation, Bodenbearbeitung oder Erosionsvorgänge (Catt, 1997; Sharpley et al., 2000). Ein Umstand, den sich Archäologen schon recht früh zu Nutze zu machen wussten (Arrhenius, 1931). Nichtsdestotrotz unterliegt jeder dem Boden zugeführte P einem Umwandlungsprozess (Abb. 3).

Dünger-P kann ebenso wie Stickstoff in der organischen Bodensubstanz gebunden werden. Der größte Teil organischen P's ist in der hochmolekular vernetzten Bodensubstanz gebunden (Moyer und Thomas, 1970). Die im Boden vorwiegend vorkommenden Fe-, Al- und K-Salze der Inosithexaphosphorsäure sind ebenfalls sehr stabil und Pflanzen ohne weiteren mikrobiellen Aufschluss nur schwer zugänglich. Geschätzt wurden jährliche Ausnutzungsraten von 1,0 - 1,5 % (Ivanov und Sauerbeck, 1972). Ihr Anteil am organisch gebundenen P kann bis zu 50% betragen (Baeumer, 1971; Schachtschabel, 1960). Der geringere Teil des P wird in leicht zersetzlichen und mit jährlich 15 - 20 % wesentlich besser ausnutzbaren Phosphatiden und Nukleinsäuren gebunden (Ivano und Sauerbeck, 1971 und 1972). Organisch gebundener P ist mineralisierbar, vor allem der in der Mikroorganismenmasse oder in Pflanzenresten gebundene P. Auch hier kann analog den Verhältnissen beim Stickstoff bei einem C/P Verhältnis > 150 eine biologische P-Sperre entstehen (Baeumer, 1971; Finck, 1976; Kaila, 1949). Die unterschiedlich starken Einbindungen in organische Verbindungen sind dabei hinsichtlich ihrer Kinetik in der standorttypischen P-Dynamik (Abb. 3) analog zu den Alterungs-, bzw. Rekristallisationsprodukten der anorganischen P-Verbindungen zu sehen. Die für P aus organischen Düngern berichteten Ausnutzungsgrade im Anwendungsjahr unterscheiden sich daher auch nicht von denen anorganischer P-Formen (Asmus et al., 1973; Debruk und Voemel, 1970;

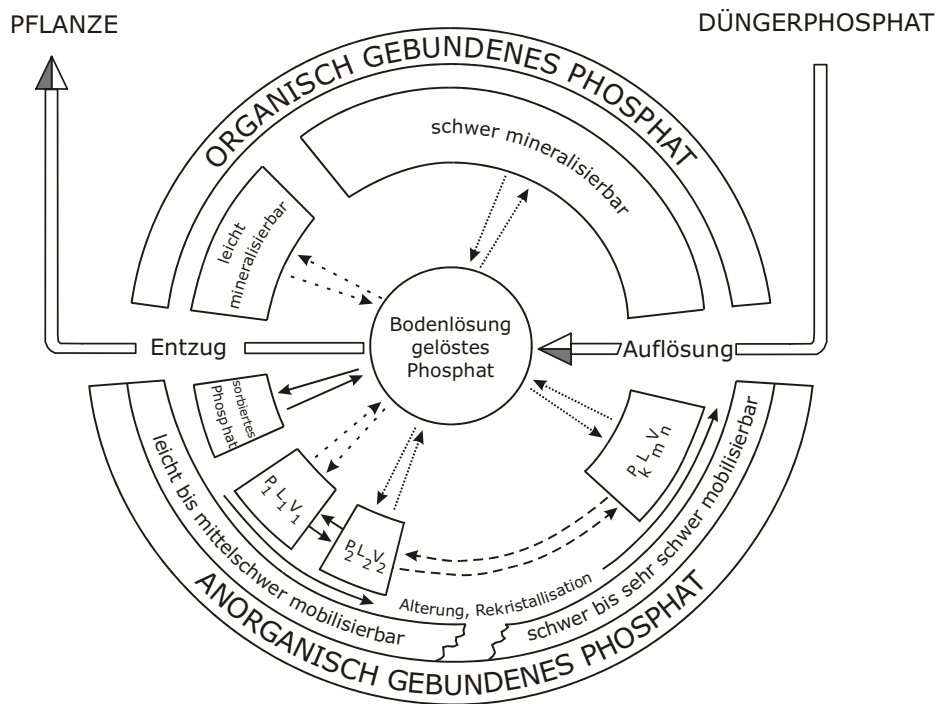


Abb. 3:
Schematische Darstellung der Umsetzung von Dünger P im Boden

Erläuterungen:

$P_1, P_2, \dots, P_k =$
Anorganische P Bindungsformen

$L_1, L_2, \dots, L_m =$
Löslichkeit von $P_1 - P_k$, von L_1 nach L_m abnehmend

$V_1, V_2, \dots, V_n =$
Lösungsgeschwindigkeit von $P_1 - P_k$, von V_1 nach V_n abnehmend

Diekmann, 1966; Ibrieki et al., 1999; Isermann, 1978; Latkowitz, 1977; Sanderson und Jones, 1997; Sanderson et al., 2001; Whalen und Chang, 2001).

Langfristig stellt sich in Abhängigkeit von der Bewirtschaftungsweise ein bestimmtes Niveau an organisch gebundenem P ein (Suencksen, 1977). Wenn auch das organisch gebundene Phosphat bis zu 60 % des Gesamtgehaltes des Bodens an P ausmacht (Finck, 1976), liegt dennoch das Hauptinteresse auf dem Anteil an anorganisch gebundenem P, da die Pflanzen P in erster Linie als Orthophosphat aufnehmen (Ulrich und Benzler, 1955) (Abb. 3).

Im Hinblick auf das vorgestellte Modell zur Beschreibung der Ausnutzung von P in Düngernährstoffen ergibt sich somit für organische P-Verbindungen ein den anorganischen entsprechendes Kollektiv an unterschiedlichsten Bindungsformen mit jeweils unterschiedlichem Lösungsverhalten. Dabei ist davon auszugehen, dass auch in der

organischen Fraktion kein P irreversibel gebunden wird, sondern, auf lange Zeiträume betrachtet, der mit organischen Verbindungen in den Boden eingebrachte P vollständig mineralisiert und damit für Pflanzen ausnutzbar wird.

Ein Teil der mit Düngung zugeführten Phosphatanionen wird an Bodenkolloiden, vor allem Töne der Glimmergruppe, sorbiert, wobei diese Sorption mit sinkendem pH zunehmend stärker wird. Durch Umhüllung dieser Partikelchen mit Fe-, Al- und Mn-Oxiden oder Hydroxiden wird ebenfalls die Sorptionskraft verstärkt (Schachtschabel, 1960; Döring, 1956). Die Ausnutzung geht dabei mit zunehmender Vergrößerung des Verhältnisses von Metall:P zurück (Römer, 2003). Der Ausnutzungsgrad der sorbierten Phosphationen wird von Döring (1956) auf jährlich 30 - 55 % beziffert.

Bei der Düngung mit wasserlöslichen Phosphaten wird die Phosphatkonzentration in der Bodenlösung nach der Ausbringung stark erhöht, so dass im Extremfall pH-Wert und Konzentration der gesättigten wässrigen Lösung des betreffenden Düngemittels erreicht werden. Die konzentrierte saure Lösung durchdringt den umgebenden Boden, wobei Ca, Fe und Al und andere Kationen gelöst oder desorbiert werden und deren Konzentration in der Bodenlösung zunimmt. Hat diese Konzentration eine bestimmte Höhe erreicht, wird die Löslichkeit eines Phosphats überschritten, so dass dieses als Neubildung aus der Lösung ausfällt.

Bei der Umsetzung der nicht wasserlöslichen Düngersphosphate bestimmen pH und Ca-Konzentration der Bodenlösung die Löslichkeit (Fassbender und Ulrich, 1965 a, b; Ulrich, 1963) und die Größe der Düngerteilchen die Lösungsgeschwindigkeit (Matzel, 1974). Unterschiede im Ausnutzungsgrad im Anwendungsjahr zwischen verschiedenen Phosphatdüngerformen (Blaser und McAuliffe, 1949; McAuliffe et al., 1949; Hall et al., 1949; Olsen und Gardener, 1949) werden durch die unterschiedliche Zeit bedingt, welche die Phosphate für ihre Umwandlung in leicht pflanzenverfügbares Bodenphosphat benötigen (Russel, 1973; Murrmann und Peech, 1969). Bezogen auf den wirksamen (standortspezifisch löslichen) P-Anteil (Finck, 1969) im Düngemittel sind diese Unterschiede jedoch gering.

Die Art der Umwandlungsprodukte der P-Dünger hängt wesentlich vom pH-Wert ab, im sauren Milieu sind es überwiegend Fe- oder Al-Phosphate, im neutralen bis alkalischen Bereich Ca-Phosphate (Munk und Gross, 1975; Werner, 1969). Diese neugebildeten, noch leicht mobilisierbaren Phosphate wandeln sich, sofern sie nicht von den Pflanzen ausgenutzt werden, über längere Zeiträume in immer energieärmere Formen um, bis letztlich die unter den gegebenen Bedingungen thermodynamisch stabilste Verbindung entstanden ist (Abb. 3). Im Zuge dieses Prozesses gehen Löslichkeit und Lösungsgeschwindigkeit zurück (Larsen et al., 1965; Paauw, 1960) und somit auch die Ausnutzungsraten. Bei den Ca-Phosphaten bedingt der fortschreitende Ersatz von H^+ durch Ca^{2+} die Umwandlung der zunächst Ca-armen Neubildungen in Ca-reichere Phosphate, so dass über Defektopatite schließlich Apatite entstehen können. Mit diesem Vorgang ist ein Rückgang der Löslichkeit verbunden. Eine gleichzeitige Zunahme der Korngröße durch Vereinigung kleiner Teilchen setzt die Lösungsgeschwindigkeit herab (Schachtschabel, 1976; Werner, 1970, 1971a). Bei den Fe- und Al-Phosphaten beruht dieser Rückgang einerseits auf einer Zunahme der Ordnung der Phosphationen im Kristallgitter, wobei durch die zunehmende thermodynamische Stabilität die Löslichkeit abnimmt und andererseits auf der Bildung von Konkretionen mit Fe-Hydroxiden, wodurch die Lösungsgeschwindigkeit vermindert wird (Schachtschabel, 1976; Werner, 1971b).

Die Umwandlung der Phosphate erreicht in relativ kurzer Zeit ein Gleichgewicht, wohingegen die Alterung der Umsetzungsprodukte außerordentlich langsam abläuft (Scharafat und Finck, 1973; Werner und Wiechmann, 1972). Werner und Wiechmann (1972) fanden für das durch langjährige P-Düngung im Boden angereicherte Phosphat nur einen langfristigen Ausnutzungsgrad von durchschnittlich 48 %, was sie darauf zurückführen, dass der Rückgang der Löslichkeit im Verlauf der Alterung der Bodenphosphate letztlich zur Phosphatfixierung führt (Wiechmann und Werner, 1976; Plätzen und Munk, 1975). Rechnet man einen durchschnittlichen Ausnutzungsgrad

im Anwendungsjahr von 15 % hinzu, ergibt sich der in Lehrbüchern oft noch wiedergegebene langfristige Ausnutzungsgrad von etwa nur 60 % (Arbeitskreis Phosphat, 1978). Dieser Rückgang der Phosphatlöslichkeit bedeutet dennoch keine Umwandlung des Phosphats in nicht pflanzenverfügbare Formen, denn die Pflanzen vermögen, wenn ihnen leichtverfügbare Phosphate zugeführt werden, gleichzeitig auch schwerer mobilisierbare Bodenphosphate aufzunehmen (Schachtschabel, 1976). In den Versuchen von Werner (1970 und 1971b) und Werner und Wiechmann (1972) wurde der Ausnutzungsgrad für den durch langjährige Düngung angereicherten P jedoch durch mehrfach wiederholten P-Entzug durch Pflanzen ohne weitere P-Düngung ermittelt. Bei solchen "Erschöpfungsversuchen" leiden die Pflanzen ab einem bestimmten Nährstoffpegel im Substrat unter P-Mangel, wodurch die Vitalität und damit die Aufnahmeaktivität gestört wird. Unter günstigen Versorgungsbedingungen vermögen die Pflanzen jedoch Nährstoffe wesentlich besser auszunutzen (Schachtschabel, 1976). Aus der Tatsache, dass die Pflanzen aus physiologischen Gründen keine Nährstoffe mehr aufnehmen können, wird dann der fehlerhafte Schluss gezogen, dass Substrat liefere keine Nährstoffe mehr nach, bzw. die Nährstoffe im Boden seien fixiert. Dem Streben der Phosphate, in immer energieärmere Formen überzugehen, stehen zudem energieverbrauchende mikrobiotische Prozesse (Mosse et al., 1976; Sharma und Singh, 1971) sowie abiotische Einflüsse gegenüber, die eine defixierende Wirkung haben.

Vor diesem Hintergrund (vernachlässigbare Nachlieferung aus nativen Bodennährstoffen ($C \approx 0$ bzw. $c \approx 0$) und unbedeutenden Verlusten aus dem Boden ($V \approx 0$)), bedeutet dieses, dass bei Ersatz des von den Pflanzen entzogenen, löslichen P durch, unter den jeweiligen Standortbedingungen lösliches Dünger-P, der scheinbare Ausnutzungsgrad für P in Düngernährstoffen sehr einfach durch die Bilanzierung von Entzug und Düngung ermittelt werden kann:

$$(8) \quad s = \frac{E}{D} \times 100$$

5 Die Ausnutzung von Phosphor in Düngernährstoffen unter Feldbedingungen

Da Verluste sowie Nachlieferung aus bodenbürtigen Mineralien vernachlässigt werden können und für die Pflanzen langfristig gesehen kein grundsätzlicher Unterschied zwischen den verfügbaren bodenbürtigen Phosphatformen und den Formen, in die sich der Dünger P im Boden umsetzt, besteht, ist es möglich, den Ausnutzungsgrad des zugeführten Phosphats als Prozent des Entzuges auszudrücken (Koehnlein und Knauer, 1965). Zur Objek-

tivierung des Wertes kann die Veränderung des pflanzenverfügbaren P im Boden mit in die Berechnung einbezogen werden (Einicke und Hagemann, 1969; Koehnlein und Knauer, 1965). So ermittelt Karlovsky (1962) die "effektive" Ausnutzung des Dünger P, nachdem sich bei gleichbleibender Dünghöhe sowohl ein konstanter Gehalt des Bodens an pflanzenverfügbarem P, als auch ein konstantes Ertragsniveau einstellte, ebenfalls durch die Bilanzierung von Düngermenge und Entzug ("Gleichgewichtsmethode").

Die noch vorherrschende Lehrbuchmeinung ist, dass die fixierenden Prozesse im Boden in größerem Ausmaß stattfinden als die gleichzeitig ablaufenden Vorgänge der Defixierung, und dass deshalb eine Düngung höher als der Entzug durch die Ernten erforderlich sei (Arbeitskreis Phosphat, 1978; Johnston, 1976). Schachtschabel (1976) konnte jedoch zeigen, dass bei einer P-Düngung mit wasserlöslichem P in Höhe des Pflanzenentzuges der Gehalt verschiedener Böden an wasserlöslichem Phosphat innerhalb einer Versuchsdauer von sieben Jahren keine Veränderung erfuhr. Der Ausgangsgehalt im Boden hatte hierauf keinen Einfluss. Eine über dem Entzug liegende Düngung führte zur Erhöhung, eine Düngung niedriger als der Entzug zur Senkung der Bodengehalte an pflanzenverfügbarem P. Das gleiche Bild zeigt sich in den Versuchsergebnissen von Bergmann und Witter (1965) (Abb. 4). Die Rückführung des von den Pflanzen der Bodenlösung entzogenen P durch hinsichtlich ihrer Löslichkeit gleichwertige P Formen hat somit ausgereicht, um ein Fließgleichgewicht zwischen immobilisierenden und mobilisierenden Prozessen aufrecht zu erhalten. In diesen Versuchen betrug somit der "scheinbare" oder "effektive" Ausnutzungsgrad von P in den Düngernährstoffen 100 %.

Dies bestätigt zum einen, dass die Pflanzen, trotz des stetigen Rückgangs der Löslichkeit der Umsetzungsprodukte des Dünger-P, diese auszunutzen vermögen, sofern ihnen gleichzeitig leichtverfügbarer P zugeführt wird (Schachtschabel, 1976), und zum anderen, dass sich Immobilisierung und Mobilisierung von Dünger-P im Rahmen eines dynamischen Gleichgewichtes ausgleichen.

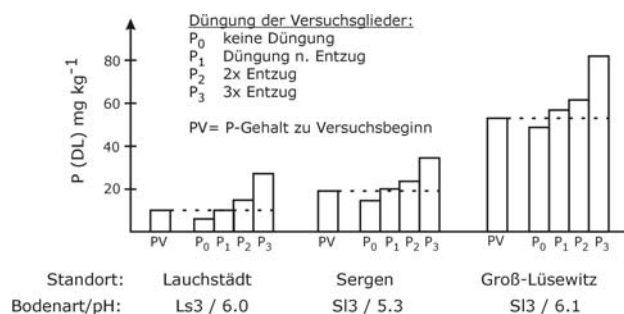


Abb. 4: Veränderung des Gehaltes an DL-löslichem Phosphat-P in der Krume 9-jähriger Versuche mit gesteigerter P Düngung mit Superphosphat (nach Bergmann und Witter, 1965).

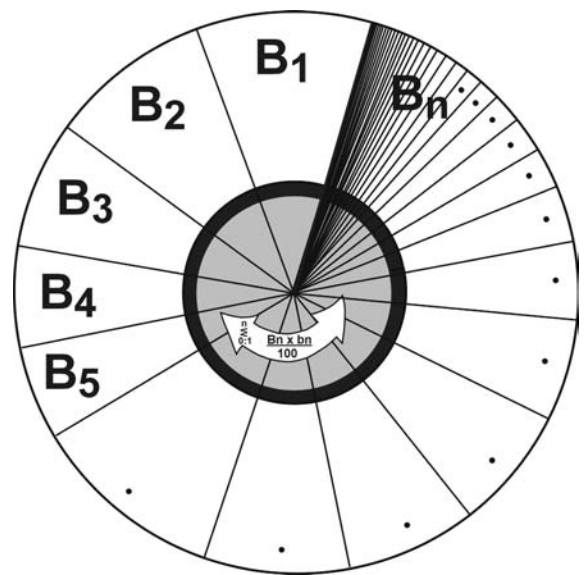


Abb. 5: Herkunft des P im Erntegut landwirtschaftlicher Kulturpflanzen auf ausreichend mit P versorgten Böden.

Erläuterungen: ○ Entzug für Ertragsziel; B = Nährstoffe aus früheren Düngungen der vergangenen Düngungsjahre 1 - n (B₁-B_n) b = Ausnutzungsgrad der angereicherten Düngernährstoffe aus den vergangenen Düngungsjahren B₁-B_n

Hieraus ergibt sich die intrinsische Hypothese, dass auf Böden, deren Gehalt an pflanzenverfügbarem P so hoch ist, dass durch eine zusätzliche P-Düngung kein Mehrertrag mehr zu erzielen ist ($\sum B_1-B_n = E$, Abb. 5) die Düngung in Höhe der durch die Ernten entzogenen P-Mengen erfolgen kann, da langfristig gesehen von einer vollständigen Ausnutzung des mit der Düngung zugeführten P ausgegangen werden kann.

Für die Validität dieser Hypothese und für das vorgestellte Modell der Ausnutzung von P in Düngernährstoffen bedeutet dies, dass die Annahmen einer vollständigen Ausnutzung und damit einer bilanzorientierten, rein den Entzügen entsprechende Düngung nur unter der Prämisse gilt, dass die Nährstoffe der Düngemittel binnen einer Vegetationsperiode in Lösung gehen, um dann in die standorttypische Dynamik von P einbezogen zu werden. Für die Mehrzahl der landwirtschaftlich genutzten Böden mit pH-Werten zwischen 5,6 und 7,5 entspricht dieser "wirksame" Anteil dem Gehalt an wasserlöslichen, im pH-Bereich < 5,8 auch dem ammoncitratlöslichen bzw. zitronensäurelöslichen P. Bei organisch gebundenem P in Wirtschaftsdüngern ist davon auszugehen, dass langfristig aller P mineralisiert und über die Bodenlösung in die standorttypische P-Dynamik inkorporiert wird. Der "wirksame" Anteil bei Wirtschaftsdüngern entspricht somit dem Gesamt P-Gehalt. Ein wichtiger Beweis dafür, dass auch organisch gebundener P langfristig vollständig ausgenutzt wird, sind geschlossene extensive Ökosysteme, wie z. B. Dünenvegetationen oder die Alpenflora

oberhalb der Baumgrenze, die ohne P-Zufuhr von außen, allein durch stetigen Umsatz der im System begrenzt vorhandenen P-Mengen existieren.

Im Sinne einer bilanzierten Düngung, wie sie aus Sicht des Umweltschutzes (Sharpley und Withers, 1994; Higgs et al., 2000), u. a. von Konventionen zum Schutz der Meere gefordert wird (Schnug et al., 2001; Vermeulen et al., 1998), würde dann nur noch die P-Abfuhr mit Ernteprodukten durch Düngung, aber durch wasserlösliche P-Formen, zu ersetzen sein.

5 Konsequenzen für die landwirtschaftliche Produktion unter besonderer Berücksichtigung des ökologischen Landbaus

Bei ihrem jetzigen Produktionsniveau entzieht die Primärproduktion der deutschen Landwirtschaft den Böden jährlich etwa $560 \cdot 10^3$ t P. Unter der Bedingung, dass auf (physikalisch, chemisch und biologisch) intakten Böden P in Form wasserlöslicher, in einigen Fällen auch ammoniumcitrat-löslicher Verbindungen zugeführt wird, kann eine weitgehend verlustfreie und langfristig nahezu vollständige Ausnutzung erwartet werden. Diese $560 \cdot 10^3$ t P entsprechen somit unter optimalen Bedingungen auch dem Bedarf der deutschen Landwirtschaft an P für die Düngung, sei es in Form von Handels-, Sekundärrohstoff- oder Wirtschaftsdüngern. Qualitative Zielvorgabe für Handelsdüngemittel und für aus Sekundärrohstoffen zu entwickelnde P-Dünger ist daher die Erfüllung des Kriteriums "vollständige Wasserlöslichkeit".

Phosphor ist auch ein im ökologischen Landbau unentbehrlicher Pflanzennährstoff. Anders als bei konventioneller Wirtschaftsweise zielt hier jedoch Nährstoffzufuhr von außen zunächst einmal auf die Versorgung des Bodens und damit auf die Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit und nicht direkt auf die Ernährung der Pflanze ab. Im ökologischen Landbau steht also die Transformationsfähigkeit des Bodens vor der mehr linearen Vorstellung des bloßen Ersatzes des Entzuges der Erträge. Die EU-Richtlinie 2092/91 bemerkt hierzu im Annex I (Bodenfruchtbarkeit): "die Grundlage nachhaltiger Bodennutzung und der Erhalt der Bodenfruchtbarkeit für kommende Generationen ist die Düngung der Böden und nicht die Ernährung der Pflanzen" (Schmidt und Haccius, 1998).

Dementsprechend erlauben die Richtlinien des ökologischen Landbaus zur P-Düngung lediglich nicht wasserlösliche P-Formen, benannt in der Positivliste des Annex IIa der EU Verordnung 2092/91: Guano, Wirtschaftsdünger, Knochenmehle, Holzaschen und gemahlene weicherdige Rohphosphate. Letztere werden in der Direktive 76/116/EEC mit einer Löslichkeit von mindestens 55 % in 2%iger Ameisensäure und einer Vermahlung von $90 \% < 0,063$ und $99 \% < 0,125$ mm definiert. Von solchem Material ist kaum zu erwarten, dass es sich in überschaubaren Zeiträumen löst und an der standorttypischen P-Dynamik



Abb. 6:
Akuter P- Mangel an Mais in Livada, Rumänien
(Foto: P. Kurtinez, 2002)

teilnimmt. Konsequenz hieraus ist, dass unter der Maßgabe einer lediglich auf die P-Abfuhr ausgerichteten bilanzierten Düngung (Schnug et al., 2001) bei alleiniger Verwendung schwerlöslicher P-Formen die Fruchtbarkeit ökologisch bewirtschafteter Böden infolge des Abbaus pflanzenverfügbarer P-Reserven zurückgehen wird (Abb. 6).

Einen Ausweg aus diesem Dilemma bietet das Konzept des "in situ"-Aufschlusses von schwerlöslichem mineralischen P (Fan et al., 2003), was auch zur Verbesserung der Löslichkeit von schwerlöslichen Ca-Phosphaten in Sekundärrohstoffdüngern geeignet ist. Hierbei wird im Prinzip der Säureaufschluss des Rohphosphates in der Düngerfabrik in den Boden verlegt: durch gemeinsame Granulierung von Rohphosphat und elementarem Schwefel (beides im ökologischen Landbau zur Bodenverbesserung zulässige Stoffe) und bei Anwesenheit ausreichender Aktivität von Thiobazillen wird so im Boden durch die bei der mikrobiologischen Oxidation des elementaren Schwefels entstehende Schwefelsäure das schwerlösliche Trikalziumphosphat in wasserlösliches Orthophosphat umgesetzt (Abb. 7).

Die Mobilisierung von P aus schwerlöslichen Verbindungen wurde in der Vergangenheit wiederholt mit Hilfe spezifischer P mobilisierender Bakterien versucht (Abd El-Haleem et al., 2003, Sharma und Singh, 1971). Ursache für die letztlich unter Feldbedingungen nur geringen Effekte war dabei vor allem die geringe Überlebenschance der zugeführten "fremden" Mikroorganismen. Der "in situ"-Aufschluss beruht jedoch auf der Aktivierung bodenständiger Thiobacillen, deren Konkurrenzskraft durch Zuführung von Nahrungssubstrat noch zusätzlich gefördert wird.

Ein besonderes Problem beim "in situ" Aufschluss mit elementarem Schwefel sind jedoch die in Rohphosphaten enthaltenen Schwermetalle, deren Mobilität durch die hohe punktuelle Azidiät ebenfalls beträchtlich erhöht wird. Zur Vermeidung von Schwermetallanreicherungen auf mit Granulaten aus Rohphosphaten und elementarem

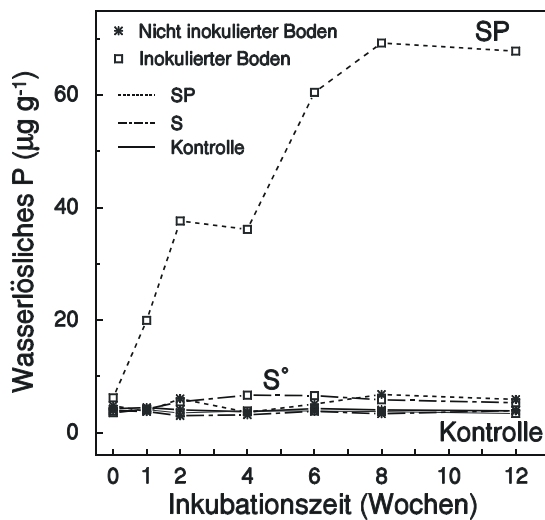


Abb. 7:

Freisetzung von wasserlöslichem P aus Granulaten mit 7 % P aus Rohphosphat und 54 % S als elementarem Schwefel (SP) mit und ohne Inokulation mit *Thiobacillus* spp. (Inkubationstemperatur: 23,8° C; S = elementarer Schwefel) (nach Fan et al., 2003).

Schwefel behandelten Böden eignet sich der Ersatz des Rohphosphates durch aus Fleisch- und Knochenmehlen gewonnene Aschen, da diese erheblich geringere Schwermetallgehalte aufweisen (Tabelle 1).

Tabelle 1:

Phosphor, Zink und Cadmium Gehalte in weicherdigem Rohphosphat im Vergleich zu Gehalten in Aschen von Fleisch/Knochenmehlen (Rogasik et al., 2003).

Material	P (%)	Cd (µg g ⁻¹)	Zn (µg g ⁻¹)
Weicherdiges Rohphosphat	13	46	400
Fleisch/ Knochenmehl Asche	19	0.1*	252

* in der Originalsubstanz

Fleisch- und Knochenmehle sind mit die ältesten bekannten Düngemittel. Schon vor mehr als 200 Jahren düngten chinesische Bauern ihre Felder mit Knochenmehlaschen (Shapiro, 1985) und zu Beginn des 19ten Jahrhunderts verarbeiteten Knochenmehlen in England Kadaver der Schlachtfelder von Leipzig, Austerlitz und Waterloo zu Düngemitteln. Nach der Belagerung von Plevna in 1877 berichtete z. B. eine Lokalzeitung, das eine Ladung 10 t menschlicher Knochen, entsprechend 30.000 Skeletten, in Yorkshire angelandet worden seinen (Shaw, 2000). Knochenmehle wurden jedoch später wegen nur noch geringer für Düngungszwecke zur Verfügung stehender Mengen, aber auch wegen der geringen Löslichkeit des P, von Mineraldüngern verdrängt. Vor dem Hintergrund

knapper werdender P-Ressourcen (Pradt, 2003), seuchenhygienischen Gesichtspunkten (Rogasik et al., 2003) und einer Ausweitung des ökologischen Landbaus wird diese P-Quelle jedoch gerade wegen der relativ geringen Schwermetallgehalte und damit der besonderen Eignung für den "in situ"-Aufschluss durch elementarem Schwefel, erneut Bedeutung erlangen. Mit dem Konzept des "in situ"-Aufschlusses eröffnet sich auch für den ökologischen Landbau die Möglichkeit bilanzorientierte P-Düngung trotz der Beschränkung auf schwerlösliche P Formen zu realisieren.

Literatur

- Abd El-Haleem AA, Abdel-Salam AA, Abd El-Hadi AH, Moursy ME (2003) Improving wheat response to phosphorus in a calcareous soil using phosphate dissolving bacteria. Egypt J Soil Sci. (in press)
- Arrhenius O (1931) Soil analysis in the service of archaeology. Z Pflanzenernähr DÜng Bodenkd B 10: 427-439
- Arbeitskreis Phosphat der deutschen Düngemittelindustrie (1978) P₂O₅ : Phosphatdüngung – unentbehrlich für Boden und Pflanze. Hannover : Fachverb. Phosphatdüngung
- Asmus F, Hermann V, Lange M, Specht G (1973) Wirkung und Ausnutzung des Stickstoffs aus Gülle. Arch Acker- Pflanzenbau 17: 927-934
- Barber SA (1980) Soil-plant interactions in the phosphorous nutrition of plants. In: Khasawneh FE, Sample EC, Kamprath, EJ (eds) The role of phosphorus in agriculture : proceedings of a symposium held 1-3 June 1976 at the National Fertilizer Development Center, Tennessee Valley Authority, Muscle Shoals, Alabama. Madison, Wis. : American Soc. of Agronomy pp 591-613
- Baeumer K (1971) Allgemeiner Pflanzenbau. Stuttgart : Ulmer pp 99-137 Uni-Taschenbücher ; 18
- Bergmann W, Witter B (1965) Die Wirkung der Phosphorsäure in statischen P-Steigerungsversuchen und der Verbleib der Restphosphorsäure im Boden. Albrecht-Thaer-Archiv 9:901-922
- Blaser RE, McAuliffe C (1949) Utilization of phosphorus from various fertilizer materials : I. Orchard grass and ladino clover in New York. Soil Sci 68:145-150
- Boysen P (1977) Nährstoffauswaschung aus gedüngten und ungedüngten Böden in Abhängigkeit von Standorteigenschaften und Nutzung der Moränen- und Sandergebiete Schleswig-Holstein. Kiel, 246 p Kiel, Univ, Agrarwiss Fak, Diss, 1977
- Brams E (1968) The mucilaginous layer of citrus roots its delineation in the rhizosphere and removal from roots. Plant Soil 30:105-108
- Catt JA, Johnston AE, Quinton JN (1997) Phosphate losses in the Woburn erosion reference experiment. In: Tunney H, Carton OT, Brookes PC, Johnston AE (eds) Phosphorous loss from soil to water. Wallingford : CAB pp 374-377
- Debruk J, Voemel A (1970) Die Verwertung der Nährstoffe in Abwassertschlamm. Landwirtsch Forsch SH 27/I:39-60
- Diekmann K (1966) Unser Acker. Hamburg : Parey
- Döring H (1956) Untersuchungen über die Ausnutzbarkeit der an Kolloiden sorbierten Phosphorsäure durch die Pflanze. Z Pflanzenernähr DÜng Bodenkd 73:235-245
- Drake M, Steckel JE (1955) Solubilization of soil and rock phosphate as related to root cation exchange capacity. Soil Sci Soc Amer Proc 19:449-454
- Einicke W, Hagemann O (1969) Forschungsbericht, Lehrstuhl für Physiologie und Ernährung der Pflanzen, Sektion Pflanzenproduktion der Universität Halle/Saale
- Engelstad OP, Parks WL (1976) Buildup of P and K in soils and effective use of these reserves. TVA Fertilizer Conference 27-28 July 1976 Cincinnati, Ohio TVA Bull 016: 50-58

- Fan X, Habib L, Fleckenstein J, Haneklaus S, Schnug E (2003) In situ digestion : a concept to manage soil phosphate in organic farming. Proc. 13th Int Symp CIEC, Tokat, Turkey, June 10-13, 2002 (in press)
- Fassbender HR, Ulrich B (1965a) Löslichkeit und Löslichkeitsprodukt von Hydroxylapatit und Rohphosphaten. *Z Pflanzenernähr Düng Bodenkd* 112:101-113
- Fassbender HR, Ulrich B (1965b) Lösungsgeschwindigkeit von Rohphosphaten. *Z Pflanzenernähr Düng Bodenkd* 112:212-219
- Finck A (1969) Bewertung von Rohphosphaten. *Bauernbl Schleswig-Holstein* 28/119(14):1330
- Finck A (1976) Pflanzenernährung in Stichworten. Kiel : Hirt, 200 p Hirts Stichwortbücher
- Finck A (1979) Dünger und Düngung : Grundlagen und Anleitung zur Düngung der Kulturpflanzen. Weinheim : Verl Chemie, XIV, 442 p
- Frede HG, Bach M (2003) Heutiger und künftiger Beitrag der Gülle bei der Phosphorversorgung der Böden. In: Proc Symp „Rückgewinnung von Phosphor in der Landwirtschaft und aus Abwasser und Abfall. Berlin, 06.-07. Februar 2003, Umweltbundesamt, Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, ISBN 3-932590-99-6
- Hall NS, Nelson WL, Krantz BA (1949) Utilization of phosphorus from various fertilizer materials : II. Cotton and corn in North Carolina. *Soil Sci* 68:151-156
- Higgs B, Johnston AE, Salter JL, Dawson CJ (2000) Some aspects of achieving sustainable phosphorous use in agriculture. *J Environ Quality* 29:80-87
- Hoffmann W (1978) Phosphor- und Stickstoffzufuhr aus der Landwirtschaft in die Ostsee, insbesondere durch die Schwebstoffe der Gewässer : Umweltforschungsplan des Bundesministers des Inneren, Wasser ; Forschungsbericht 12004015. Bielefeld : E.Schmidt p 106
- Wasser und Abwasser in Forschung und Praxis 16 ISBN 3-503-01382-2
- Ibrieki H, Hanlon EA, Recheigl JE (1999) Inorganic phosphorous and manure effects on bahiagrass on a Spodosol. *Nutrient Cycl Agroecosyst* 54:259-266
- Ivanov P, Sauerbeck D (1971) Festlegung, Umwandlung und Aufnehmbarkeit von Phytin-Phosphor im Boden. *Z Pflanzenernähr Düng Bodenkd* 129:113-123
- Ivanov P, Sauerbeck D (1972) Die Pflanzenverfügbarkeit des Phosphors aus verschiedenen organischen Substanzen. *Landwirtsch Forsch* 25:216-225
- Isermann K (1978) Die Phosphat- und Kali-Bilanz von viehstarken Grünland- und Ackerbau-Betrieben. Limburgerhof 1978
- Johnston AE (1976) Additions and removals of nitrogen and phosphorous in long term experiments at Rathamsted and Woburn and the effect of the residues on total soil nitrogen and phosphorous. *Techn Bull Min Agric Food UK* 32:101-119
- Kaila A (1949) Biological absorption of phosphorous. *Soil Sci* 68:279-289
- Kaila A (1965) Apparent recovery of fertilizer nitrogen. *J Sci Agric Soc* 37:163-174
- Karlovsky J (1962) Method of assessing the utilization of phosphorous on permanent pastures. *Int Soil Conf New Zealand Rukuhia Soil Res Sta Hamilton N.Z.* pp 726-730
- Koehnlein J, Knauer N (1965) Ergebnisse der Kieler Dauerdüngungsversuche mit Phosphat und Kali. Hamburg : Parey 65 p Schriftenreihe der Landwirtschaftlichen Fakultät der Universität Kiel 39
- Larsen S, Gunary D, Sutton CD (1965) The rate of immobilization of applied phosphate in relation to soil properties. *J Soil Sci* 16:141-148
- Latkovicz I (1977) Wirkung von organischen und Mineraldüngern in Mais-Monokulturen. *Agrochimica* 11:67-73
- Matzel W (1974) Probleme der Ausnutzung des Dünger- und Bodenphosphors – Übersichtsbeitrag. *Arch Acker- Pflanzenbau Bodenkd* 18:471-487
- McAuliffe C, Peech M, Bradfield M (1949) Utilization by plants of phosphorous in farm manure : II. Availability to plants of organic and inorganic forms of phosphorous in sheep manure. *Soil Sci* 68:185-195
- Mosse B, Powell CL, Haymann DS (1976) Plant growth responses to vesicular arbuscular mycorrhiza. IX. Interactions between V.A. mycorrhiza, rock phosphate and symbiotic nitrogen fixation. *New Phytol* 76:331-342
- Moyer JR, Thomas RL (1970) Organic phosphorous and inositol phosphates in molecular size fractions of a soil organic matter extract. *Soil Sci Soc Amer Proc* 34:80-83
- Munk H, Gross K (1975) Phosphatfraktionierung an langjährig differenziert gedüngten Böden. *Landwirtsch Forsch* 31/I:96-108
- Murmann RP, Peech M (1969) Relative significance of labile and crystalline phosphates in soil. *Soil Sci* 107:249-255
- Olsen SR, Gardener R (1949) Utilization of phosphorous from various fertilizer materials: IV. Sugar, beets, wheat and barley in Colorado. *Soil Sci* 68:163-170
- Paauw van der F (1960) Die optimale Versorgung von Boden und Pflanze mit Phosphor. *Landwirtsch Forsch SH* 14:55-60
- Platzen H, Munk H (1975) Zur Frage nach der optimalen P-Zufuhr auf Böden mit ausreichendem Nährstoffpotential. *Landwirtsch Forsch* 31/I: 258-269
- Pradt D (2003) Verfügbarkeit und Vermarktung von Roh- und Recyclingmaterial aus Sicht der Düngemittelindustrie. In: Proc Symp „Rückgewinnung von Phosphor in der Landwirtschaft und aus Abwasser und Abfall. Berlin, 06.-07. Februar 2003, Umweltbundesamt, Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, ISBN 3-932590-99-6
- Römer W (2003) Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor bei verschiedenen Düngematerialien - insbesondere bei Klärschlamm. In: Proc Symp „Rückgewinnung von Phosphor in der Landwirtschaft und aus Abwasser und Abfall. Berlin, 06.-07. Februar 2003, Umweltbundesamt, Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, ISBN 3-932590-99-6
- Rogasik J, Rosiady I, Fleckenstein J, Haneklaus S, Fan X, Scholz R, Schnug E (2003) Phosphorpotenziale von Tiermehl und Schlachtabfällen sowie Möglichkeiten des Phosphorrecyclings. In: Proc Symp „Rückgewinnung von Phosphor in der Landwirtschaft und aus Abwasser und Abfall. Berlin, 06.-07. Februar 2003, Umweltbundesamt, Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, ISBN 3-932590-99-6
- Rovira AD (1965) Ecology of soil-borne pathogens. Baker KF, Snyder WC (eds) Berkeley : Univ of California Press
- Russell W (1973) Soil conditions and plant growth : A) The residual value of phosphatic fertilizers. London : Longman, pp 594-602
- Sanderson MA, Jones RM (1997) Forage yields, nutrients uptake, soil chemical changes and nitrogen volatilization from bermudagrass treated with dairy manure. *J Prod Agric* 10:266-271
- Sanderson MA, Jones RM, McFarland J, Stroup J, Reed RL, Muir JP (2001) Nutrient movement and removal in a switchgrass biomass filter-stripp system treated with dairy manure. *J Prod Agric* 10:266-271
- Schachtschabel P (1960) Umwandlung der Düngerphosphate im Boden und Verfügbarkeit des Bodenphosphors. *Landwirtsch Forsch SH* 17:30-36
- Schachtschabel P (1976) Kap. XI, Nährstoffe. In: Scheffer F, Schachtschabel P Lehrbuch der Bodenkunde. Stuttgart : Enke, pp 196-264
- Scharafat I, Finck A (1973) Umwandlung und Verfügbarkeit von Rohphosphaten (Hyperphos) verglichen mit aufgeschlossenen Phosphaten unter kontrollierten Temperaturen- und Feuchtebedingungen. *Z Pflanzenernähr Düng Bodenkd* 134:257-267
- Schmidt H, Haccius M (1998) EU regulation “Organic Farming” a legal and agro-ecological commentary on the EU’s council regulation (EEC) No 2092/91, pp 417
- Schnug E, Sparovek B, Storck W, Jering A, Volkgenannt U (2001) The HELCOM Working Group on Agriculture (WGA). *Landbauforsch Völknerode* 51(1/2):5-9

- Schnug E, Rogasik J, Haneklaus S (2003) Methoden und Probleme der Bestimmung des Ausnutzungsgrades von Nährstoffen in Düngemitteln. *Landbauforsch Völkenrode* 53(2) (im Druck)
- Shapiro J (1985) An introductory lecture at the International Symposium "Phosphorous in freshwater ecosystems". *Hydrobiologia* 170:9-17
- Sharma HC, Singh RM (1971) Effect of phosphobacteria culture on the efficiency of phosphatic fertilizers and on the yield of maize. *Indian J Agron* 16:422-424
- Sharpley A, Withers P (1994) The environmentally-sound management of agricultural phosphorous. *Fert Res* 39:133-146
- Sharpley A, Foy B, Withers P (2000) Practical and innovative measures for the control of agricultural phosphorus losses to water : an overview. *J Environ Quality* 29:1-9
- Shaw K (2000) *The Little Book of bad taste. A special selection from: The mammoth book of tasteless lists.* Robinson Publishing 1998
- Suencksen H (1977) Erfahrungsbericht über die Lely-Fräse. *Bauernbl Schleswig-Holstein* 31/127(8):36-38
- Ulrich B (1963) Die Umsetzung der anorganischen Phosphate als Funktion des Kalkpotentials. *Z Pflanzenernähr Düng Bodenkd* 100:97-102
- Ulrich B, Benzler JH (1955) Der anorganisch gebundene Phosphor im Boden. *Z Pflanzenernähr Düng Bodenkd* 70:220-224
- Vermeulen S, Steen I, Schnug E (1998) Nutrient balances at the farm level. In: Proc 11th Int Symp of CIEC "Codes of good fertilizer practice and balanced fertilization". pp 108-123
- Whalen JK, Chang C (2001) Phosphorous accumulation in cultivated soils from long-term annual applications of cattle feedlot manure. *J Environ Quality* 30:229-237
- Werner W (1969) Kennzeichnung des pflanzenverfügbaren Phosphats nach mehrjähriger Düngung mit verschiedenen Phosphaten. *Z Pflanzenernähr Düng Bodenkd* 122:19-32
- Werner W (1970) Untersuchungen zur Pflanzenverfügbarkeit durch langjährige Phosphatdüngung angereicherten Bodenphosphats. 1. Mitt: Die Verfügbarkeit der Umwandlungsprodukte in sauren Böden. *Z Pflanzenernähr Düng Bodenkd* 126:135-150
- Werner W (1971a) Phosphatdynamik in carbonathaltigen Böden. *Dtsch Weinbau* 30-31
- Werner W (1971b) Untersuchungen zur Pflanzenverfügbarkeit durch langjährige Phosphatdüngung angereicherten Bodenphosphats : 2. Mitt: Die Verfügbarkeit von Umwandlungsprodukten mit defekter Apatitstruktur in neutralen und carbonathaltigen Böden. *Z Pflanzenernähr Düng Bodenkd* 129:30-42
- Werner W, Wiechmann H (1972) Untersuchungen zur Pflanzenverfügbarkeit des durch langjährige Phosphatdüngung angereicherten Bodenphosphats : 3. Mitt: Die Verfügbarkeit der Umwandlungsprodukte in neutralen und kalkhaltigen Böden. *Z Pflanzenernähr Düng Bodenkd* 133:3-17
- Wiechmann H, Werner W (1976) Umwandlung von Phosphaten im Boden. *DLG-Mitteilungen* 91:1147-1150