

# Ergebnisse von drei 40jährigen P-Dauerversuchen in Österreich:

## 2. Mitteilung: Auswirkungen unterschiedlicher P-Düngerformen und -mengen auf den P-Entzug und die P-Bilanzen

Th. Lindenthal, H. Spiegel, M. Mazorek, J. Heß, B. Freyer und A. Köchl

### Results of three long-term P-field experiments in Austria

#### 2<sup>nd</sup> Report: Effects of different types and quantities of P-fertiliser on P-uptake and P-balances

### 1. Einleitung

Die auf einem Standort durch Gegenüberstellung der Phosphor (P)-Einträge und -Austräge gewonnenen Input/Output-Bilanzierungen statischer P-Dauerversuche können eine langfristige P-Mobilisierung bzw. P-Anreicherung der Böden in Abhängigkeit von der P-Düngermenge und -art quantifizieren. In diesem Zusammenhang liefern Dauerversuche wertvolle Erkenntnisse über den langfristigen Verbleib von P-Düngern (GRANSEE und MERBACH, 2000; WECHSUNG und PAGEL, 1993).

Wie sich langjährig differenzierte P-Düngung auf die P-Gehalte von Boden und Pflanze sowie schließlich auf die P-Entzüge und die P-Bilanzen auswirkt, ist für Standorte in Deutschland (ORLOWSKI, 1989; WECHSUNG und PAGEL, 1993; STUMPE et al., 1994; ELLMER et al., 2000) und Polen (MERCİK et al., 2000) untersucht worden. ORLOWSKI (1989) sowie WECHSUNG und PAGEL (1993)

ermittelten eine engere Beziehung zwischen P-Düngung und P-Entzügen im Vergleich zur Beziehung P-Düngung und Ertrag.

Auch die Frage der Möglichkeiten und Grenzen einer langjährig stark reduzierten oder gänzlich unterlassenen P-Düngung der Böden ist zu einer für alle Landbausysteme wichtigen ökologischen und letztlich auch ökonomischen Frage geworden (SCHILLING et al., 1995; ECKERT et al., 2000). Um diese Fragestellung hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf den Ertrag sowie die P-Mobilisierung und P-Aufnahme der Pflanze untersuchen zu können, sind Dauerversuche hilfreich (WECHSUNG und PAGEL, 1993; STUMPE et al., 1994; MERBACH et al., 1999; ELLMER et al., 2000; MERCİK et al., 2000).

Über Zusammenhänge zwischen langjährig differenzierter P-Düngung und P-Bilanzen unter den heterogenen Standorts- und klimatischen Bedingungen Österreichs liegen noch wenig Untersuchungsergebnisse vor.

### Summary

The effects of different types (super-phosphate, basic slag and rock-phosphate) and quantities (0, 44 and 175 kg P ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup>) of P-fertiliser application on P-uptake by crops and P-balances were evaluated in three long-term field experiments lasting 40 years. The omission of P-fertiliser during the whole 40-year-period resulted in P-uptakes of Ø 649–694 kg P ha<sup>-1</sup> and considerable negative balances. The fertilisation of 44 kg P ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup> as basic slag and super-phosphate showed higher P-uptake than zero P-fertilisation in 40 years, these differences were statistically significant at all three experimental sites for the last 20 years. When discontinuing P-fertilisation after 20 years of application the annual P-uptakes by crops remained at a high level and differed in the majority of cases not significantly compared to continuous fertilisation. But an annual fertilisation of 44 kg P ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup> had already caused an accumulation of 371–562 kg P ha<sup>-1</sup> in the soil during the first 20 years. After 40 years a balanced P supply in which crop P uptake nearly equalled the P fertiliser rate was assessed at the variants where the fertilisation of 44 kg P ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup> as basic slag and super-phosphate was terminated after 20 years. The different P-fertilisation during 20–40 years affected the P-uptake more strongly than the yields at all three sites. In the majority of cases also the correlations between P<sub>CAL/DL</sub>-contents in soils and P-uptake were closer compared to the crop yields.

**Key words:** P-fertiliser, long-term field experiment, P-uptake, P-balances, crops.

### Zusammenfassung

In drei 40jährigen Dauerdüngungsversuchen wurden die Auswirkungen unterschiedlicher P-Düngermengen (0, 44 und 175 kg P ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>) und P-Düngerformen (Super-, Thomas- und Hyperphosphat) auf den P-Entzug und die P-Bilanzen ausgewertet. In den 40 Jahre nicht gedüngten Parzellen konnten Entzüge bemerkenswerter Größenordnung (Ø 649–694 kg P ha<sup>-1</sup>) und entsprechend stark negative Bilanzen festgestellt werden. Die mit 44 kg P ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> gedüngten Thomas- bzw. Superphosphat-Varianten zeigten im gesamten 40jährigen Versuchszeitraum deutlich höhere P-Entzüge als die ungedüngte Variante (diese Unterschiede waren in den letzten 20 Versuchsjahren auf allen 3 Standorten statistisch signifikant). Bei einem Düngungsstopp nach 20 Jahren blieben die jährlichen Entzüge hoch und unterschieden sich in der Regel nicht signifikant von den entsprechenden Varianten, die laufend gedüngt wurden. Allerdings waren bei einer jährlichen Düngung von 44 kg P ha<sup>-1</sup> bereits in den ersten 20 Jahren 371–562 kg P ha<sup>-1</sup> im Boden akkumuliert worden. Annähernd ausgeglichene Bilanzen wiesen nach 40 Jahren nur die in den ersten 20 Jahren mit 44 kg P ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> als Thomas- und Superphosphat gedüngten Varianten auf.

Durch die 20–40jährige differenzierte P-Düngung wurde auf allen drei Standorten der P-Entzug stärker beeinflusst als die Erträge. Auch die Korrelationen zu den P<sub>CAL/DL</sub>-Gehalten des Bodens waren bei den P-Entzügen meist enger als bei den Erträgen.

**Schlagworte:** Phosphatdünger, Langzeitversuche, P-Entzug, P-Bilanzen, Kulturpflanzen.

Im Jahre 1956 wurden von der Landwirtschaftlich-chemischen Bundesanstalt (heute Teil der Österreichischen Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit) in Wien auf drei sehr unterschiedlichen Standorten P-Dauerdüngungsversuche angelegt, die bis heute durchgeführt werden. Eine detaillierte Versuchsbeschreibung sowie die Auswertung der Ertragsergebnisse und der P<sub>CAL/DL</sub>-Gehalte sind in SPIEGEL et al. (2001) enthalten. In der folgenden Mitteilung werden Ergebnisse zu den P-Entzügen und den P-Bilanzen über die gesamte 40jährige Versuchsdauer (1956–1995) für ausgewählte Varianten der drei Dauerversuche dargestellt. Die P-Entzüge werden mit den P<sub>CAL/DL</sub>-Gehalten im Boden und den Erträgen in Beziehung gesetzt.

## 2. Ziele

Ein wesentliches Ziel der drei Dauerversuche war und ist die langjährige Prüfung unterschiedlicher P-Düngermengen und -formen auf drei bodenkundlich und klimatisch verschiedenen Standorten hinsichtlich deren Auswirkungen auf den Ertrag verschiedener Kulturarten, auf die P-Gehalte im Boden und in der Pflanze sowie auf die P-Entzüge und die P-Bilanzen.

Folgende Fragen werden in dieser Mitteilung vorrangig behandelt:

- In welchem Ausmaß nehmen mit zunehmender P-Düngung die P-Entzüge zu und welche Auswirkungen hat dies auf die P-Bilanzen?

- Welche Rolle spielen die Düngerformen in Hinblick auf die P-Entzüge und die P-Bilanzen?
- Welche Auswirkung hat eine Unterlassung der P-Düngung seit Versuchsbeginn bzw. bei schon angehobener P-Versorgung des Bodens nach 20 Versuchsjahren auf P-Entzüge und P-Bilanzen?
- Besteht ein signifikanter Zusammenhang zwischen P-Entzügen und P<sub>CAL/DL</sub>-Gehalten im Boden?

## 3. Material und Methoden

Die Versuche wurden auf drei Standorten in Niederösterreich, nämlich in Fuchsenbigl (Marchfeld), Rottenhaus (Alpenvorland) und Zwettl (Waldviertel) durchgeführt. Eine kurze bodenkundliche und klimatische Charakteristik gibt Tabelle 1. Detaillierte Angaben zu Standort, Kulturartenverhältnis und Versuchsanlage sind SPIEGEL et al. (2001) zu entnehmen.

Der Versuch gliedert sich in 2 Versuchsabschnitte:

### 1. Versuchsabschnitt 1956–1975:

Die Wirkungen von unterschiedlichen P-Düngermengen (0, 44 kg und 175 kg P ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup>) und P-Düngerformen (Hyper-, Thomas- und zwei Superphosphat-Düngern mit unterschiedlicher Körnung) wurden untersucht (9 Varianten). Die für die Ernte herangezogene Parzellengröße lag zwischen 7 und 50 m<sup>2</sup>.

Tabelle 1: Beschreibung der drei Versuchsstandorte  
 Table 1: Description of the three experimental sites

Merkmale	Fuchsenbigl	Rottenhaus	Zwettl
Seehöhe (m über N.N.)	147	290	511
Jahresniederschlag (mm) ( $\Delta$ 1961–1990)	529	778	661
Jahresmitteltemperatur °C ( $\Delta$ 1961–1990)	9,4	8,4	6,8
Bodentyp	Tschernosem	Braunerde	Braunerde
Ausgangsgestein	Löß	Schwemmaterial	Silikatmaterial
Bodenart	sandiger Lehm	schluffiger Lehm	sandiger Lehm
P <sub>DL</sub> -Gehalt (Versuchsbeginn)	4,2	1,3	6,3
pH in CaCl <sub>2</sub>	7,5	6,6	5,3
Carbonat (CaCO <sub>3</sub> ) in %	13	0	0
Organischer Kohlenstoff in %	1,10	1,40	1,00
Sand/Schluff/Ton in %	40/42/18	3/67/30	48/36/16

 Tabelle 2: Überblick über die Versuchsvarianten der drei Dauerversuche im 2. Versuchsabschnitt (1976-1995) (*kursiv: die nicht in diese Mitteilung einbezogenen Varianten*)

 Table 2: Survey of the variants of the three long-term field experiments in the 2. period (1976-1995) (*in italic: variants not included in this communication*)

Gedüngte Menge (in kg P ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> )	Düngerart			
	Hyperphosphat	Thomasphosphat	Superphosphat	Superphosphat (gekörnt)
44 kg (= P1)	P1 Hyper	P1 Tho	P1 Super	<i>P1 Sugo</i>
44 kg bis zum Jahr 1975 („Nachwirkung“ der P1)	P1 Hyper 1975	P1 Tho 1975	P1 Super 1975	<i>P1 Sugo 1975</i>
175 kg (= P2)	P2 Hyper	P2 Tho	P2 Super	<i>P2 Sugo</i>
175 kg bis zum Jahr 1975 („Nachwirkung“ der P2)	P2 Hyper 1975	P2 Tho 1975	P2 Super 1975	<i>P2 Sugo 1975</i>
ungedüngt	0 – Variante 1 und 2			

Zu Versuchsbeginn erfolgten folgende Abweichung vom Versuchsplan:

- In den Jahren 1956–1960 (–1963 in Fuchsenbigl) wurden die P2-Varianten lediglich mit 44 kg P ha<sup>-1</sup> bzw. 0 kg P ha<sup>-1</sup> gedüngt.
- Im ersten Versuchsjahr (1956) wurde am Standort Zwettl bei der Variante P1 Hyper nur 22 kg P ha<sup>-1</sup> (statt 44 kg P ha<sup>-1</sup>) und bei der Variante P1 Tho 88 kg P ha<sup>-1</sup> (statt 44 kg P ha<sup>-1</sup>) gedüngt.

## 2. Versuchsabschnitt 1976–1995:

Ab 1976 wurde jede Parzelle in eine weiterhin gedüngte und in eine ab diesem Zeitpunkt ungedüngte „Nachwirkungsparzelle“ geteilt. Dabei wurde auch die 0-Parzelle geteilt, sodaß sich 18 Varianten ergeben. Einen Überblick über die ab 1976 angelegten Varianten und jene, die in der vorliegenden Auswertung einbezogenen werden, gibt Tabelle 2. Die für die Ernte herangezogene Parzellengröße lag in diesem Versuchsabschnitt zwischen 5 und 24 m<sup>2</sup>.

In der vorliegenden Auswertung wurden die Düngerformen Hyper-, Thomas- und Superphosphat ausgewählt. Im Gegensatz zur ersten Mitteilung (SPIEGEL et al., 2001) wer-

den in dieser Mitteilung nur Ergebnisse einer der beiden 0-Parzellen dargestellt, da Daten zu den P-Pflanzengehalten der nach der Teilung (1976) eingerichteten zweiten Nullparzelle nur teilweise vorliegen.

Die Stickstoff- und Kalidüngung erfolgte in praxisüblichen Mengen in Abhängigkeit von der Kultur und vom Standort. In allen drei Versuchen wurde über die gesamte 40jährige Versuchsdauer kein organischer Dünger eingesetzt. Weitere Angaben zur Düngung und Bodenbearbeitung sowie eine detaillierte Beschreibung der angebauten Kulturarten (insgesamt wurden auf jedem Standort 11 Kulturarten ohne fixe Fruchtfolge angebaut) sind in SPIEGEL et al. (2001) enthalten. Die Erntereste wurden in allen drei Versuchen von 1956 bis 1991 abgefahren und ebenso wie die Erträge gewichtsmäßig erfaßt. Ab 1992 wurden die Erntereste auf dem Feld belassen.

Die P-Gehalte in Erntegut und Ernterückständen wurden in der Regel ab 1964 jährlich gemessen (für einzelne Kulturen auch schon früher). Die Bestimmung des Phosphats erfolgte in Perchlorsäure- und/oder Salpetersäure-Aufschlüssen mittels photometrischer Kurmiesmethode. Die P-Entzüge wurden auf Basis der gemessenen P-Gehal-

te in der abgeführten Biomasse und der TM-Erträge berechnet. Vor dem Jahr 1964 wurden standort- und variantenspezifische Schätzwerte für die P-Gehalte in der abgeführten Biomasse eingesetzt, die aus dem Mittelwert der 1964 bis 1975 gemessenen P-Gehalte der betreffenden Kulturart und Variante gebildet wurden. Schätzungen bei vereinzelt fehlenden P-Gehalten in Erntegut und Ernterückständen nach 1964 erfolgten mit der gleichen Methode, wobei die P-Gehaltswerte der betroffenen Kulturart – soweit vorliegend – aus 10 Jahren vor und nach deren Anbau herangezogen wurden. Dieses Schätzverfahren wurde gewählt, um die große Streubreite der P-Gehalte in Abhängigkeit von Variante und Standort besser als mit Faustzahlen berücksichtigen zu können.

Die P-Bilanzen wurden berechnet unter Berücksichtigung der P-Zufuhr durch Düngung und Saatgut sowie des P-Entzuges durch Erntegut und Ernterest.

Die statistische Auswertung der P-Entzugssummen erfolgte mittels Varianzanalyse und anschließendem Mittelwertvergleich mit dem Tukey-Test über alle 18 Varianten des jeweiligen Versuches für den Versuchszeitraum 1976–1995. Für den Zeitraum 1956–1975 wurden aufgrund fehlender P-Gehaltsmessungen in einzelnen Jahren und damit verbundener Schätzungen einzelner P-Entzüge (s. oben) keine Varianzanalysen gerechnet. Der Zusammenhang zwischen P-Entzügen und  $P_{CAL/DL}$ -Gehalten im Boden wurde mittels Korrelationen nach Spearman geprüft. Die statistischen Auswertungen erfolgten unter Verwendung des Statistikpaketes SPSS 7.5.

Eine detaillierte Auswertung der Ertragsresultate ist in SPIEGEL et al. (2001) enthalten.

## 4. Ergebnisse

### 4.1 P-Entzüge

Die über die letzten 20 Versuchsjahre (Zeitraum 1976–1995) berechneten P-Entzüge zeigten bei allen drei Dauerversuchen wesentliche Gemeinsamkeiten auf (siehe Tabelle 3). Im besonderen waren dies:

- Die langjährig differenzierte P-Düngung spiegelte sich in großen Unterschieden in den P-Entzügen. Besonders deutlich zeigte sich dies in den sicher verschiedenen P-Entzugssummen der 0-Parzelle und der durchgehend mit Thomas- bzw. Superphosphat gedüngten Varianten. In den praxisunüblichen P2-Stufen von Thomas- und Superphosphat waren jeweils die höchsten P-Entzugssummen festzustellen (395–559 kg P ha<sup>-1</sup>), die sich in Rottenhaus und Zwettl signifikant von den jeweiligen P1-Stufen unterschieden.
- Die Hyperphosphat-Düngung wirkte sich in Rottenhaus und Zwettl stets signifikant auf die P-Entzugssumme aus, auch in jenen Varianten, die ab dem Jahr 1976 nicht mehr gedüngt wurden. In Fuchsenbigl hingegen hatte die Hyperphosphat-Düngung selbst in der P2-Stufe bei jährlicher Düngung über 40 Versuchsjahre keine signifikante Wirkung auf die P-Entzugssumme.

Tabelle 3: P-Entzüge der letzten 20 Versuchsjahre (1976–1995) der drei Dauerversuche bei variiertem Düngung (ausgewählte Varianten): Gesamtentzug in kg P ha<sup>-1</sup>, Signifikanzniveau  $P < 0,05$  (Tukey-Test)

Table 3: Calculated P-uptake of the last 20 years (1976–1995) of the three long-term field experiments with different P-fertilisation (selected variants): total P-uptake (kg P ha<sup>-1</sup>), LSD 0.05 (Tukey)

Variante	Entzug Fuchsenbigl		Entzug Rottenhaus		Entzug Zwettl	
	Summe in 20 Jahren	Signifikanz (P < 0,05) *	Summe in 20 Jahren	Signifikanz (P < 0,05)	Summe in 20 Jahren	Signifikanz (P < 0,05)
0-Parzelle	326	a	325	a	321	ab
P1 Hyper	353	ab	401	b	375	cde
P1 Hyper 1975	348	a	397	b	368	cd
P2 Hyper	361	ab	428	bc	406	def
P2 Hyper 1975	370	ab	418	bc	389	cdef
P1 Tho	504	def	449	cd	393	cdef
P1 Tho 1975	448	cd	420	bc	369	cd
P2 Tho	527	ef	506	e	468	g
P2 Tho 1975	536	f	483	de	462	g
P1 Super	505	def	455	cd	393	cdef
P1 Super 1975	466	cd	396	b	375	cde
P2 Super	559	f	499	e	465	g
P2 Super 1975	549	f	459	cd	395	cdef

\* gleiche Buchstaben zeigen keinen signifikanten Unterschied an

- c) Der Vergleich der P-Entzugssummen der Thomas- und Superphosphat-Varianten zeigte, daß in der jeweiligen Düngungsstufe in der Regel keine signifikanten Unterschiede zwischen diesen beiden Düngerformen bestanden.
- d) Die ab dem Jahr 1976 unterlassene P-Düngung hatte in der P1-Stufe nur einmal (bei Superphosphat in Rottenhaus) und in der P2-Stufe nur zweimal (bei Superphosphat in Rottenhaus und Zwettl) eine signifikant geringere P-Entzugssumme im Vergleich zur jeweiligen durchgehend gedüngten Variante zur Folge.
- a) Die P-Entzüge waren bei der Braunerde (schluffiger Lehm) in Rottenhaus bei allen ausgewählten Varianten am höchsten.
- b) Die P-Entzüge der P1-Tho-Variante waren in Fuchsenbigl um 44 % und in Rottenhaus um 40 % höher als jene der jeweiligen 0-Parzelle, in Zwettl waren es nur 21 %.
- c) In Zwettl bewirkte die Thomasphosphat-Düngung in der P1-Stufe im Vergleich zu P1-Hyperphosphat nur einen um 39 kg P ha<sup>-1</sup> höheren P-Entzug, in Rottenhaus betrug dieser Unterschied hingegen 137 kg und in Fuchsenbigl sogar 249 kg P ha<sup>-1</sup>.

Bei Betrachtung der P-Entzugssummen über die 40jährige Versuchsdauer (siehe Abbildung 1) wurden die erwähnten Ergebnisse in ihren absoluten Unterschieden verstärkt. Dabei ist u. a. hervorzuheben:

- Die 0-Parzelle wies auf allen drei Standorten eine sehr hohe P-Mobilisierung auf. Die P-Entzüge während der 40 Versuchsjahre betragen auf allen drei Standorten in Summe durchwegs weit mehr als 600 kg P ha<sup>-1</sup>.
- Die P-Entzugssummen der Thomas- und Superphosphat-Varianten unterschieden sich sowohl in der P1 wie auch in der P2-Stufe auch nach 40 Jahren nur in geringem Ausmaß.

Standortspezifische Wirkungen unterschiedlicher P-Düngerformen und -mengen auf die P-Entzüge zeigten sich nach 40 Versuchsjahren wie folgt (siehe Abbildung 1):

- d) Die geringsten P-Entzüge der Hyperphosphat-Varianten waren in Fuchsenbigl festzustellen, wobei dort in der P1-Stufe nur um rund 5 % mehr P als in der 0-Parzelle entzogen wurde.
- e) Die P-Entzüge der P1- und P2-Stufe der durchgehend mit Hyperphosphat gedüngten Varianten unterschieden sich voneinander in wesentlich geringerem Ausmaß (24–66 kg P ha<sup>-1</sup>) als dies bei Thomasphosphat (40–141 kg P ha<sup>-1</sup>) und Superphosphat (81–140 kg P ha<sup>-1</sup>) der Fall war. Die geringsten Unterschiede traten stets in Fuchsenbigl auf.

Wie sich eine langjährig unterlassene P-Düngung im Vergleich mit der Düngung von 44 kg P ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup> Thomasphosphat (P1 Tho) auf den P-Entzug einzelner Kulturarten auf den drei Standorten auswirkte, ist anhand von P-Relativent-

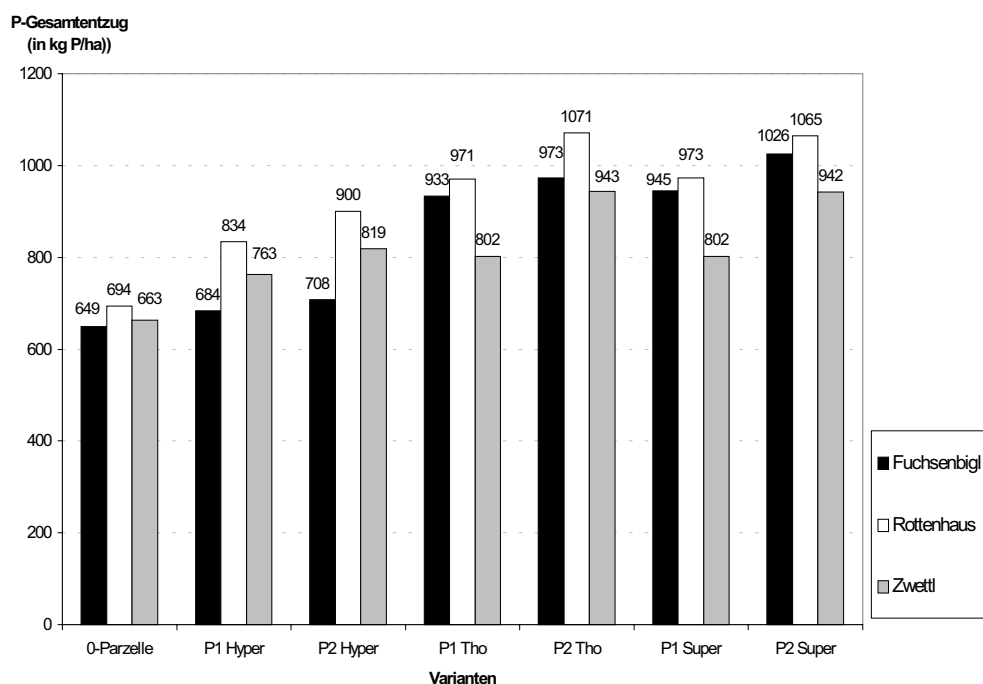


Abbildung 1: P-Entzug im gesamten 40jährigen Versuchszeitraum (1956–1995) der drei Dauerversuche P-uptake in 40 years (1956–1995) of the three long-term field experiments



Tabelle 4: Gegenüberstellung der mittleren Relativträge und der P-Relativentzüge der 0-Parzelle(n) (P1 Tho-Variante = 100 %): Mittel aus 2 bis 4 Jahren aus dem Zeitraum 1976 bis 1995 für alle Hauptkulturen (ohne Ernterest)

Table 4: Comparison of mean relative yields and relative P-uptake of the control(s) (P1 Tho variant = 100 %): mean of 2 to 4 years, in the period 1976–1995 for all main crops (without crop rest)

Kulturart	Fuchsenbigl		Rottenhaus		Zwettl	
	Ertrag <sup>1</sup> Rel. %	Entzug Rel. %	Ertrag Rel. %	Entzug Rel. %	Ertrag Rel. %	Entzug Rel. %
Winterweizen	82– 86	58	94– 96	80	86– 94	86
Sommergerste	75– 81	65	83– 84	78	77– 78	68
Winterroggen	69– 80	57	86– 88	82	96– 98	80
Hafer <sup>2</sup>	91– 97	91	96–108	104	84– 95	100
Zuckerrübe	65– 75	29	67– 68	56		
Körnermais	99–101	78	91– 94 <sup>2</sup>	88		
Silomais					93– 96	74
Kartoffel	78– 88 <sup>2</sup>	55			86– 88	85
Raps <sup>2</sup>	78– 91	57	109–110	86		
Ackerbohne <sup>2</sup>			81– 84	73		
Erbse <sup>2</sup>	82– 88	63			74– 78	76
Rotklee					95–100	91
Luzerne	99–102	76				

<sup>1</sup> Mittlere Erträge der beiden Nullvarianten als Schwankungsbreite dargestellt (s. SPIEGEL et al., 2001)

<sup>2</sup> Ertrag nur aus einem Jahr

Die Mittel aus 2–4 Jahren bei den Relativträgen und P-Relativentzügen resultierten aus der Anbauhäufigkeit der jeweiligen Kulturen

zügen der 0-Parzelle in Tabelle 4 dargestellt (P1 Tho = 100 %). Die Gegenüberstellung der P-Relativentzüge mit den Relativträgen (aus der 1. Mitteilung, SPIEGEL et al., 2001) zeigt, daß die P-Entzüge bei fast allen Kulturarten stärker auf die P-Düngung mit Thomasphosphat reagierten als die Erträge (Tabelle 4). So waren die Relativträge der ungedüngten 0-Parzelle bis auf Hafer (und auf einem Standort bei Erbse) höher als die entsprechenden P-Relativentzüge.

Besonders niedrige P-Relativentzüge der 0-Variante zeigten sich bei der Zuckerrübe auf beiden Standorten, was insbesondere in Fuchsenbigl zu einem sehr deutlichen Unterschied (> 35 %) zwischen Ertrag und P-Entzug in den Relativwerten der 0-Parzelle führte. Die höchste Differenz von Relativtrag und P-Relativentzug der 0-Parzelle war bei den meisten Kulturarten in Fuchsenbigl anzutreffen.

#### 4.2 P-Bilanzen

Da die Superphosphat-Varianten ähnlich hohe P-Entzüge aufwiesen wie die Thomasphosphat-Varianten, wurden nur letztere für die Darstellung der P-Bilanzen ausgewählt. Die errechneten P-Bilanzen der einzelnen Varianten zeigten bei Betrachtung aller drei Versuche folgende Gemeinsamkeiten (Tabelle 5 bis Tabelle 7):

a) Die P-Bilanzen unterschieden sich deutlich in Abhängigkeit von der (stark unterschiedlichen) Düngermenge

und auch – allerdings weit weniger ausgeprägt – in Abhängigkeit von der Düngerart.

b) Die P-Bilanz war in den langjährig nicht mit P gedüngten Varianten stark negativ. Aus dem Bodenvorrat wurden sehr große P-Mengen mobilisiert. Je nach Standort betrug die P-Mobilisierung in Summe während der 40 Versuchsjahre 609 bis 654 kg P ha<sup>-1</sup>.

c) Annähernd ausgeglichene P-Bilanzen wiesen in diesen Versuchen nur die bis 1975 mit 44 kg P ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup> Tho-

Tabelle 5: Errechnete P-Bilanz nach 40 Versuchsjahren (1956–1995) bei variiertem P-Düngung im Dauerversuch Fuchsenbigl

Table 5: Calculated P-balance after 40 experimental years (1956–1995) at different P-fertilisation in the long-term field experiment in Fuchsenbigl

Variante	P-Zufuhr* (kg P ha <sup>-1</sup> )	P-Entzug der Pflanze (kg P ha <sup>-1</sup> )	P-Bilanz (kg P ha <sup>-1</sup> )
0-Parzelle	40	649	-609
P1 Hyper	1786	684	1102
P1 Hyper 1975	913	678	235
P2 Hyper	6194	708	5486
P2 Hyper 1975	2702	717	1985
P1 Tho	1786	933	853
P1 Tho 1975	913	877	36
P2 Tho	5975	973	5003
P2 Tho 1975	2484	982	1502

\* Unterschiedliche P-Zufuhr in den Jahren 1956–1960 (bzw. -1963) bei den P2-Varianten (s. Material und Methoden), für Saatgut wurde in jeder Variante 1 kg P ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> berechnet.

Tabelle 6: Errechnete P-Bilanz nach 40 Versuchsjahren (1956–1995) bei variiertem P-Düngung im Dauerversuch Rottenhaus

Table 6: Calculated P-balance after 40 experimental years (1956–1995) at different P-fertilisation in the long-term field experiment in Rottenhaus

Variante	P-Zufuhr* (kg P ha <sup>-1</sup> )	P-Entzug der Pflanze (kg P ha <sup>-1</sup> )	P-Bilanz (kg P ha <sup>-1</sup> )
0-Parzelle	40	694	-654
P1 Hyper	1786	834	952
P1 Hyper 1975	913	830	83
P2 Hyper	6194	900	5294
P2 Hyper 1975	2702	889	1813
P1 Tho	1786	971	814
P1 Tho 1975	913	942	-29
P2 Tho	6368	1071	5297
P2 Tho 1975	2877	1048	1829

\* Unterschiedliche P-Zufuhr in den Jahren 1956-1960 bei den P2-Varianten (s. Material und Methoden), für Saatgut wurde in jeder Variante 1 kg P ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> berechnet.

Tabelle 7: Errechnete P-Bilanz nach 40 Versuchsjahren (1956–1995) bei variiertem P-Düngung im Dauerversuch Zwettl

Table 7: Calculated P-balance after 40 experimental years (1956–1995) at different P-fertilisation in the long-term field experiment in Zwettl

Variante	P-Zufuhr* (kg P/ha <sup>-1</sup> )	P-Entzug der Pflanze (kg P ha <sup>-1</sup> )	P-Bilanz (kg P ha <sup>-1</sup> )
0-Parzelle	40	663	-623
P1 Hyper	1764**	763	1001
P1 Hyper 1975	891**	755	136
P2 Hyper	6194	819	5375
P2 Hyper 1975	2702	803	1899
P1 Tho	1829***	802	1027
P1 Tho 1975	956***	778	178
P2 Tho	6215	943	5272
P2 Tho 1975	2724	937	1787

\* Unterschiedliche P-Zufuhr in den Jahren 1956-1961 bei den P2-Varianten (s. Material und Methoden), für Saatgut wurde in jeder Variante 1 kg P ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> berechnet.

\*\* Im Jahr 1956 wurden nur 22 kg (statt 44 kg) P ha<sup>-1</sup> gedüngt (s. Material und Methoden).

\*\*\* Im Jahr 1956 wurden 88 kg (statt 44 kg) P ha<sup>-1</sup> gedüngt (s. Material und Methoden).

masphosphat und Superphosphat gedüngten Varianten in Fuchsenbigl und Rottenhaus auf (dies entspräche in diesen Varianten einem Düngeraufwand von nur 22 kg P ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup> im Durchschnitt der 40 Versuchsjahre).

d) Auf allen drei Standorten resultierten große P-Bilanzüberschüsse bereits in der durchgehend gedüngten P1-Stufe (44 kg P ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup>). Nach 40 Versuchsjahren wurden

die Bodenvorräte der P1-Varianten um 814 bis 1102 kg P ha<sup>-1</sup> erhöht.

- e) Weit höher fielen die P-Bilanzüberschüsse aller durchgehend mit 175 kg P ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup> gedüngten (P2-)Varianten aus: Mehr als 5000 kg P ha<sup>-1</sup> wurden im gesamten Versuchszeitraum in den Böden der drei Standorte bei diesen Varianten akkumuliert.
- f) Die P1-Düngung mit Hyperphosphat hatte im Vergleich zu P1-Thomasphosphat und -Superphosphat infolge geringerer P-Entzüge einen dementsprechend erhöhten P-Bilanzüberschuß in Fuchsenbigl und Rottenhaus zur Folge (um 138 bis 249 kg P ha<sup>-1</sup>). In Zwettl hatte der um 39 kg P ha<sup>-1</sup> höhere P-Entzug der P1 Tho-Variante im Vergleich zu P1 Hyper keine Entsprechung in einem geringeren P-Bilanzüberschuß, da die P-Zufuhr auf diesem Standort aufgrund einer anderen Konzeption im ersten Versuchsjahr 1956 zwischen P1 Tho und P1 Hyper um 66 kg P ha<sup>-1</sup> variierte (s. Material und Methoden).

### 4.3 Beziehung zwischen P-Entzug und P<sub>CAL/DL</sub>-Gehalt im Boden

Für die Kulturen Sommergerste, Winterweizen und Zuckerrübe waren über alle Varianten meist hochsignifikante Korrelationen zwischen dem P-Entzug und den P<sub>CAL/DL</sub>-Gehalten im Boden festzustellen (Tabelle 8), wobei die Werte aus den Einzeljahren teilweise noch höhe-

Tabelle 8: Beziehung zwischen P-Entzug und P<sub>CAL/DL</sub>-Gehalt im Boden für Sommergerste, Winterweizen und Zuckerrübe der drei Dauerversuche Fuchsenbigl, Rottenhaus und Zwettl im Zeitraum 1976-1995 (Korrelation nach Spearman, über alle 18 Varianten gerechnet)

Table 8: Correlation between P-uptake and P<sub>CAL/DL</sub>-contents in soil for spring barley, winter wheat and sugar beet during the three long-term field experiments in Fuchsenbigl, Rottenhaus and Zwettl from 1976-1995 (correlation according to Spearman, calculated with all 18 variants)

Kulturart	Fuchsenbigl	Rottenhaus	Zwettl
Sommergerste (Werte aus 3–4 Jahren)	r = 0,676**	r = 0,250**	r = 0,423**
Winterweizen (Werte aus 2–3 Jahren)	r = 0,08 n.s.	r = 0,444**	r = 0,481**
Zuckerrübe (Werte aus 1–2 Jahren)	r = 0,804**	r = 0,524**	In Zwettl nicht angebaut

\*\*\* P < 0.001, \*\* P = 0.01-0.001, \* P = 0.01-0.05, n.s. = no significant differences

Die Mittel aus 2-4 Jahren resultieren aus der Anbauhäufigkeit der jeweiligen Kulturen.

re Korrelationskoeffizienten aufwiesen (z. B. bei Sommergerste und Winterweizen in Rottenhaus und Zwettl ist in einzelnen Jahren  $r = 0,60$  bis  $0,73$ ). Im Vergleich zum Verhältnis Ertrag –  $P_{\text{CAL/DL}}$ -Gehalt (vgl. SPIEGEL et al., 2001) waren die Korrelationen der P-Entzüge zu den  $P_{\text{CAL/DL}}$ -Gehalten im Boden in der Regel enger.

## 5. Diskussion

### 5.1 P-Entzüge

Auf allen drei sehr unterschiedlichen Standorten waren hohe P-Entzüge der 0-Parzellen festzustellen. Die P-Entzüge überstiegen im 2. Versuchsabschnitt (1976-1995)  $320 \text{ kg P ha}^{-1}$ , wesentlich bedingt durch ein anhaltend hohes Halmfrucht-Ertragsniveau der 0-Parzellen in diesem Zeitraum (z. B. bei Getreide 69 bis 108 % der Erträge der P1 Tho-Variante, SPIEGEL et al., 2001). Der langjährige P-Düngungsverzicht dürfte daher eine erhebliche P-Mobilisierung aus den Bodenvorräten zur Folge gehabt haben. Dies steht in guter Übereinstimmung mit den beachtlichen P-Entzügen der 0-Parzellen aus den Bodenvorräten in den Dauerversuchen in Bad Lauchstädt, Halle und Thyrow (P-Entzug der P0-Parzellen: 9 bis  $21 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ; WECHSUNG und PAGEL, 1993; STUMPE et al., 1994; PAGEL et al., 1982 und 1996; ELLMER et al., 2000; GRANSEE und MERBACH, 2000).

Bemerkenswert in diesem Zusammenhang ist, daß es trotz P-Entzügen in den Nullparzellen zwischen  $649$  und  $694 \text{ kg P ha}^{-1}$  zu praktisch keiner Abnahme der CAL/DL-Gehalte während der 40jährigen Versuchsdauer kam (SPIEGEL et al., 2001).

Die von SCHACHTSCHABEL und BEYME (1980) gefundene P-Mobilisierung schwer löslicher Phosphate bei häufiger und wiederholter Verarmung an löslichen Phosphaten dürfte bei den 0-Parzellen der drei Standorte, insbesondere in Rottenhaus und Zwettl ( $P_{\text{CAL/DL}}$ -Gehalte meist kleiner  $10 \text{ mg P}_2\text{O}_5/100\text{g}$ ) eine wichtige Rolle gespielt haben. In den letzten Jahren wurde auch verstärkt die Bedeutung der Aktivität der Pflanzenwurzeln bzw. der Mikroflora in der Rhizosphäre für die P-Pflanzenverfügbarkeit – insbesondere an P-Mangelstandorten – nachgewiesen (Überblick in HINSINGER, 2001; HORST et al., 2001; JUNGK, 2001; STEINGROBE 2001). Hinzuweisen ist auch darauf, daß während des gesamten 40jährigen Versuchszeitraumes keine organische Düngung erfolgte und bis 1991 auch die Rückführung von Ernteresten unterblieb, sodaß die P-Mobilisierung schwerer löslicher organischer P-Fractionen aufgrund eines hohen

Humusgehaltes und einer hohen mikrobiellen Aktivität (OBERSON et al., 1993) in diesen Versuchen wahrscheinlich eine geringere Rolle gespielt haben dürfte.

Die Ergebnisse aus den Dauerversuchen in Halle zeigten auch, daß der  $P_{\text{CAL/DL}}$ -Wert im Oberboden nur einen Teil der P-Entzüge und Erträge erklären kann, da die P-Mobilisierung und P-Aufnahme aus dem Unterboden eine große Bedeutung hat, die noch nicht vollständig geklärt ist (STUMPE et al., 1994; GRANSEE und MERBACH, 2000). Der Unterboden dürfte auch auf den drei österreichischen Versuchsstandorten aufgrund der Gründigkeit der Böden eine wichtige Rolle in der P-Versorgung gespielt haben. Dies wird durch die Tatsache erhärtet, daß in allen drei Dauerversuchen mehrjährige Luzerne und Klee gras aber auch Mais angebaut wurden, die alle in tieferen Bodenschichten wurzeln und P aus dem Unterboden verstärkt aufnehmen können. Das hohe P-Aufschlußvermögen vieler Leguminosen, insbesondere mehrjähriger, ist seit längerem nachgewiesen (RÜBENSAM und RAUHE, 1969; zit. in NOWACK, 1990). So ist es zu erklären, daß auf allen Standorten bei den angebauten Leguminosen-Gemengen und bei Luzerne (es wurden hier nur die Ergebnisse des zweiten Versuchsabschnittes mitgeteilt, s. Tabelle 4) eine hohe P-Mobilisierung in den 0-Parzellen festzustellen war, was sich in hohen Erträgen und P-Entzügen bzw. in einer geringen Wirkung der P-Düngung auf den Ertrag und auch auf den P-Entzug zeigte.

In Zwettl wurde ein wesentlich höherer Anteil an Leguminosengemengen (Klee gras, Hafer-Wickengemenge) in der Kulturabfolge angebaut (insbesondere im ersten Versuchsabschnitt bis 1975). Über die 40jährige Versuchsdauer betrachtet, waren in Zwettl die P-Gesamtentzüge bei der praxisangeneherten P1-Tho-Variante in Relation zu der 0-Parzelle deutlich geringer als in Fuchsenbigl und Rottenhaus. Dies deswegen, weil die Ertragswirkung der P-Düngung bei den Leguminosengemengen, auch absolut gesehen, kaum vorhanden war (SPIEGEL et al., 2001) und somit die P-Entzüge der 0-Parzelle in Relation zur P1-Tho-Variante deutlich höher waren als bei den getreideintensiveren Kulturabfolgen in Fuchsenbigl und Rottenhaus.

WECHSUNG (1990) konnte das hohe P-Aufschlußvermögen von Leguminosen – u. a. anhand der  $P_{\text{DL}}$ -Gehalte – nur für die ungedüngte Variante (0-Variante mit und ohne 2jährige Luzerne) nachweisen, nicht jedoch für die NK- und NPK-Variante.

Auffällig ist, daß von den 0-Parzellen der drei Standorte jene in Rottenhaus den höchsten P-Entzug aufwies, wie auch die P-Entzüge aller durchgehend gedüngten Varianten



an diesem Standort am höchsten waren, obwohl extrem niedrige  $P_{CAL}$ -Werte vorlagen (s. SPIEGEL et al., 2001). Zum einen dürften die P-Mobilisierungsbedingungen für schwerer lösliche P-Fractionen bei diesen Standorteigenschaften (pH bei 6,6, höchster  $C_{org}$  der drei Standorte mit 1,4 %) günstig gewesen sein, insbesondere auch aus bodenbiologischer Sicht (SEELING, 1992; SCHELLER, 1992). Die in Rottenhaus gemessenen hohen Relativerträge der 0-Parzelle in Relation zur P1-Stufe von Thomasphosphat (z. B. bei Getreide 83–108 %, SPIEGEL et al., 2001) unterstützen diese These. Zum anderen könnte das auf den – im Vergleich zu Fuchsenbigl und Zwettl – hohen Anteil an Zuckerrüben in der Kulturabfolge auf diesem Standort (22 %-Anteil) zurückzuführen sein, d. h. auf den hohen P-Entzug über Zuckerrübe und -blatt.

Die Düngung mit Thomas- und Superphosphat wirkte sich im Vergleich zu Hyperphosphat erwartungsgemäß stärker auf den P-Entzug aus. Darauf wiesen bereits SCHÜLLER et al. (1975) hin. Die P-Gehalte in der Pflanze bei beiden Thomasphosphat-Abstufungen waren bei nahezu allen Getreide- und Hackfruchtarten am höchsten, was im Einklang mit Untersuchungen von ORLOWSKI (1989) steht.

Bemerkenswert ist, daß bei nahezu allen Standorten die ab 1976 ungedüngten Varianten in der Regel keine signifikant geringeren P-Entzüge aufwiesen als die entsprechenden Varianten, die laufend gedüngt wurden. Dies dürfte auf die hohen P-Überschüsse im Zeitraum 1956–1975 (s. Kap. 5.2) und damit verbunden auf hohe Vorräte an verfügbarem P zurückzuführen sein.

## 5.2 P-Bilanzen und Korrelationen zwischen P-Entzug und $P_{CAL/DL}$ -Gehalt im Boden

Bei Analyse der P-Bilanzen war festzustellen, daß die P-Nachlieferung auf allen drei Standorten hoch war, was die negativen P-Bilanzen der 0-Parzellen (609 bis 654 kg P ha<sup>-1</sup> nach 40 Versuchsjahren) anzeigten.

In der P1-Stufe wurden bereits in den ersten 20 Versuchsjahren beachtliche Mengen an P im Boden akkumuliert (371 bis 562 kg P ha<sup>-1</sup>), sodaß in den Folgejahren in jenen Varianten, die nicht mehr mit P gedüngt wurden, ein Teil des akkumulierten P verfügbar gewesen sein dürfte (vgl. WECHSUNG und PAGEL, 1993). Dies könnte jedenfalls zum Teil auch die nicht signifikanten Ertragsrückgänge der ab 1976 unterlassenen Düngung (vgl. SPIEGEL et al., 2001) erklären. Auch JUNGK et al. (1993) stellten bei der Auswertung langfristiger Feldversuche fest, daß früher angereicher-

tes Phosphat weitgehend pflanzenverfügbar geblieben ist.

Annähernd ausgeglichene P-Bilanzen wiesen nur die bis 1975 mit 44 kg P ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup> Thomasphosphat und Superphosphat gedüngten Varianten in Fuchsenbigl und Rottenhaus auf. Dies ist leicht nachvollziehbar angesichts der hohen P-Mengen in der P1-Stufe, die den Entzug z.T. um das Doppelte überstiegen. Nur in diesen Varianten (dies entspräche einer Düngung von 22 kg P ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup> gemittelt über die 40 Versuchsjahre) konnte durch hohe P-Entzüge zumindest über 40 Versuchsjahre die 20jährige überschüssige P-Düngung ausgeglichen werden. Aus den Dauerversuchen in Bad Lauchstädt sowie Halle ließen sich ausgeglichene Bilanzen (+/- 0) bei einer P-Düngung von 12,9 bzw. etwa 21 kg P ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup> errechnen (WECHSUNG und PAGEL, 1993; STUMPE et al., 1994).

Am höchsten fielen erwartungsgemäß die P-Bilanzüberschüsse aller durchgehend mit 175 kg P ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup> gedüngten (P2-) Varianten aus. Auf allen drei Standorten wurden in den 40 Jahren mehr als 5000 kg P ha<sup>-1</sup> in den Böden dieser Varianten akkumuliert, was angesichts der P-Vorräte von etwa 1500 bis 2600 kg P ha<sup>-1</sup> (in 0–20 cm Bodentiefe) an diesen drei Standorten (LINDENTHAL, 2000) bereits weit die geogenen Flüsse übersteigt.

Bei der P2-Stufe von Thomas- und Superphosphat konnte die Pflanze zwar ihre Erträge im Vergleich zur P1-Stufe nicht mehr steigern (vgl. SPIEGEL et al., 2001), sehr wohl aber aufgrund von P-Luxuskonsum ihre P-Gehalte erhöhen, sodaß in den P2-Stufen von Thomas- und Superphosphat deutlich höhere P-Entzugssummen gemessen wurden, die sich denn auch für den Zeitraum 1976–1995 in Rottenhaus und Zwettl signifikant von den jeweiligen P1-Stufen unterschieden.

Der – im Vergleich zu den Erträgen – stärkere Einfluß der P-Düngung auf die P-Entzüge wurde bereits von SCHÜLLER et al. (1975) nach 18 Versuchsjahren festgestellt. Daß auch in Rottenhaus hochsignifikante Korrelationen zwischen den P-Gehalten im Boden und den P-Entzügen vorlagen, zeigte, daß bei standortspezifischer Betrachtung auch im Niedriggehaltbereich von  $P_{CAL/DL}$  hochsignifikante Gehalts-Entzugs-Beziehungen gefunden werden können (vgl. SPIEGEL et al., 2001).

## Literatur

- ECKERT, H., G. BREITSCHUH and D. R. SAUERBECK (2000): Criteria and standards for sustainable agriculture. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 163, 337–351.

- ELLMER, F., H. PESCHKE, W. KÖHN, F.-M. CHMIELEWSKY and M. BAUMECKER (2000): Tillage and fertilizing effects on sandy soils. Review and selected results of long-term experiments at Humboldt-University Berlin. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 163, 267–272.
- GRANSEE, A. and W. MERBACH (2000): Phosphorus dynamics in a long-term P fertilization trial on Luvic Phaeozem at Halle. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 163, 353–357.
- HINSINGER, P. (2001): Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant and Soil* 237, 173–195.
- HORST, W. J., M. KAMH, J. M. JIBRIN and V. O. CHUDE (2001): Agronomic measures for increasing P availability to crops. *Plant and Soil* 237, 211–223.
- JUNGK, A., N. CLAASSEN, V. SCHULZ und J. WENDT (1993): Pflanzenverfügbarkeit der Phosphatvorräte ackerbaulich genutzter Böden. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 156, 397–406.
- JUNGK, A. (2001): Root hairs and the acquisition of plant nutrients from soil. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 164, 121–129.
- LINDENTHAL, T. (2000): Phosphorvorräte in Böden, betriebliche Phosphorbilanzen, und Phosphorversorgung im Biologischen Landbau – Ausgangspunkte für die Bewertung einer großflächigen Umstellung ausgewählter Bundesländer Österreichs auf Biologischen Landbau hinsichtlich des P-Haushaltes. Dissertation, Universität für Bodenkultur Wien.
- MERBACH, W., L. SCHMIDT und L. WITTENMAYER (Hrsg.) (1999): Die Dauerdüngungsversuche in Halle (Saale): Beiträge aus der Hallenser Pflanzenernährungsforschung. Teubner Verlag, Stuttgart, Leipzig.
- MERCIK, S., W. STEPIEN and J. LABETOWICZ (2000): The fate of nitrogen, phosphorus and potassium in long-term experiments in Skierniewice. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 163, 273–278.
- OBERSON, A., S. K. GUPTA, J.-M. BESSON und H. STICHER (1993): DOK-Versuch: vergleichende Langzeituntersuchungen in drei Anbausystemen Biologisch-dynamisch, Organisch-biologisch und Konventionell – III. Boden: Phosphordynamik. *Schweiz. landw. Forsch.* 32 (1/2), 219–228.
- ORLOWSKI, R. (1989): Untersuchungen zur Wechselwirkung von mineralischer und organischer Düngung am Nährstoffmangelversuch Rauischholzhausen. Dissertation, Universität Gießen.
- PAGEL, H., E. SCHNIEDER, H. BENKENSTEIN und W. KRÜGER (1982): Einfluß langjährig differenzierter Düngung auf Kapazitäts-, Quantitäts- und Intensitätswerte des Bodenphosphates im Statischen Nährstoffmangelversuch Thyrow. *Arch. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenkunde* 26, 655–664.
- PAGEL, H., H. BENKENSTEIN, W. KRÜGER und M. BAUMECKER (1996): P- und K-Status des Bodens in den P- und K-Mangelvarianten des Thyrower Statischen Nährstoffmangelversuches nach 55 jähriger Versuchsdauer. *Mitt. d. Deutschen Bodenkundl. Ges.* 79, 271–274.
- RÜBENSAM, P. und G. RAUHE (1969): Boden, Klima, Düngung und Ertrag. In: NOWACK, K.-H. (1990): Phosphorversorgung biologisch bewirtschafteter Äcker und Möglichkeiten der Bioindikation. Dissertation, Universität Göttingen.
- SCHACHTSCHABEL, P. und B. BEYME (1980): Löslichkeit des anorganischen Bodenphosphors und Phosphatdüngung. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 143, 306–316.
- SCHELLER, E. (1992): Die Düngungspraxis im Ökologischen Landbau – unverantwortlich oder wissenschaftlich fundiert? In: VOGTMANN, H. (Hrsg.): Ökologische Landwirtschaft – Landbau mit Zukunft. Verlag Müller, Karlsruhe. *Alternative Konzepte* 70, 93–110.
- SEELING, B. (1992): Beitrag des organisch gebundenen Bodenphosphors zur P-Versorgung der Pflanze. Dissertation, Universität Göttingen.
- SCHILLING, G., H. STUMPE und A. GRANSEE (1995): Möglichkeiten zur Einsparung von Mineraldüngergaben am Beispiel des Phosphates. *Wissenschaftliche Beiträge* 3. Hochschultage der Landwirtschaftlichen Fakultät der Universität Halle, 99–105.
- SCHÜLLER, H., TH. REICHARD und K. NEMETH (1975): Beziehungen zwischen P-Düngung, Ertrag, P-Entzug und Methoden der Bodenuntersuchung. 1. Mitt., *Landw. Forschung* 28 (2), 147–157.
- SPIEGEL, H., T. LINDENTHAL, M. MAZOREK, A. PLONER, B. FREYER und A. KÖCHL (2001): Ergebnisse von drei 40jährigen P-Dauerversuchen in Österreich: 1. Mitteilung: Auswirkungen ausgewählter P-Düngerformen und -mengen auf den Ertrag und die  $P_{CAL/DL}$ -Gehalte im Boden. *Die Bodenkultur* 52 (1), 3–17.
- STEINGROBE, B. (2001): Root renewal of sugar beet as a mechanism of P uptake efficiency. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 164, 533–539.
- STUMPE, H., J. GARZ und H. SCHARF (1994): Wirkung der Phosphatdüngung in einem 40-jährigen Dauerversuch auf einer Sandlöß-Braunerde in Halle. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 157, 105–110.
- WECHSUNG, G. (1990): Einfluß langjährig differenzierter Düngung auf P-Bilanz und P-Zustand des Bodens im

„Statischen Dauerversuch“ Lauchstädt. Dissertation, Humboldt-Universität Berlin.

WECHSUNG, G. und H. PAGEL (1993): Akkumulation und Mobilisation von Phosphaten in einer Schwarzerde im statischen Dauerversuch Lauchstädt – Betrachtung der P-Bilanz nach 84 Versuchsjahren. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 156, 301–306.

### **Anschrift der Verfasser**

**Dr. Dipl.-Ing. Thomas Lindenthal, Univ. Prof. Dr. Bernhard Freyer**, Universität für Bodenkultur, Institut für Ökologischen Landbau, Gregor-Mendelstraße 33, A-1180 Wien; e-mail: Thomas.Lindenthal@boku.ac.at

**Dr. Heide Spiegel, Manfred Mazorek, HR Dipl.-Ing. Arnold Köchl**, Österr. Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit, Spargelfeldstraße 192, A-1226 Wien

**Univ. Prof. Dr. Jürgen Heß**, Universität Gesamthochschule Witzenhausen, Fachgebiet Ökologischer Landbau, Nordbahnhofstraße 1a, D-37213 Witzenhausen

Eingelangt am 5. Oktober 2001

Angenommen am 17. Dezember 2001