

Ergebnisse von drei 40-jährigen P-Dauerversuchen in Österreich

1. Mitteilung: Auswirkungen ausgewählter P-Düngerformen und -mengen auf den Ertrag und die $P_{CAL/DL}$ -Gehalte im Boden

H. Spiegel, T. Lindenthal, M. Mazorek, A. Ploner, B. Freyer und A. Köchl

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

1st Report: Effects of different types and quantities of P-fertiliser on yields and $P_{CAL/DL}$ -contents in soils

1. Einleitung

Die kurz- und langfristige Wirkung unterschiedlicher P-Düngermengen und P-Düngerformen auf Ertrag und P-Status des Bodens unter Berücksichtigung unterschiedlicher Standortbedingungen bilden seit mehreren Jahrzehnten eine zentrale Frage der P-Ernährung bzw. der Ermittlung des P-Düngerbedarfs (SCHÜLLER et al., 1975; KÖCHL, 1977 und 1979; MENGEL, 1986; WERNER, 1990).

Diese Fragen sind auch deswegen von Bedeutung, weil einerseits natürliche P-Lagerstättenvorräte begrenzt sind (ANONYM, 1976; CORBRIDGE, 1990; FINCK, 1992; HODGE, 1994) und andererseits zunehmend Probleme mit Eutrophierung oberflächennaher Gewässer durch die überhöhte P-Düngung der vergangenen Jahrzehnte (PAGEL, 1987; WERNER, 1991; UBA Berlin, 1994; HECKRATH, 1998; DEL CAMPILLO et al., 1999; LEINWEBER et al., 1999)

aufzutreten. Somit ist auch die Frage der Möglichkeiten und Grenzen einer reduzierten oder gänzlich unterlassenen P-Düngung der Böden zu einer wichtigen ökologischen aber letztlich auch ökonomischen Frage geworden. Auf Auswirkungen solcher einer limitierten P-Düngung bezüglich der Entwicklung der Erträge und der P-Gehalte im Boden weisen die Ergebnisse von P-Langzeitversuchen hin (PAGEL, 1987; ORLOWSKI, 1989; JOHNSTON and POULTON, 1992; JUNGK et al., 1993; WECHSUNG und PAGEL, 1993; STUMPE et al., 1994; KÖRSCHENS und PFEFFERKORN, 1999).

Unter den heterogenen standörtlichen und klimatischen Bedingungen Österreichs liegen bezüglich der Frage, wie in ihrer Ausgangssituation unterschiedlich mit Phosphor versorgte Böden auf eine langfristig unterlassene P-Düngung reagieren, noch wenig Erkenntnisse vor. Darüber hinaus ist angesichts der zunehmenden Verbreitung des Biologischen Landbaus in Österreich (EDER, 1998) und die u. a. damit

Summary

The effects of different types (superphosphate, basic slag and rockphosphate) and quantities (0, 44 and 175 kg P ha⁻¹ a⁻¹) of P-fertiliser application on crop yields and $P_{CAL/DL}$ -contents in soils were evaluated in three long-term field experiments lasting 40 years.

After 20 to 40 years of application of 44 kg P ha⁻¹ a⁻¹ as superphosphate and basic slag crop yields increased in comparison to zero P-fertilisation. These differences are statistically significant (Tukey test) for spring barley (at three sites), sugar beet and potato (at one site each). The omission of P-fertiliser during the whole 40 year period caused great economic losses in these root crops in a conventional cultivation regime. No statistically significant yield decreases were observed when discontinuing P-fertilisation after 20 years of application compared to continuous fertilisation. After 20 years of application of 44 kg P ha⁻¹ a⁻¹ the soil $P_{CAL/DL}$ -contents were at a medium stage (less at one site with heavily textured soil) and decreased only slowly in 20 years of zero application. In the case of zero fertilisation during 40 years the soil $P_{CAL/DL}$ -contents remained at almost the same level.

The correlations between spring barley, winter wheat and sugar beet yields and $P_{CAL/DL}$ -contents in soils are significant and highly significant, the coefficients of determination show that other factors are also important for crop yields.

Key words: P-fertiliser, soil-P, long-term field experiment, cereals, root crops.

Zusammenfassung

In drei 40-jährigen Dauerdüngungsversuchen wurden die Auswirkungen unterschiedlicher P-Düngermengen (0, 44 und 175 kg P ha⁻¹ a⁻¹) und P-Düngerformen (Super-, Thomas- und Hyperphosphat) auf Pflanzenerträge und P_{CAL/DL}-Gehalte im Boden ausgewertet. Nach 20- bis 40-jähriger Versuchsdauer bewirkt eine Düngung von 44 kg P ha⁻¹ a⁻¹ als Thomas- und Superphosphat Ertragsanstiege im Vergleich zur Nulldüngung. Diese sind statistisch signifikant (Tukey-Test) bei Sommergerste (auf allen drei Standorten), Zuckerrübe und Kartoffel (jeweils auf einem Standort). V.a. für diese Hackfrüchte hat eine Unterlassung der P-Düngung über die gesamte 40-jährige Versuchsdauer gravierende wirtschaftliche Nachteile bei konventioneller Bewirtschaftung. Zu keinen statistisch signifikanten Ertragsreduktionen verglichen mit den weiterhin gedüngten Varianten kommt es bei einem Düngungsstopp nach 20jähriger Düngung. Zum Zeitpunkt des Abbruchs der P-Düngung waren die P_{CAL/DL}-Werte zumindest über 10 mg P₂O₅/100g Boden und somit im mittleren Gehaltsbereich (in Rottenhaus auch darunter) gelegen, und sanken in der 20jährigen Nachwirkungsphase nur langsam ab. Bei den durch 40 Jahre nicht gedüngten Nullvarianten ändern sich trotz anhaltend hoher Erträge die P_{CAL/DL}-Gehalte des Bodens auf allen drei Standorten kaum.

Die Korrelationen zwischen dem Ertrag von Sommergerste, Winterweizen, Zuckerrübe und den P-Bodengehalten sind zwar signifikant bis hochsignifikant, aus den Bestimmtheitsmaßen ist jedoch abzulesen, dass weitere wichtige Einflussgrößen das Ertragsgeschehen bestimmen.

Schlagnworte: Phosphatdünger, Langzeitversuche, P-Bodengehalte, Getreide, Hackfrüchte.

verbundene Reduktion und Veränderung des Einsatzes von mineralischen P-Düngermengen und -formen (WEBER et al., 1997) eine langfristige Abschätzung und Beurteilung der P-Versorgung unter diesen Produktionsbedingungen von Interesse. Ergebnisse aus P-Langzeitdüngungsversuchen sind dabei für den Biologischen Landbau von besonderer Bedeutung (vgl. SCHELLER, 1992). Im Jahre 1956 wurden von der Landwirtschaftlich-chemischen Bundesanstalt, heute Bundesamt und Forschungszentrum für Landwirtschaft, in Wien auf drei sehr unterschiedlichen Standorten P-Dauerdüngungsversuche angelegt, die bis heute andauern. Diese Versuche bildeten die Grundlage für die CAL-Methode zum Nachweis des P-Versorgungsstatus im Boden (siehe SCHÜLLER, 1969; REICHARD, 1969) und dienten seither u.a. zur Berechnung wirtschaftlich optimaler P-Düngermengen (KÖCHL, 1988).

2. Ziele

Übergeordnetes Ziel der drei Dauerversuche war und ist u. a. die Prüfung unterschiedlicher Phosphatformen und -mengen auf drei bodenkundlich und klimatisch verschiedenen Standorten hinsichtlich ihrer langfristigen Auswirkungen auf den Pflanzenertrag, die P-Gehalte im Boden und in der Pflanze sowie auf die P-Entzüge bzw. die P-Bilanzen.

Der folgende Beitrag soll Ergebnisse zu den Erträgen aus dem Versuchszeitraum 1976-1995 sowie die P_{CAL/DL}-

Gehalte im Boden in ihrer langjährigen Dynamik und in ihrem standörtlichen Vergleich über die 40-jährige Versuchsdauer (1956-1995) darstellen.

Folgende Fragen werden vorrangig behandelt:

- In welchem Ausmaß nehmen mit zunehmender P-Düngung die Erträge der Kulturpflanzen und die P_{CAL/DL}-Gehalte des Bodens zu?
- Welche Rolle spielen die Düngerformen in der Ertragswirkung und in der Veränderung der P_{CAL/DL}-Gehalte des Bodens?
- Welche Auswirkung hat eine Unterlassung der P-Düngung seit Versuchsbeginn bzw. bei schon angehobener P-Versorgung des Bodens nach 20 Versuchsjahren auf Erträge und P-Bodengehalte? (Frage der Nachwirkungen)?
- Besteht ein signifikanter Zusammenhang zwischen P_{CAL/DL}-Werten und der Ertragshöhe der Kulturpflanzen?

3. Methoden

Die Versuche wurden im Jahre 1956 in Fuchsenbigl (Marchfeld, pannonisches Klimagebiet) und Rottenhaus (Alpenvorland, baltisches Klimagebiet) im ungeordneten Block mit 5 Wiederholungen, in Zwettl (Waldviertel, baltisches Klimagebiet) als balanciertes Gitter mit 4 Wiederholungen in randomisierter Form angelegt.

Eine kurze bodenkundliche und klimatische Charakteristik gibt Tabelle 1.

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

Merkmal	Fuchsenbigl	Rottenhaus	Zwettl
Seehöhe (m über N.N.)	147	290	511
Jahresniederschlag (mm) (30-jähriges Mittel)	529	778	661
Jahresmitteltemperatur °C (30-jähriges Mittel)	9,4	8,4	6,8
Bodentyp	Tschernosem	Braunerde	Braunerde
Ausgangsgestein	Löß	Schwemmaterial	Silikatmaterial
Bodenart	sandiger Lehm	schluffiger Lehm	sandiger Lehm
pH in CaCl ₂	7,5	6,6	5,3
Carbonat (CaCO ₃) in %	13	0	0
Organischer Kohlenstoff in %	1,10	1,40	1,00
Sand/Schluff/Ton	40/42/18	3/67/30	48/36/16

Die drei Versuche gliedern sich jeweils in 2 Versuchsabschnitte:

1. Versuchsabschnitt 1956–1975:

Die Wirkungen von unterschiedlichen P-Düngermengen (44 kg P ha⁻¹a⁻¹ und 175 kg P ha⁻¹a⁻¹) und P-Düngerformen (Hyper-, Thomas- und zwei Superphosphat-Düngern mit unterschiedlicher Körnung) wurden untersucht (9 Varianten). Die Parzellengröße betrug 50 m² (5 x 10 m), als Erntefläche wurden zwischen 6 und 40 m² herangezogen.

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 einbezogen werden, gibt Tabelle 2. Die Parzellengröße betrug 25 m² (5 x 5 m), als Erntefläche wurden zwischen 6 und 20 m² herangezogen.

In die Auswertungen wurden alle Varianten einbezogen. Ergebnisse der Variante „Superphosphat gekörnt“ werden aus Gründen des Umfangs nicht mitgeteilt.

Die Stickstoff- und Kalidüngung erfolgte in praxisüblichen Mengen in Abhängigkeit von der Kultur und dem Standort (siehe Tabelle 3). In allen drei Versuchen wurde über die gesamte 40-jährige Versuchsdauer kein organischer Dünger eingesetzt.

Gekalkt wurde im Versuch Rottenhaus 1961 im Umfang von 1000 kg CaOha⁻¹, im Versuch Zwettl wurden 1962 wegen des tiefen pH-Wertes 1500 kg CaOha⁻¹ ausgebracht.

Die Grundbodenbearbeitung erfolgte mit dem Pflug in 25–28 cm Bodentiefe.

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 ⁻¹ a ⁻¹)	Düngerart			
	Hyperphosphat	Thomasphosphat	Superphosphat	Superphosphat (gekörnt)
44 kg (= P1)	P1 Hyper	P1 Tho	P1 Super	P1 Sugo
44 kg bis zum Jahr 1975 („Nachwirkung“ der P1)	P1 Hyper - 1975	P1 Tho - 1975	P1 Super - 1975	P1 Sugo - 1975
175 kg (= P2)	P2 Hyper	P2 Tho	P2 Super	P2 Sugo
175 kg bis zum Jahr 1975 („Nachwirkung“ der P2)	P2 Hyper - 1975	P2 Tho - 1975	P2 Super - 1975	P2 Sugo - 1975
ungedüngt	0 - Variante 1 und 2			

Tabelle 3: Durchschnittliche jährliche N- und K-Düngung (in kg N ha⁻¹ bzw. K ha⁻¹) der drei 40-jährigen Dauerversuche (in Klammer Durchschnitt von 1976-1995)Table 3: Mean annual N- and K-fertilisation (in kg N ha⁻¹ resp. K ha⁻¹) of the three field experiments during 40 years (in brackets: average 1976-1995)

Ø - N- und K-Düngung	Fuchsenbigl	Rottenhaus	Zwettl
kg N ha ⁻¹	88 (82)	87 (87)	67 (71)
kg K ha ⁻¹	130 (119)	152 (144)	112 (116)

Tabelle 4: Kulturartenverhältnis im Zeitraum 1956 bis 1995 (in %)

Table 4: Crop relation 1956-1995 (in %)

Kulturart	Fuchsenbigl	Rottenhaus	Zwettl
Getreide (Weizen, Gerste, Roggen und Hafer)	47,5	42,5	42,5
Hackfrüchte (Zuckerrübe, Kartoffel, Mais)	37,5 (Zuckerrübe: 15)	40,0 (Zuckerrübe: 22,5)	22,5 (keine Zuckerrübe)
Leguminosen (Erbse, Ackerbohne, Luzerne, Rotklee, Leguminosen-Gemenge)	12,5	15,0	35,0
Ölfrüchte (Raps)	2,5 (1 Jahr)	2,5 (1 Jahr)	0,0

In den Versuchen wurden die für diese Standorte relevanten Ackerkulturen – Getreide, Hackfrüchte und Leguminosen (siehe Tabelle 4) – geprüft. Dabei ist anzumerken, dass die Fruchtfolge keine geregelte war, sondern sich unter Einhaltung grundsätzlicher Fruchtfolgeregeln an aktuellen Notwendigkeiten orientiert hat (Einbau von Alternativkulturen etc.). Auf jedem Standort wurden 11 Kulturarten im Zeitraum 1956–1995 angebaut.

In allen drei Versuchen wurde zur Anreicherung des Bodens mit organischer Substanz eine dreijährige Leguminosen-Brache eingebaut. In Fuchsenbigl (Luzerne-Brache von 1982–1984) und Zwettl (Rotklee-Brache ebenfalls von 1982–1984) wurde die Biomasse der Brache vom Feld abgefahren und die Trockenmasse ermittelt. In Rottenhaus (Klee gras-Brache von 1990–1992) wurde der geschnittene Aufwuchs auf dem Feld belassen.

Die P-Gehalte im Boden wurden ab 1965 bei pH < 6 mit der DL-Methode (nach EGNER und RIEHM, 1955) bei pH ≥ 6 mit der CAL-Methode (nach SCHÜLLER, 1969) bestimmt. Vor 1965 wurde mit der DL-Methode analysiert. Die Bodenproben wurden zumeist im Herbst nach der Ernte der Vorkultur gezogen. In der vorliegenden Auswertung der P_{CAL/DL}-Gehalte wurde ab 1976 nur eine der beiden 0-Parzellen herangezogen.

Die Erntereste wurden in allen drei Versuchen von 1956 bis 1992 abgefahren und ebenso wie die Erträge mengen- und nährstoffmäßig erfasst, ab 1993 wurden die Ernterückstände eingearbeitet.

Die P-Gehalte in Ernte und Ernterückständen wurden in der Regel ab 1960 jährlich gemessen. Diese wie die P-Entzüge und P-Bilanzen sind Gegenstand einer 2. Mitteilung. Eine 3. Mitteilung soll eine detaillierte Auswertung des Einflusses unterschiedlicher P-Düngerformen und -mengen auf ausgewählte Bodenparameter zum Inhalt haben.

In der Ertragsauswertung werden die Daten der Jahre 1976 bis 1995 (zweite Versuchsperiode) der ausgewählten P-Dünger-Varianten (siehe Tabelle 2) vorgestellt, die Auswertung der P_{CAL/DL}-Gehalte umfasst den Zeitraum von 1956 bis 1995.

Die statistische Auswertung der Erträge erfolgte mittels Varianzanalyse und anschließendem Mittelwertvergleich mit dem Tukey-Test über alle 9 bzw. 18 Varianten des jeweiligen Versuches. Lineare, bivariate Regressionen und Korrelationen sowie Korrelationen nach Spearman wurden ergänzend berechnet.

4. Ergebnisse

4.1 Erträge

4.1.1 Erträge ausgewählter Kulturarten

Winterweizen

Betrachtet man die mehrjährigen Mittelwerte der letzten 20 Jahre des Versuches, so kommt es bei Winterweizen auf

allen drei Standorten jeweils in beiden Düngungsstufen zu Ertragsanstiegen, diese sind jedoch in der P1-Stufe ($44 \text{ kg P ha}^{-1} \text{a}^{-1}$) im Vergleich zur Nulldüngung in keinem Fall signifikant (siehe Tabelle 5)¹. Dies zeigt sich auch in den Einzeljahreserträgen (nicht dargestellt).

Beim Winterweizen – wie auch bei Sommergerste und Zuckerrübe (siehe Tabellen 6 und 8) – zeigt sich, dass in Fuchsenbigl Rohphosphat auf den CaCO_3 -hältigen Böden jene Düngerform mit der schlechtesten Ertragswirkung ist. Die Düngung von Hyperphosphat hat bei Winterweizen keinen absicherbaren Ertragseffekt und ist zumindest tendenziell auf allen drei Standorten niedriger als die entsprechenden Varianten von Thomasphosphat. Superphosphat ist in der P1-Variante dem Thomasphosphat leicht unterlegen (in Fuchsenbigl und Zwettl) bzw. gleich (in Rottenhaus). Superphosphat erbringt in Fuchsenbigl auf dem Düngungsniveau P1 im Durchschnitt um $+4,66 \text{ dt}$, in Rottenhaus um $+1,64 \text{ dt}$ höhere und in Zwettl um $-1,06 \text{ dt}$ geringere Erträge als Hyperphosphat.

Sommergerste

Mit Ausnahme der Hyperphosphatdüngung in Fuchsenbigl kommt es auf allen drei Standorten in den P1-Düngungsstufen zu Ertragsanstiegen, die bei Thomasphosphat und Superphosphat vielfach auch absicherbar sind (siehe

Tabelle 6). In der P2-Düngungsstufe treten – verglichen mit P1 – bei Sommergerste z. T. bereits Ertragsreduktionen auf (bei Thomasphosphat in Fuchsenbigl und Zwettl und bei Superphosphat in Zwettl).

Die jährliche Düngung mit Hyperphosphat bei Sommergerste hat in Rottenhaus und Zwettl eine Ertragswirkung zur Folge, die in Rottenhaus in beiden Düngerstufen und in Zwettl nur in der P2-Stufe abgesichert werden kann.

Der Einsatz von Superphosphat in Fuchsenbigl zeigt auch bei Sommergerste keine signifikanten Ertragsvorteile im Vergleich zu Thomasphosphat. Auch in Rottenhaus und Zwettl sind in den P1-Varianten die Erträge bei Einsatz von Thomasphosphat und Superphosphat nahezu gleich. Die P1-Variante Superphosphat bringt in Fuchsenbigl um durchschnittlich $+14,04 \text{ dt}$, in Rottenhaus um $+2,63 \text{ dt}$ und in Zwettl $+7,14 \text{ dt}$ höhere Sommergersten-Erträge als Hyperphosphat.

Bei Betrachtung der einzelnen Jahreserträge (nicht dargestellt) lässt sich bei Sommergerste nur in Fuchsenbigl im Zeitraum 1976–1995 eine einheitliche Entwicklung in Richtung Zunahme der Ertragsunterschiede mit zunehmender Versuchsdauer feststellen.

Winterroggen

In Fuchsenbigl nehmen in den meisten Fällen die Erträge

Tabelle 5: Kornertrag von Winterweizen der drei Dauerversuche (mehrjährige, aggregierte Mittelwerte aus 2 bzw. 3 Jahren im Zeitraum von 1976 bis 1995), Signifikanzniveau $P < 0,05$ (Tukey-Test)

Table 5: Yields of winter wheat (aggregate means of 2 or 3 years in the period 1976–1995), LSD 0.05 (Tukey)

Variante	Fuchsenbigl (Mittel der Jahre 1977, 1986, 1994)		Rottenhaus (Mittel der Jahre 1978, 1987)		Zwettl (Mittel der Jahre 1977, 1986, 1994)	
	Korn-Ertrag (dt ha^{-1} bei 86%TM)	Signifikanz ($P < 0,05$) ¹⁾	Korn-Ertrag (dt ha^{-1} bei 86%TM)	Signifikanz ($P < 0,05$)	Korn-Ertrag (dt ha^{-1} bei 86%TM)	Signifikanz ($P < 0,05$)
0-Parzelle	35,25	a	55,75	a	52,81	a
0-Parzelle (2) ²⁾	36,83	ab	56,87	ab	57,94	ab
P1 Hyper	36,39	ab	58,35	abc	57,47	ab
P1 Hyper - 1975	35,47	a	59,38	abcd	54,67	ab
P2 Hyper	37,99	abc	60,60	bcd	58,86	ab
P2 Hyper - 1975	38,48	abc	59,88	abcd	57,66	ab
P1 Tho	43,00	abc	59,32	abcd	61,52	ab
P1 Tho - 1975	42,75	abc	59,62	abcd	56,06	ab
P2 Tho	44,09	bc	63,28	d	63,35	b
P2 Tho - 1975	45,22	c	62,84	cd	59,66	ab
P1 Super	41,05	abc	59,99	abcd	56,41	ab
P1 Super - 1975	43,52	abc	58,43	abc	54,98	ab
P2 Super	45,48	c	60,27	abcd	58,87	ab
P2 Super - 1975	44,35	bc	59,08	abcd	56,37	ab

¹⁾ gleiche Buchstaben zeigen keinen signifikanten Unterschied an

²⁾ Die Berücksichtigung der Teilung der 0-Parzelle veranschaulicht die Teilungsvarianz.

Tabelle 6: Kornenertrag von Sommergerste der drei Dauerversuche (mehrjährige, aggregierte Mittelwerte aus 3 bzw. 4 Jahren von 1976–1995), Signifikanzniveau $P < 0,05$ (Tukey-Test)

Table 6: Yields of spring barley (aggregate means of 3 or 4 years in the period 1976–1995), LSD 0.05 (Tukey)

Variante	Fuchsenbigl (Mittel der Jahre 1978, 1980, 1992)		Rottenhaus (Mittel der Jahre 1977, 1981, 1984, 1988)		Zwettl (Mittel der Jahre 1976, 1980, 1992)	
	Korn-Ertrag (dt ha ⁻¹ bei 86%TM)	Signifikanz ($P < 0,05$)	Korn-Ertrag (dt ha ⁻¹ bei 86%TM)	Signifikanz ($P < 0,05$)	Korn-Ertrag (dt ha ⁻¹ bei 86%TM)	Signifikanz ($P < 0,05$)
0-Parzelle	39,06	a	39,39	ab	39,07	a
0-Parzelle (2)	42,31	ab	39,06	a	38,51	a
P1 Hyper	37,09	a	44,96	cde	43,42	ab
P1 Hyper - 1975	38,71	a	43,22	abc	46,43	ab
P2 Hyper	39,21	a	44,66	cd	49,27	b
P2 Hyper - 1975	39,50	a	43,92	bc	48,38	ab
P1 Tho	52,29	c	46,99	cdef	49,84	b
P1 Tho - 1975	49,85	bc	43,42	abc	45,86	ab
P2 Tho	51,00	bc	49,25	ef	43,81	ab
P2 Tho - 1975	52,11	c	47,44	cdef	48,49	ab
P1 Super	51,13	bc	47,59	cdef	50,56	b
P1 Super - 1975	49,45	bc	44,93	cde	47,13	ab
P2 Super	51,62	bc	49,22	def	48,00	ab
P2 Super - 1975	51,06	bc	45,93	cdef	48,65	ab

von Winterroggen mit Thomas- und Superphosphat-Düngung zu (siehe Tabelle 7), wobei diese Ertragsdifferenzen nicht absicherbar sind. Bei Superphosphat-Düngung nehmen allerdings die Erträge in der P2 Stufe tendenziell wieder ab. Letzteres gilt auch für Thomas- und Superphosphat in Rottenhaus und für Hyperphosphat in Zwettl. An diesem Standort werden die höchsten Roggenerträge mit P1 Hyper erzielt. Die Ertragsunterschiede in Rottenhaus und Zwettl sind in keinem Fall signifikant.

Zuckerrübe

Bei Zuckerrübe ist eine ähnliche Ertragswirkung der P-Düngung wie bei Sommergerste zu beobachten, wenngleich aufgrund der größeren Streuung der Einzeljahres- und der Parzellenwerte nur in Rottenhaus auch absicherbar. Die relativen Ertragsunterschiede sind vielfach sogar höher (s. auch Relativerträge der 0-Parzellen in Tabelle 10). Thomasphosphat- und Superphosphat-Düngung erzielen in der P1-Stufe auf beiden Standorten die höchsten Erträge. Bei Superphosphat kommt es am Standort Fuchsenbigl in der P2-Stufe (im Vergleich zu P1) noch zu merkbareren Ertragssteigerungen, bei Hyperphosphat ist dies auf beiden Standorten der Fall. Thomasphosphat bringt in der P1-Variante auf beiden Standorten um etwa + 50 dt ha⁻¹ mehr Ertrag als Superphosphat. In der P1-Variante bringt Superphosphat in Fuchsenbigl um durchschnittlich + 189,3 dt

und in Rottenhaus um + 62,4 dt höhere Zuckerrüben-Erträge (FM) als Hyperphosphat.

Kartoffel

Ab 1976 wurde die Kartoffel (siehe Tabelle 9) nur mehr in Zwettl in mehreren (drei) Jahren angebaut. Bei allen drei Düngerformen nehmen die Kartoffelerträge in der 1. Düngungsstufe zu (bei Superphosphatdüngung signifikant), und sinken in der 2. Düngungsstufe wieder ab. Signifikant (zu allen anderen Düngungsvarianten) ist diese Ertragsreduktion in der P2 Tho-Variante, wobei sie in allen drei Jahren in ähnlicher Weise auftrat.

4.1.2 Auswirkungen einer mehr als 20-jährig unterlassenen P-Düngung

Die Auswirkungen einer unterlassenen Düngung auf die Erträge sind kultur- und standortspezifisch sehr unterschiedlich, in vielen Fällen sind jedoch keine signifikanten Ertragsrückgänge in den beiden ungedüngten 0-Varianten gegenüber der P1 Tho-Variante, die in Tabelle 10 als Referenzvariante (= 100 %) herangezogen wird, zu beobachten. (Die Wahl der P1 Tho-Variante als Referenz beruht einerseits auf der praxisüblicheren P-Abstufung, andererseits auf der – auf allen Standorten – sehr guten Düngewirkung die-

Tabelle 7: Kornertrag von Winterroggen der drei Dauerversuche (mehrjährige, aggregierte Mittelwerte aus 2 bzw. 3 Jahren im Zeitraum von 1976 bis 1995), Signifikanzniveau $P < 0,05$ (Tukey-Test)

Table 7: Yields of rye (aggregate means of 2 or 3 years in the period 1976–1995), LSD 0.05 (Tukey)

Variante	Fuchsenbigl (Mittel der Jahre 1981, 1990)		Rottenhaus (Mittel der Jahre 1982, 1995)		Zwettl (Mittel der Jahre 1978, 1981, 1989)	
	Korn-Ertrag (dt ha ⁻¹ bei 86%TM)	Signifikanz ($P < 0,05$)	Korn-Ertrag (dt ha ⁻¹ bei 86%TM)	Signifikanz ($P < 0,05$)	Korn-Ertrag (dt ha ⁻¹ bei 86%TM)	Signifikanz ($P < 0,05$)
0-Parzelle	28,94	a	51,04	a	50,55	a
0-Parzelle (2)	33,53	abcde	50,03	a	51,42	a
P1 Hyper	30,01	ab	53,60	a	55,14	a
P1 Hyper - 1975	32,72	abcd	52,25	a	51,91	a
P2 Hyper	31,51	abc	56,35	a	51,75	a
P2 Hyper - 1975	33,85	abcde	51,23	a	52,64	a
P1 Tho	41,96	cde	58,02	a	52,45	a
P1 Tho - 1975	38,45	abcde	56,31	a	51,48	a
P2 Tho	43,99	e	56,88	a	52,77	a
P2 Tho - 1975	42,04	cde	56,62	a	50,67	a
P1 Super	41,04	bcde	56,40	a	50,86	a
P1 Super - 1975	38,90	abcde	51,65	a	53,84	a
P2 Super	40,73	bcde	49,99	a	53,92	a
P2 Super - 1975	43,26	de	55,13	a	50,94	a

Tabelle 8: FM-Ertrag der Zuckerrübe in den Dauerversuchen Fuchsenbigl und Rottenhaus (mehrjährige, aggregierte Mittelwerte aus 2 bzw. 3 Jahren von 1976–1995), Signifikanzniveau $P < 0,05$ (Tukey-Test)

Table 8: Yields of sugar beer (FM) (aggregate means of 2 or 3 years in the period 1976–1995), LSD 0.05 (Tukey)

Variante	Fuchsenbigl (Mittel der Jahre 1979, 1991)		Rottenhaus (Mittel der Jahre 1976, 1980, 1989)	
	Rüben-Ertrag (FM dt ha ⁻¹)	Signifikanz ($P < 0,05$)	Rüben-Ertrag (FM dt ha ⁻¹)	Signifikanz ($P < 0,05$)
0-Parzelle	460,4	a	373,7	a
0-Parzelle (2)	525,8	abcd	381,3	a
P1 Hyper	464,3	ab	450,5	ab
P1 Hyper - 1975	461,3	a	469,5	abc
P2 Hyper	543,5	abcd	502,4	bc
P2 Hyper - 1975	504,9	abc	501,9	bc
P1 Tho	704,3	d	561,8	c
P1 Tho - 1975	646,7	abcd	540,2	bc
P2 Tho	707,0	d	552,6	c
P2 Tho - 1975	687,8	cd	544,9	bc
P1 Super	653,6	bcd	512,9	bc
P1 Super - 1975	657,7	cd	498,2	bc
P2 Super	680,8	cd	522,0	bc
P2 Super - 1975	681,3	cd	516,6	bc

In Zwettl wurde Zuckerrübe aus standörtlichen Gründen nicht angebaut.

ser P-Düngerform.) Signifikante Ertragsreduktionen auf den bis zu 40 Jahre ungedüngten Varianten sind bei Sommergerste (auf allen Standorten) und bei Zuckerrübe (in Rottenhaus) anzutreffen.

Die Getreideerträge der 0-Varianten liegen zwischen 69 % und 108 %, die Zuckerrübenenerträge zwischen 65 und 75 % und die Maiserträge bei 91 bis 101% der Erträge der P1 Tho-Variante (siehe Tabelle 10).

Tabelle 9: Kartoffelertrag in Zwettl (mehrjährige, aggregierte Mittelwerte aus den Jahren 1979, 1985 und 1991), Signifikanzniveau $P < 0,05$ (Tukey-Test)

Table 9: Yields of potatoes in Zwettl (aggregate means of the years 1979, 1985 and 1991), LSD 0.05 (Tukey)

Variante	Knollen-Ertrag (dt ha ⁻¹ FM)	Signifikanz (P < 0,05)
0-Parzelle	284,4	ab
0-Parzelle (2)	290,6	abc
P1 Hyper	328,7	bcd
P1 Hyper - 1975	325,9	bcd
P2 Hyper	322,1	bcd
P2 Hyper - 1975	335,2	bcd
P1 Tho	329,5	bcd
P1 Tho - 1975	301,2	bcd
P2 Tho	240,0	a
P2 Tho - 1975	310,0	bcd
P1 Super	343,2	d
P1 Super - 1975	334,2	bcd
P2 Super	332,4	bcd
P2 Super - 1975	333,4	bcd

Vergleicht man die bis 1975 gedüngten Nachwirkungsparzellen mit den weiterhin gedüngten, so zeigt sich, dass bis 1995 bei keiner Kultur eine signifikante Ertragsreduktion aufgetreten ist, wenn die gleiche Düngerform und Düngermenge vergleichend herangezogen wird. Zum Teil gehen die Erträge tendenziell zurück (siehe Tabellen 5–9).

Ein Vergleich zwischen Nullvariante und Nachwirkungsvarianten ergibt bei Weizen, Gerste und Zuckerrübe in der Variante P2 Tho bis 1975 in Fuchsenbigl und Rottenhaus einen signifikant zu (einer der) beiden 0-Parzellen höheren Ertrag. Das gleiche gilt für Superphosphat (ausgenommen

Winterweizen in Rottenhaus). In den praxisnäheren P1-Varianten zeigen die Nachwirkungsparzellen bei Thomasphosphat und Superphosphat zu Sommergerste und Zuckerrübe noch immer – zum Teil – absicherbare Ertragseffekte im Vergleich zu einer der beiden 0-Parzellen.

4.2 P_{CAL/DL}-Gehalte im Boden

Wie Abbildung 1 zeigt, bleiben auf allen drei Standorten die P_{CAL/DL}-Gehalte der 0-Varianten während der 40-jährigen Versuchsdauer – bei mehr oder weniger großen Schwankungen – ab 1966 (Beginn der CAL-Messung) nahezu unverändert bzw. steigen sogar leicht an.

Auffallend ist die unterschiedliche Höhe der P_{CAL/DL}-Gehalte auf den drei Versuchsstandorten. Während in Rot-

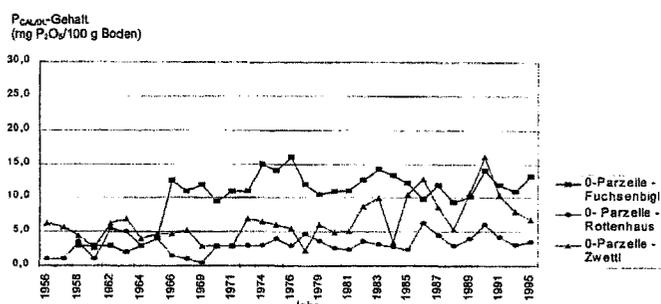


Abbildung 1: P_{CAL/DL}-Gehalte der (ersten) 0-Parzelle in den drei Dauerversuchen 1956–1995 (in mg P₂O₅/100 g Boden) (ab 1966 CAL-Messung)

Figure 1: P_{CAL/DL} contents of the (first) control of the three long-term field experiments 1956–1995 in mg P₂O₅/100 g soil (beginning of CAL measurement: 1966)

Tabelle 10: Mittlere Erträge der beiden Nullvarianten in % der P1 Tho-Variante (Mittel aus 2 bis 4 Jahren, Erträge 1976 bis 1995)²

Table 10: Mean yields of the two controls in % of the P1 Tho variant (mean of 2 to 4 years, in the period 1976–1995)

Kulturart	Fuchsenbigl	Rottenhaus	Zwettl
Winterweizen	82 n.s. / 86 n.s.	94 n.s. / 96 n.s.	86 n.s. / 94 n.s.
Sommergerste	75 *** / 81 *	83 *** / 84 ***	77 * / 78 *
Winterroggen	69 ** / 80 n.s.	86 n.s. / 88 n.s.	96 n.s. / 98 n.s.
Hafer ¹⁾	91 n.s. / 97 n.s.	96 n.s. / 108 n.s.	84 n.s. / 95 n.s.
Zuckerrübe	65 ** / 75 n.s.	67 *** / 68 ***	
Körnermais	99 n.s. / 101 n.s.	91 * n.s. / 94 * n.s.	
Silomais			93 n.s. / 96 n.s.
Kartoffel	78 * n.s. / 88 * n.s.		86 n.s. / 88 n.s.
Raps ¹⁾	78 n.s. / 91 n.s.	109 n.s. / 110 n.s.	
Erbse ¹⁾	82 n.s. / 88 n.s.		74 n.s. / 78 n.s.
Rotklee			95 n.s. / 100
Luzerne	99 n.s. / 102 n.s.		

¹⁾ Ertrag nur aus einem Jahr

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

tenhaus die $P_{CAL/DL}$ -Gehalte der 0-Variante während der 40-jährigen Versuchsdauer sich meist unter 5 mg $P_2O_5/100$ g Boden (4,1 mg $P_2O_5/100$ g im Mittel von 1990–1995) bewegen, schwanken die CAL-Werte in Fuchsenbigl in den letzten 30 Jahren des Versuches zwischen 10 und 15 mg $P_2O_5/100$ g Boden. Der Standort Zwettl nimmt in den letzten 30 Versuchsjahren meist eine Mittelstellung ein.

Ob und in welchem Ausmaß durch P-Düngung die $P_{CAL/DL}$ -Gehalte verändert werden, hängt sehr stark vom Standort und von der Düngerform ab. In Fuchsenbigl liegen die $P_{CAL/DL}$ -Gehalte aller Hyperphosphat-Varianten (auch deren Nachwirkungen) im Bereich der 0-Variante (siehe Abbildung 2). Der Mittelwert von 1990–1995 bewegt sich dabei zwischen 11,1 und 14,6 mg $P_2O_5/100$ g.

Die Gehalte der P1-Stufe von Thomas- und Superphosphat liegen im Mittel 1990–1995 auf dem deutlich höheren Niveau von 30,2–34,9 mg $P_2O_5/100$ g, das sich seit 1968 kaum verändert hat (siehe Abbildung 2). Die praxisunüblichen P2-Stufen von Thomas- und Superphosphat zeigen hingegen als einzige Varianten während der letzten 30 Versuchsjahre eine deutliche kontinuierliche Zunahme der $P_{CAL/DL}$ -Gehalte, die in den 90er Jahren bereits sehr hohe Werte (bis über 90 bzw. 100 mg $P_2O_5/100$ g, siehe Abbildung 2) erreicht haben. Die Nachwirkungen dieser P2-Varianten (nicht dargestellt) liegen auch im Mittel 1990–1995 noch immer um über 11 mg $P_2O_5/100$ g höher als die 40 Jahre durchgehend gedüngten P1-Stufen dieser beiden Düngerformen.

In Rottenhaus liegen die $P_{CAL/DL}$ -Gehalte der P1-Varianten in den letzten 20 Versuchsjahren meist unter 10 mg $P_2O_5/100$ g Boden (siehe Abbildung 3). So sind die Gehalte der P1-Stufe von Thomasphosphat im Mittel der letzten

6 Versuchsjahre mit 7,9 mg $P_2O_5/100$ g niedrig, die „Nachwirkungsvariante“ (P1 Tho bis 1975) liegt mit 5,7 mg $P_2O_5/100$ g auf dem Niveau beider P1 Hyperphosphat-Varianten (nicht dargestellt). In der praxisunüblichen P2 Hyper-Variante lagen in den letzten 30 Versuchsjahren die $P_{CAL/DL}$ -Werte meist nur um 2–3 mg $P_2O_5/100$ g höher als in der entsprechenden P1 Stufe (siehe Abbildung 3). Lediglich die P2-Stufen von Thomasphosphat und Superphosphat zeigen eine kontinuierliche Zunahme der $P_{CAL/DL}$ -Gehalte während der letzten 30 Versuchsjahre und haben seit 1978 bereits sehr hohe Gehalte (meist über 40 mg $P_2O_5/100$ g, siehe Abbildung 3) erreicht. Die entsprechenden P2-Nachwirkungen (nicht dargestellt) sind im Mittel 1990–1995 immer noch auf einem um fast 13 mg P_2O_5 höheren Niveau als die jährlich gedüngte P1-Stufe.

In Zwettl ist eine starke Schwankung der $P_{CAL/DL}$ -Gehalte insbesondere in den 80er und 90er Jahren zu bemerken, wobei die $P_{CAL/DL}$ -Gehalte der 0-Parzelle in den letzten 6 Versuchsjahren zwischen 6,5 und 16 mg $P_2O_5/100$ g variieren (siehe Abbildung 4). Die Mittelwerte aus 1990–1995 von P1 Hyper und P1 Tho weichen kaum voneinander ab (25,5 bzw. 24,4 mg $P_2O_5/100$ g Boden). Diese geringe Abweichung ist auch in der 40-jährigen Dynamik, abgesehen von einzelnen stärkeren Abweichungen, nachzuweisen (siehe Abbildung 4). Deren Nachwirkungen (nicht dargestellt) liegen im Mittel der 90er Jahre bereits um mehr als 10 mg $P_2O_5/100$ g darunter.

Bei den P2-Varianten von Thomasphosphat, aber auch von Hyperphosphat liegen die $P_{CAL/DL}$ -Werte von 1978–1994 über 40 mg $P_2O_5/100$ g (siehe Abbildung 4). Die P2 Hyper – 1975 und P2 Tho – 1975 (nicht dargestellt) wei-

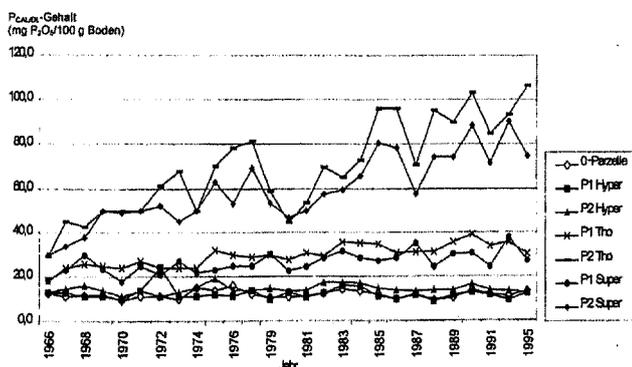


Abbildung 2: P_{CAL} -Gehalte der ausgewählten Varianten in Fuchsenbigl 1966–1995 (in mg $P_2O_5/100$ g Boden) ohne Nachwirkungsvarianten

Figure 2: P_{CAL} contents of selected variants in Fuchsenbigl 1966–1995 in mg $P_2O_5/100$ g soil, without consideration of after-effects

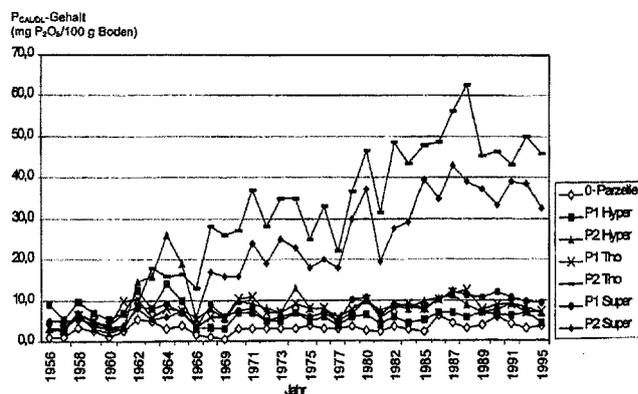


Abbildung 3: $P_{CAL/DL}$ -Gehalte der ausgewählten Varianten in Rottenhaus 1956–1995 (in mg $P_2O_5/100$ g Boden) ohne Nachwirkungsvarianten (ab 1966 CAL-Messung)

Figure 3: $P_{CAL/DL}$ contents of selected variants in Rottenhaus 1956–1995 in mg $P_2O_5/100$ g soil, without consideration of after-effects (beginning of CAL measurement: 1966)

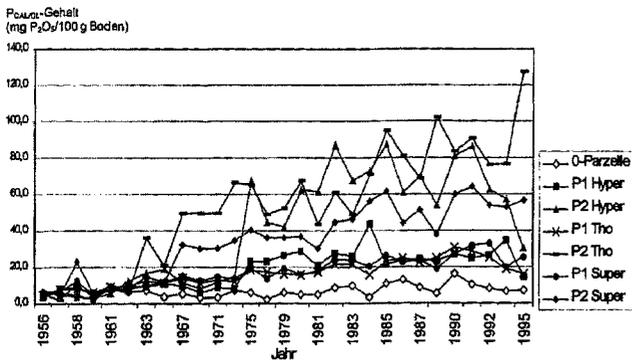


Abbildung 4: $P_{CAL/DL}$ -Gehalte der ausgewählten Varianten in Zwettl 1956–1995 (in mg $P_2O_5/100$ g Boden) ohne Nachwirkungsvarianten

Figure 4: $P_{CAL/DL}$ contents of selected variants in Zwettl 1956–1995 in mg $P_2O_5/100$ g soil, without consideration of after-effects

sen im Mittel der 90er Jahre ein ähnliches $P_{CAL/DL}$ -Niveau (24–29 mg $P_2O_5/100$ g) auf wie die 40 Jahre durchgehend gedüngten P1 Varianten.

In den Parzellen, die nur bis 1975 gedüngt wurden, sinken auf allen drei Standorten die $P_{CAL/DL}$ -Gehalte – v. a. bei hohen Ausgangsgehalten – nur langsam ab. So liegen die Werte der Nachwirkungsvarianten noch meist wesentlich über denen der 40 Jahre ungedüngten 0-Parzellen, dies trifft insbesondere auf die P2-Stufen zu.

4.3 Beziehung zwischen Ertrag und $P_{CAL/DL}$ -Gehalten im Boden

Für die Kulturen Sommergerste, Winterweizen und Zuckerrübe können zwar zwischen Ertrag und $P_{CAL/DL}$ -Gehalten signifikante bis hochsignifikante Korrelationskoeffizienten (siehe Tabelle 11) berechnet werden, die Bestimmtheitsmaße der linearen Regressionen sind jedoch sehr niedriger (Minimum: 0,024, Maximum: 0,277). Aufgrund des von der P-Düngung weitgehend unabhängigen Ertragsgeschehens bei den anderen Kulturen (siehe Kapitel 4.1) wurde auf weitere Regressionsrechnungen verzichtet.

Da der Korrelationskoeffizient von Spearman stets höhere Werte anzeigt, ist erkennbar, dass kein linearer Zusammenhang zwischen Ertrag und $P_{CAL/DL}$ -Gehalten gegeben ist. Die logarithmische Kurvenanpassung bringt (im Gegensatz zu einer ebenso durchgeführten exponentiellen Anpassung) eine Verbesserung der Bestimmtheitsmaße im Vergleich zu den einfachen linearen Regressionen. Der Erklärungsgrad der Varianz erreicht aber auch mit den logarithmischen Modellen maximal nur 33 % (siehe Tabelle 11).

Da die Ertragskurve mit zunehmendem $P_{CAL/DL}$ -Gehalt auf allen drei Standorten abflacht, wurde zusätzlich die lineare Korrelation und Regression nur im $P_{CAL/DL}$ -Bereich kleiner 25 mg $P_2O_5/100$ g Boden gerechnet. Dabei verbessern sich 3 der betrachteten 8 Korrelationen:

– Winterweizen Fuchsenbigl $r = 0,393 (+0,23)$

Tabelle 11: Beziehung zwischen Ertrag und $P_{CAL/DL}$ -Gehalten im Boden für Sommergerste, Winterweizen und Zuckerrübe der drei Dauerversuche Fuchsenbigl, Rottenhaus und Zwettl im Zeitraum 1976–1995 (Korrelation nach Pearson und Spearman sowie Bestimmtheitsmaße der linearen Regression und der logarithmischen Kurvenanpassung, für alle 18 Varianten)

Table 11: Correlation between crop yields and $P_{CAL/DL}$ 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 Pearson and Spearman as well as coefficients of determination of the linear regression and the logarithmic curve fit for all 18 variants)

Kulturart	Fuchsenbigl	Rottenhaus	Zwettl
Sommergerste (Werte aus 3 Jahren)	r (Pearson) = 0,526 ** r (Spearman) = 0,568 ** B (linear) = 0,277 B (log.) = 0,331	r (Pearson) = 0,199 ** r (Spearman) = 0,210 ** B (linear) = 0,040 B (log.) = 0,043	r (Pearson) = 0,155 * r (Spearman) = 0,269 ** B (linear) = 0,024 B (log.) = 0,109
Winterweizen (Werte aus 2-3 Jahren)	r (Pearson) = 0,161 * r (Spearman) = 0,231 ** B (linear) = 0,026 B (log.) = 0,058	r (Pearson) = 0,263 ** r (Spearman) = 0,346 ** B (linear) = 0,069 B (log.) = 0,112	r (Pearson) = 0,367 ** r (Spearman) = 0,464 ** B (linear) = 0,135 B (log.) = 0,175
Zuckerrübe (Werte aus 2-3 Jahren)	r (Pearson) = 0,435 ** r (Spearman) = 0,486 ** B (linear) = 0,189 B (log.) = 0,258	r (Pearson) = 0,314 ** r (Spearman) = 0,362 ** B (linear) = 0,099 B (log.) = 0,158	In Zwettl nicht angebaut

*** $P < 0,001$, ** $P = 0,01-0,001$, * $P = 0,01-0,05$, n.s. = no significant differences, Korrelation nach PEARSON und nach SPEARMAN

- Zuckerrübe Fuchsenbigl $r = 0,612 (+0,18)$
- Sommergerste Zwettl $r = 0,404 (+0,25)$

Bei den anderen 5 Korrelationen aus Tabelle 11 ist in diesem $P_{CAL/DL}$ -Bereich eine leichte Reduktion der Korrelationskoeffizienten festzustellen.

5. Diskussion

Bei der Interpretation der Versuchsergebnisse, v. a. was die Frage der Auswirkungen der Düngermengen auf den Pflanzenenertrag betrifft, ist Folgendes vorzustellen: Schon die niedrigere P1 Düngungsstufe ($44 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) übertrifft die aktuelle österreichische Düngungsempfehlung (für Gehaltsstufe C und mittlere Ertragerwartung; BMLF, 1999) bei weitem. So entspricht die P1 Düngungsstufe des vorliegenden Versuchs etwa 180 % der für Getreide, 150 % der für Kartoffel und 120 % der für Zuckerrübe und Mais empfohlenen Düngermengen.

In Beantwortung der in Kapitel 2 formulierten Fragen sind als wesentliche Ergebnisse dieser drei Dauerversuche zu nennen:

Eine P-Düngung von $44 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ zeigt nach 20–40 Jahren Versuchsdauer zumeist Mehrerträge im Vergleich zur 0-Variante (bis auf die Hyperphosphat-Düngung in Fuchsenbigl). Diese Ertragssteigerungen sind aber bei der Mehrzahl der untersuchten Kulturen bei Anwendung des Tukey-Tests nicht signifikant. Ausnahmen bilden Sommergerste (auf allen drei Standorten), Zuckerrübe in Rottenhaus und Kartoffel in Zwettl (letztere nur bei Superphosphat-Düngung). Diese Ertragsreaktionen decken sich insbesondere bei Betrachtung der Relativerträge der 0-Parzellen (siehe Tabelle 10) mit den Ergebnissen anderer 30- bis 84-jähriger Dauerversuche auf sehr unterschiedlichen Standorten (PAGEL et al., 1982 und 1996; ORLOWSKI, 1989; WECHSUNG und PAGEL, 1993; STUMPE et al., 1994; LANG und DRESSEL, 1997). Auch die praxisunübliche P-Menge von $175 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ hat außer bei Sommergerste und Zuckerrübe sowie bei Winterweizen keine signifikante Ertragswirkung zur Folge, z. T. nehmen die Pflanzenenerträge schon wieder ab. Diese hohen P-Aufwandmengen weisen zudem in keinem Fall eine signifikante Ertragszunahme im Vergleich zur entsprechenden P1-Variante ($44 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) auf.

Dass Sommergerste und Zuckerrübe auf einen langjährigen P-Düngungsverzicht mit signifikanten Ertragsreduktionen reagieren, ist ebenso in anderen Dauerversuchen beobachtet worden (KÖCHL, 1985; LANG und DRESSEL,

1997; MERBACH et al., 1999). Auch STUMPE et al. (1994) konnten bei Zuckerrübe (in 2 von 4 Jahren), hingegen nicht bei Sommergerste, einen P-Düngungseffekt nachweisen. Die Wirkung der P-Düngung bei diesen beiden Kulturarten dürfte auf deren geringes Aufschließungsvermögen für schwerlösliche Phosphate (RÜBENSAM und RAUHE, 1969; zit. in NOWACK, 1990) und gleichzeitig auf den hohen P-Bedarf (besonders bei Zuckerrübe) zurückzuführen sein.

Die meist fehlende Ertragswirkung des im ökologischen Landbau zugelassenen Rohphosphatdüngers auf CaCO_3 -hältigen Böden (wie sie in Fuchsenbigl gegeben sind) ist bereits vielfach nachgewiesen worden (REICHARD, 1969; SCHÜLLER et al., 1975) und auch aus der Literatur bekannt (z. B. ÖHMICHEN, 1983; MENGEL, 1986). Hyperphosphat erzielt im pH-Bereich 5–6,5 (Standorte Rottenhaus und Zwettl) Düngewirkungen, die allerdings in den meisten Fällen geringer sind als die von Thomasphosphat und Superphosphat. Letztere unterscheiden sich in ihrer Ertragswirkung nicht signifikant voneinander.

Die geringen Ertragsrückgänge in den Varianten, die ab 1976 nicht mehr gedüngt wurden, stehen im Einklang mit Ergebnissen von JUNGK et al. (1993). In den dargestellten Versuchen ist zudem zu berücksichtigen, dass bereits in der P1-Stufe mit einer Düngermenge von $44 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ eine P-Akkumulation in den ersten 20 Versuchsjahren infolge einer jährlichen P-Überbilanz (siehe 2. Mitteilung; in Vorbereitung) erfolgt ist.

Wirtschaftlich wirkt sich in der konventionellen Landwirtschaft eine Unterlassung der P-Düngung insbesondere bei den Hackfrüchten Zuckerrübe (in Fuchsenbigl und Rottenhaus) und Kartoffel (in Zwettl), die verglichen mit Getreide wesentlich höhere Roherlöse pro Hektar erzielen, ungünstig aus. In Fuchsenbigl decken die mit der Düngung von $44 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (P1) als Super- bzw. Thomasphosphat erzielten Mehrerlöse im Durchschnitt bereits nach zweimaligem Anbau von Zuckerrüben die in 20-jähriger Versuchsdauer entstandenen Düngungskosten (wobei die derzeitigen Produkt- und Faktorpreise zugrundegelegt wurden). Wirtschaftlich nicht sinnvoll war – über den betrachteten Versuchszeitraum 1976 bis 1995 und alle Kulturen gerechnet – die Hyperphosphatdüngung in Fuchsenbigl und (bei der untersuchten Aufwandmenge P1) – die Thomasphosphatdüngung in Zwettl. Knapp an der Rentabilitätsgrenze war auch der Einsatz von Superphosphat in Zwettl (bei Berechnung der durchschnittlichen düngerkostenbereinigten Mehrerlöse der P1-Variante verglichen mit der Nulldüngung). Ein entscheidendes wirtschaftliches Kriterium für die P-Düngung in diesen Versuchen ist der Anteil

der Hackfrüchte Zuckerrübe und Kartoffel in der Fruchtfolge.

Die Versuche bestätigen die Tatsache, dass mit der CAL-Extraktion – wie sie an den Böden in Fuchsenbigl und Rottenhaus durchgeführt wurde – die im Boden vorhandenen Rohphosphate praktisch nicht (Fuchsenbigl) bzw. nicht vollständig (Rottenhaus) erfasst werden (SCHÜLLER, 1969). Eine (rasche) Anhebung der P_{CAL} -Gehalte durch Hyperphos-Düngung ist daher nicht möglich, was im Einklang mit Ergebnissen von STEFFENS (1984) sowie NÄTSCHER und SCHWERTMANN (1987) steht.

In Fuchsenbigl liegen die $P_{CAL/DL}$ -Gehalte der P1-Stufe von Thomas- und Superphosphat gegenüber der Nullvariante erwartungsgemäß auf einem deutlich höheren Niveau, das sich seit 1968 kaum verändert hat. Somit erhöht die jährliche Düngung mit 44 kg P ha^{-1} als Super- und Thomasphosphat die CAL-Gehalte in den Gehaltsbereich hoch, wobei die Anhebung anfangs sehr rasch erfolgt und sich nach 20- bis 40-jähriger Versuchsdauer auf dem oben genannten Niveau einpendelt.

In Rottenhaus hingegen liegen in den 90er Jahren die $P_{CAL/DL}$ -Werte aller P1-Düngungsvarianten aufgrund der hohen Tongehalte auf niederem Niveau (meist unter $8 \text{ mg P}_2\text{O}_5/100 \text{ g Boden}$), das von der 0-Parzelle noch unterschritten wird. Die gemessenen Erträge weisen absolut gesehen aber vielfach praxisübliche Werte auf (Weizen: 55 bis 63 dt/ha , Zuckerrübe: 370 bis 560 dt/ha). Dies bestätigt die Tatsache, dass niedrige $P_{CAL/DL}$ -Gehalte nicht in jedem Fall auf Unterversorgung deuten müssen, sondern auch auf Unterbewertung zurückgeführt werden können (KÖCHL, 1985).

In Zwettl werden bereits durch die P1-Düngungsstufe nicht nur bei Thomas- und Superphosphat sondern auch bei Hyperphosphat die Gehalte bis an bzw. über die Obergrenze des C-Bereiches ($25 \text{ mg P}_2\text{O}_5/100 \text{ g}$) angehoben. Dies bestätigt die Ertragswirksamkeit der Rohphosphat-Dünger auf diesem Standort.

Dass auf allen drei Standorten die $P_{CAL/DL}$ -Gehalte der 0-Variante während der über 40-jährigen Versuchsdauer nahezu unverändert bleiben bzw. sogar leicht ansteigen, steht im Einklang mit Ergebnissen von PAGEL et al. (1982 und 1996) und im Widerspruch zu JUNGK et al. (1993) und STUMPE et al. (1994). Diese Ergebnisse sind auch im Zusammenhang mit niedrigen $P_{CAL/DL}$ -Ausgangsgehalten bei Versuchsanlage Mitte der 50er Jahre zu betrachten. Dass allerdings trotz der anhaltend hohen Erträge und P-Entzüge durch das Erntegut keine Absenkung der $P_{CAL/DL}$ -Gehalte erfolgte, kann nur zu einem sehr geringen Anteil

durch P-Einträge aus der Luft und über das Saatgut zurückzuführen sein. Vielmehr weisen die Ergebnisse der Erträge und P-Gehalte der 0-Parzellen auf das erhebliche P-Nachlieferungsvermögen aus den Bodenvorräten auf allen drei Standorten hin. Somit sind zum einen die für Lößstandorte bereits mehrfach belegten großen P-Mobilisierungsleistungen des Systems Boden-Pflanze (ORLOWSKI, 1989; WECHSUNG und PAGEL, 1993; STUMPE et al., 1994) erneut bestätigt (s. Erträge und $P_{CAL/DL}$ -Gehalte in Fuchsenbigl). Zum anderen belegen die Ergebnisse in Rottenhaus und Zwettl, dass umfangreiche, langanhaltende P-Verfügbarkeitsmechanismen auch für mittelschwere bis schwere Braunerde-Standorte mit mittlerem bis niederem pH-Wert existieren.

Dass in den Parzellen, die nur bis 1975 gedüngt wurden, die $P_{CAL/DL}$ -Gehalte – v. a. bei hohen Ausgangsgehalten – nur langsam absinken, steht in guter Übereinstimmung mit der Tatsache, dass die 20 Jahre unterlassene P-Düngung keine signifikanten Ertragsrückgänge im Vergleich mit den entsprechenden durchgehend gedüngten Varianten zur Folge hat. P-Bilanzüberschüsse aus den Jahren 1956–1975 dürften sowohl in der P1- wie insbesondere in der P2-Stufe – nach Unterlassung der P-Düngung – wesentlich für diese Nachwirkungseffekte im Boden verantwortlich sein.

Die Ertragsergebnisse in Verbindung mit den gemessenen $P_{CAL/DL}$ -Gehalten stehen zusammenfassend betrachtet im Einklang mit den von KÖSTER und SCHACHTSCHABEL (1983) gefundenen Ergebnissen (deutliche Wirkungen der P-Düngung auf den Ertrag unterhalb $10 \text{ mg P}_2\text{O}_5/100 \text{ g Boden}$, auf einigen Standorten keine P-Düngungseffekte auch unterhalb dieses Gehaltswertes): Zum einen zeigen sich tendenzielle und signifikante P-Düngungseffekte im Bereich unterhalb $10 \text{ mg P}_2\text{O}_5/100 \text{ g Boden}$. Andererseits weisen die Ertragsergebnisse der 0-Parzellen in Rottenhaus und Zwettl und der P1-Düngungsvarianten in Rottenhaus trotz tiefer $P_{CAL/DL}$ -Gehalte im Boden auf große P-Mobilisierungsleistungen hin.

Für die Praxis ist aus den Versuchen bei aller Vorsicht der Interpretation von Dauerversuchsergebnissen (vgl. KUNDLER, 1982) zu folgern, dass nach Anhebung der Gehaltswerte in den C-Bereich (in Rottenhaus auch darunter), wie sie nach 20-jähriger P1-Düngung erfolgt ist, eine zeitlich befristete Düngungsunterlassung ohne signifikante Ertragseinbußen möglich ist.

Was die Beziehungen zwischen Ertrag und $P_{CAL/DL}$ -Gehalten betrifft, ergeben die Regressions- und Korrelationsanalysen für die Kulturen Sommergerste, Winterweizen und Zuckerrübe zwar signifikante bis hochsignifikante

Korrelationskoeffizienten (siehe Tabelle 11), die Bestimmtheitsmaße der linearen Regressionen sind jedoch sehr niedrig (0,024 bis 0,277), was angesichts der Abflachung der Ertragskurve bei zunehmendem $P_{\text{CAL/DL}}$ -Gehalt nicht überrascht. Aber auch bei Betrachtung des $P_{\text{CAL/DL}}$ -Bereiches kleiner 25 mg $P_2O_5/100$ g Boden verbessern sich die Korrelationen bzw. linearen Bestimmtheitsmaße gegenüber dem gesamten $P_{\text{CAL/DL}}$ -Bereich nur in 3 von 8 Fällen, und das nur um max. 25 %. Dies zeigt, dass auch im niedrigen bis mittleren P-Versorgungsbereich außer dem $P_{\text{CAL/DL}}$ -Gehalt weitere wichtige Einflussgrößen das Ertragsgeschehen bestimmen (z. B. Vorfrucht, Witterung, P-Mobilisierung aus dem Unterboden).

Anmerkungen

- 1 Für die Absicherung von der ungedüngten 0-Variante ist der Unterschied von beiden 0-Parzellen erforderlich.
- 2 Da die Erträge der 0-Parzellen im Vergleich zu P1 Tho in der Regel zurückgehen, ist davon auszugehen, dass bei einer multivariaten Regression der Ertragsrückgang über alle Kulturen bei jedem Standort signifikant ist.

Literatur

- ANONYM (1976): Global 2000, der Bericht an den Präsidenten, 12. Auflage 1981, Verlag Zweitausendeins, Frankfurt.
- BMLF (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft) (1999): Richtlinien für die sachgerechte Düngung. Fachbeirat für Bodenfruchtbarkeit und Bodenschutz, Wien.
- CORBRIDGE, D. E. (1990): Phosphorus – An outline of its chemistry, biochemistry and technology, 4. Aufl., Elsevier, Amsterdam.
- DEL CAMPILLO, M. C., S. E. A. T. M. VAN DER ZEE and J. TORRENT (1999): Modelling long term phosphorus leaching and changes in phosphorus fertility in excessively fertilized acid sandy soils. *European Journal of Soil Science*, 50, 391–399.
- EDER, M. (1998): Der Biologische Landbau in Österreich. Situationsdarstellung und Produktionsstrukturanalysen. Dissertation, Universität für Bodenkultur, Wien.
- EGNER, H. und H. RIEHM (1955): Doppellactatmethode. In: THUN, R., R. HERMANN und E. KNICKMANN (Hrsg.): Methodenbuch Bd. 1, Die Untersuchung von Böden, 3. Aufl. Neumann Verlag, Radebeul und Berlin.
- FINCK, A. (1992): Dünger und Düngung, 2. Aufl., VCH-Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim.
- HECKRATH, G. (1998): Phosphorus accumulation and leaching in clay loam soils of the Broadbalk experiment. Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Nr. 42, Universität Kiel.
- HODGE, C. A. (1994): Growth of the world fertilizer industry. In: C. A. HODGE und N. N. POPOVIC (Eds.): Pollution control in fertilizer production. New York.
- JOHNSTON, A. E. and P. R. POULTON (1992): The Role of Phosphorus in Crop Production and Soil Fertility: 150 Years of Field Experiments at Rothamstead, United Kingdom. Proceedings of an International Workshop: Phosphate Fertilisers and the Environment IFDC, March 23–27, 1992, Florida, USA.
- JUNGK, A., N. CLAASEN, V. SCHULZ und J. WENDT (1993): Pflanzenverfügbarkeit der Phosphatvorräte ackerbaulich genutzter Böden – Langfristige Feldversuche zur Nutzbarkeit des Bodenphosphors und zur Bewertung der Bodenuntersuchung. *Z. für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 156, 397–406.
- KÖCHL, A. (1977): Ergebnisse einer Serie von Feldversuchen zur Eichung der Bodenuntersuchung. *Landwirtschaftliche Forsch.*, Sonderheft 34/II, Kongreßband 1977, 139–140.
- KÖCHL, A. (1979): Erste Ergebnisse einer Feldversuchsreihe zur Eichung der Bodenuntersuchungsmethodik. *Die Bodenkultur* 30, 333–351.
- KÖCHL, A. (1985): Untersuchungen über den optimierten Phosphat- und Kalieinsatz zur Zuckerrübe. Bericht des Internationalen Instituts für Zuckerrübenforschung über den 48. Winterkongress in Brüssel, 43–57.
- KÖCHL, A. (1988): Beziehungen zwischen bodenanalytischen Daten und Felddaten. *Mitt. d. Österreichischen Bodenkundl. Ges.*, 36, 25–38.
- KÖRSCHENS, M. und A. PFEFFERKORN (1999): Bewertung der Nährstoffgehalte im Statischen Düngungsversuch Bad Lauchstädt. In: W. MERBACH und M. KÖRSCHENS (Hrsg.): Dauerdüngungsversuche als Grundlage für nachhaltige Landnutzung und Quantifizierung von Stoffkreisläufen, Internationales Symposium in Halle, 3.–5. Juni 1999, UFZ-Nachrichten, 29–32.
- KÖSTER, W. und P. SCHACHTSCHABEL (1983): Beziehung zwischen dem durch Phosphatdüngung erzielbaren Mehrertrag und den Phosphatgehalten im Boden, *Z. für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 146, 536–542.
- KUNDLER, P. (1982): Die wichtigsten Aussagen der Dauerversuche zur Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit. *Tag. Ber. Akad. Landwirtsch.-Wiss. DDR*, 205, 5–16.

- LANG, H. und J. DRESSEL (1997): N-P-K-Düngungseffekte in landwirtschaftlichen Kulturen auf zwei bodenmäßig verschiedenen, aber klimatisch einheitlichen Standorten – 40 bzw. 60 Jahre Dauerfeldversuche am Limburgerhof. Arch. Acker- Pfl. Bodenkd., 42, 211–234.
- LEINWEBER, P., R. MEISSNER, K.-U. ECKHARDT und J. SEEGER (1999): Management effects on forms of phosphorus in soil and leaching losses. European Journal of Soil Science, 50, 413–424.
- MENGEL, K. (1986): Umsatz im Boden und Ertragswirkung rohphosphathaltiger Düngemittel. Z. Pflanzenernähr. Bodenkd. 149, 674–690.
- MERBACH, W., L. SCHMIDT und L. WITTENMAYER (Hrsg.) (1999): Die Dauerdüngungsversuche in Halle (Saale): Beiträge aus der Hallenser Pflanzenernährungsforschung. Teubner Verlag, Stuttgart, Leipzig.
- NÄTSCHER, L. und U. SCHWERTMANN (1987): Die Veränderung der Phosphatintensität der Bodenlösung eines Pelosol-Pseudogleys nach Grünlandumbruch, Z. für Pflanzenernährung und Bodenkunde 150, 42–46.
- ÖHMICHEN, J. (1983): Pflanzenproduktion. Bd. 1: Grundlagen. Paul Parey, Berlin und Hamburg.
- 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 Bodenphosphats im Statischen Nährstoffmangelversuch Thyrow. Arch. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenkunde 26 (10), 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.
- PAGEL, H. (1987): Phosphorvorräte und Phosphornachlieferungsvermögen der Böden. Tagungsbericht der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR 257, 59–66.
- REICHARD, R. (1969): Ein langjähriger Phosphatversuch. Z. Pflanzenernähr. Bodenkd. 123, 22–32.
- RÜBENSAM, P. und G. RAUHE (1969): Boden, Klima, Düngung und Ertrag, zitiert nach H. H. NOWACK (1990): Phosphorversorgung biologisch bewirtschafteter Äcker und Möglichkeiten der Bioindikation. Dissertation, Göttingen.
- SHELLER, E. (1992): Die Düngungspraxis im Ökologischen Landbau – unverantwortlich oder wissenschaftlich fundiert? In: H. VOGTMANN (Hrsg.): Ökologische Landwirtschaft – Landbau mit Zukunft. Alternative Konzepte 70, Verlag Müller, Karlsruhe, 93–110.
- SCHÜLLER, H. (1969): Die CAL-Methode, eine neue Methode zur Bestimmung des pflanzenverfügbaren Phosphates im Boden. Z. Pflanzenernähr. Bodenkd. 123, 49–63.
- SCHÜLLER, H., TH. REICHARD und K. NEMETH (1975): Beziehungen zwischen P-Düngung, Ertrag, P-Entzug und Methoden der Bodenuntersuchung. 1. Mitteilung. Landwirtschaftliche Forschung 28 (2), 147–157.
- STEFFENS, D. (1984): Wurzelstudien und Phosphat-Aufnahme von Weidelgras und Rotklee unter Feldbedingungen. Z. für Pflanzenernährung und Bodenkunde 147, 85–97.
- STUMPE, H., J. GARZ und H. SCHARF (1994): Wirkung der Phosphatdüngung in einem 40-jährigen Dauerversuch auf einer Sandlöß-Braunerde in Halle. Z. für Pflanzenernährung und Bodenkunde 157, 105–110.
- UMWELTBUNDESAMT Berlin (UBA, Hrsg.) (1994): Stoffliche Belastung der Gewässer durch die Landwirtschaft und Maßnahmen zu ihrer Verringerung. Berichte Umweltbundesamt 94, 2, Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- WEBER, A., T. LINDENTHAL und J. HEß (1997): Phosphor-Import über mineralische und organische Zukaufdünger auf 109 ökologisch wirtschaftenden Betrieben in Österreich. In: U. KÖPKE und J.-A. EISELE (Hrsg.): Beiträge zur 4. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau, 3.–4. März 1997, Verlag Köster, Berlin, 143–150.
- 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. für Pflanzenernährung und Bodenkunde 156, 301–306.
- WERNER, W. (1990): Die Auswirkungen neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse auf die zukünftige Strategie der Phosphatdüngung. Tag.-Ber. Akad. Landwirtsch.-Wiss. DDR, 289, 301–314.
- WERNER, W. (1991): Forschungsbedarf im Zusammenhang mit den Zielvorstellungen, der Meß- und Voraussagbarkeit von Elementen und Prozessen der Bodenfruchtbarkeit: Bodenchemische Prozesse. Berichte über Landwirtschaft, Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit. Parey, Hamburg und Berlin, 111–113.

Anschrift der Verfasser

Dr. Heide Spiegel, Manfred Mazorek, HR Dipl.-Ing. Arnold Köchl, Bundesamt und Forschungszentrum für Landwirtschaft, Spargelfeldstraße 191, A-1226 Wien, e-mail: aspiegel@bfl.at

Dr. Thomas Lindenthal, Univ. Prof. Dr. Bernhard Freyer, Universität für Bodenkultur, Institut für Ökologischen Landbau, Gregor-Mendelstraße 33, A-1180 Wien

Dr. Alexander Ploner, Universität für Bodenkultur, Institut für Mathematik und angewandte Statistik, Max Emanuelstraße 17, A-1180 Wien

Eingelangt am 5. Mai 2000

Angenommen am 19. Juli 2000