
Untersuchungen zur Phosphataufnahme von Zwischenfrüchten bei unterschiedlicher P-Versorgung des Bodens

Investigation of P Uptake of Catch Crops under Different P Supply

Bettina Eichler¹ – Adolf Grüner¹ – Imre Vágó²

¹Institut für umweltgerechten Pflanzenbau, Universität Rostock

²Agrarwissenschaftliche Fakultät, Universität Debrecen

ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen eines Gefäßversuches wurden die Phosphataufnahme von 11 verschiedenen Zwischenfrüchten auf 4 Versuchsböden untersucht und vergleichende Betrachtungen zur Veränderung der doppellactat-löslichen P-Gehaltes (P(DL)) im Boden angestellt. Zur Charakterisierung des Einflusses der P-Versorgung auf morphologische Wurzelparameter erfolgte die Anlage eines zusätzlichen Modellversuches mit dem Substrat Quarzsand. Es traten signifikante Unterschiede hinsichtlich der P-Aufnahme zwischen den geprüften Varianten auf. Bei guter P-Versorgung hatten auf den Sandböden Buchweizen, Mais und Ölrrettich die höchsten P-Aufnahmen und auf den Lehm Böden ebenfalls Buchweizen und Mais, aber auch Serradella. Unter P-Mangelbedingungen entzogen Buchweizen, Mais und Ölrrettich mehr Phosphor als alle anderen geprüften Arten. Für die Lehm Böden konnte im Unterschied zu den Sandböden kein statistisch gesicherter Zusammenhang zwischen aufgenommener P-Menge und Veränderung der Menge an DL-löslichem Phosphat im Gefäß ermittelt werden. Bei allen geprüften Varianten war die P-Aufnahme durch die Fruchtarten größer als die Verringerung der P(DL)-Menge je Gefäß. Der Anteil an DL-löslichem Phosphat am Gesamtposphatgehalt des Bodens verringerte sich während der Versuchszeit nur auf den beiden Sandböden. Die P-Aufnahme, die Wurzellänge sowie das Wurzel/Spross-Verhältnis hingen signifikant von der angebauten Fruchtart sowie von der Wasserlöslichkeit der zugegebenen P-Verbindung ab. Bei Zugabe des leichtlöslichen KH_2PO_4 erhöhte sich im Vergleich zu den Varianten mit den wasserunlöslichen P-Verbindungen die P-Aufnahme der Pflanzen während sich das Wurzel/Spross-Verhältnis verringerte.

SUMMARY

The P uptakes of 11 different catch crops on four soils were estimated and compared with changes of double lactate soluble Phosphorus (P(DL)) in soil within a vessel trial. Additionally a model trial with quartz sand was carried out for investigations of the influence of P supply on root parameters. The differences of P uptake in dependence of the proofed variants were significant. Under a sufficient P supply Buckwheat, Maize and Oil radish had the highest P uptake on sandy soils, on loamy soil also Buckwheat and Maize but Serradella too. Under P deficiency the withdrawals of Phosphorus for Buckwheat, Maize and Oil radish were found to be the highest. In contrast to the sandy soils for the loamy soils no significant relation between the P uptake by plants and changes in the P-DL amount in soil could be found. For all variants the P uptake by plants were higher than the reduction of the P-DL amount in soil. The rate of P-DL content on the total P content in

soil reduced while the two trial years only in sandy but not in loamy soils. The P uptake, the root length and the root/shoot relationship depends significantly on the cultivated crop and the added P compound. The added water soluble KH_2PO_4 caused a higher P uptake but a lower root/shoot-relationship than the water insoluble P compounds.

Einleitung

In den westeuropäischen Staaten weisen viele landwirtschaftliche Böden, meist bedingt durch hohe Tierkonzentrationen, eine Überversorgung mit Phosphor auf, die zur Belastung von Grund- und Oberflächengewässern beiträgt (Tunney et al., 1997; Isermann, 1998). Gleichzeitig ist im letzten Jahrzehnt besonders in Osteuropa die P-Zufuhr extrem zurückgegangen, wodurch der Anteil unterversorgter Flächen zunimmt (Frohberg, 2001; Loch-Szász, 2001). Auf Grund der finanziellen Mängel ist eine Abhilfe durch verstärkten Einsatz von mineralischen P-Düngemittel kurzfristig nicht zu erwarten, und auch die Ausbringung organischer Düngemittel ist auf Grund der geringen Viehdichten begrenzt.

Es besteht somit ein Interesse an der Reduzierung von Phosphorverlusten aus der Landwirtschaft und der effektiveren Nutzung im Boden vorhandener Phosphate. Eine Möglichkeit dafür ist der Einsatz nährstoffeffizienter Arten und Sorten, die sich auf Grund physiologischer und morphologischer Strategien an Mangelbedingungen besser als andere Pflanzen anpassen können, indem sie ihren Nährstoffanspruch reduzieren bzw. schwer verfügbare Nährstoffreserven erschließen können.

Weiterhin muss beachtet werden, dass die zahlreichen chemischen Bodenuntersuchungsmethoden häufig relativ ungenau die Menge an pflanzenverfügbaren Phosphaten wiedergeben und nicht uneingeschränkt für Düngungsempfehlungen geeignet sind. Auch ist eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse der unterschiedlichen Methoden nicht immer gegeben (Jászberényi-Loch, 1996; Ehlert, 2001; Eichler, 2001).

Vor diesem Hintergrund wurden Untersuchungen zur Phosphoraufnahme von Zwischenfrüchten auf unterschiedlich mit P versorgten Böden und zu ihrem Einfluss auf den DL-extrahierbaren P-Vorrat sowie die Bestimmung verschiedener Wurzelmerkmale durchgeführt. Damit sollten folgende Fragestellungen beantwortet werden:

1. Welchen Einfluss hat der Zwischenfruchtanbau auf die DL-extrahierbaren Phosphorgehalte im Boden und welcher Zusammenhang besteht zwischen P-Aufnahme der Fruchtarten und der Veränderung der DL-extrahierbaren P-Menge im Boden?
2. Wie unterscheiden sich die Zwischenfrüchte hinsichtlich der Aufnahme wasserunlöslicher P-Verbindungen?
3. Welche wurzelmorphologischen Veränderungen ergeben sich unter P-Mangelbedingungen?

MATERIAL UND METHODE

Mit der oben dargestellten Zielsetzung wurden in vierfacher Wiederholung ein 2-jähriger Freiland-Gefäßversuch und ein Modellversuch durchgeführt. Im Gefäßversuch kamen 11 Zwischenfrüchte unterschiedlicher botanischer Abstammung zum Anbau (Tabelle 1). Die 4 verwendeten Böden stammten von landwirtschaftlich genutzten Flächen in Mecklenburg-Vorpommern und unterschieden sich

in ihrer Korngrößenzusammensetzung und der P-Versorgung (Tabelle 2). Diese Böden wurde aus der Ackerkrume entnommen und hatten in den letzten 2 Jahren vor der Entnahme keine P-Düngung erhalten. Als Versuchsbehälter dienten Mitscherlich-Gefäße, in die 6 kg luftgetrockneter gesiebter Boden gefüllt wurde. Die Düngung erfolgte jeweils vor der Aussaat (Anfang Juni) und betrug je Gefäß 1,4 g NH_4NO_3 , 0,5 g MgCO_3 , 1,4 g K_2SO_4 . Bei dem zweimal geschnittenen Weidelgras wurde nach dem 1. Schnitt erneut die gleiche Menge Stickstoff gedüngt. Drei Wochen nach der Aussaat erfolgte die Reduktion der Pflanzenzahl in den Gefäßen auf den endgültigen Bestand (Tabelle 1). Die Pflanzen wurden mit destilliertem Wasser je nach Bedarf 1-2 mal täglich bis zur Ernte der oberirdischen Pflanzenteile nach 70 Tagen versorgt. Nach Abschluß der Probenahmen wurden die Gefäße für das 2. Versuchsjahr vorbereitet, indem der Boden gesiebt und wieder in die jeweiligen Gefäße gefüllt wurde. Die Gefäße standen zugedeckt bis zur nächsten Aussaat unter Freilandbedingungen.

Tabelle 1

Im Gefäß- und Modellversuch angebaute Zwischenfrüchte

Cultivated catch crops in the vessel and model trial

Fruchtart	Sorte	Pflanzenanzahl Gefäß ⁻¹	
		Modellvers.	Gefäßvers.
Weißer Lupine (<i>Lupinus albus</i>)	Amiga	10	5
Futtererbse (<i>Pisum sativum</i>)	Lippstädter Sorte ¹	10	5
Mais (<i>Zea mays</i>)	Eviva	10	5
Winterrüben (<i>Brassica rapa</i>)	Butow	15	8
Ölrettich (<i>Raphanus sativus</i>)	Rufus	15	-
Weißer Senf (<i>Sinapis alba</i>)	Litember	25	-
Phacelia (<i>Phacelia tanacetifolia</i>)	Lisette	25	8
Serradella (<i>Ornithopus sativus</i>)	Lippstädter Sorte ¹	25	-
Buchweizen (<i>Fagopyrum esculentum</i>)	Lifago	15	8
Einjähriges Weidelgras (<i>Lolium westerwoldicum</i>)	Limella	50	15
Sommerfuttersenfs (<i>Brassica napus</i>)	Jumbo	15	-

¹keine Sortenangabe vom Züchter

Tabelle 2

Fruchtbarkeitskennziffern der im Gefäßversuch verwendeten Böden (mg 100g⁻¹ lufttrockener Boden)

Initial soil parameters for the vessel trial (mg 100g soil⁻¹)

Boden	Bodenart ²	pH CaCl ₂	P (ges.)- Gehalt	P(DL)- Gehalt ³	K(DL)- Gehalt	Mg(DL)- Gehalt	org. Subst. (%)
A	schwach lehmiger Sand	4,07	32,0	5,9 (GK C)	10,0	3,0	0,6
B	toniger Lehm	7,66	31,0	0,8 (GK A)	8,3	10,0	2,6
C	schwach lehmiger Sand	3,86	23,0	4,0 (GK B)	8,3	2,0	0,5
D ¹	sandiger Lehm	6,37	42,0	10,9 (GK D)	12,5	11,0	2,2

¹Boden D wurde erst im 2. Versuchsjahr in den Gefäßversuch aufgenommen

²Einteilung nach % Tonanteil (Anonymus, 1998)

³In Klammern Angabe der Gehaltsklassen (Richtwerte LUFA-Rostock)

Vor der Aussaat und nach der Ernte der Pflanzen wurde der doppellaktat-extrahierbare Phosphor (Hoffmann, 1991) und der Gesamtgehalt an Phosphor (Königswasseraufschluß im Mikrowellensystem)

bestimmt. Die Messungen erfolgten photometrisch. Weiterhin wurde der pH-Wert (CaCl₂) des Bodens ermittelt. In der Pflanzentrockenmasse wurden neben dem P-Gehalt auch die Elemente Ca, Mg, K, N und S

bestimmt um das Kationen/Anionen-Verhältnis bei der Ionenaufnahme abzuschätzen.

Der unter Gewächshausbedingungen angelegte Modellversuch mit 7 der 11 im Gefäßversuch verwendeten Zwischenfrüchten (*Tabelle 1*) diente zusätzlichen Wurzeluntersuchungen. In 1 l-Bechergläser wurden 1 kg phosphorfrees Quarzsandsubstrat und 200 ml einer Nährlösung (siehe *Tabelle 3*) sowie wasserunlösliche Phosphatverbindungen gegeben.

Zur Prüfung kamen folgende Varianten:

1. Nährlösung mit Phosphor (KH_2PO_4)
2. Nährlösung ohne Phosphor + 0,3 g AlPO_4
3. Nährlösung ohne Phosphor + 0,4 g FePO_4
4. Nährlösung ohne Phosphor + 0,5 g $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$
5. Nährlösung ohne Phosphor

Tabelle 3

Zusammensetzung der Nährlösung für den Modellversuch

Compounds of the nutrient solution in the model trial

Nährstoffverbindung	Menge (g l ⁻¹)
KH_2PO_4 ¹	0,544 (4 mM)
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$	1,180 (5 mM)
KNO_3	0,505 (5 mM)
$\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$	0,493 (3,56 mM)
Menge (mg l ⁻¹)	
MnCl_2	0,503 ($4 \cdot 10^{-3}$ mM)
$\text{CuSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$	0,100 ($4 \cdot 10^{-4}$ mM)
$\text{FeSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$	7,250 ($3 \cdot 10^{-2}$ mM)
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$	0,086 ($3 \cdot 10^{-4}$ mM)
$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$	0,247 ($2 \cdot 10^{-4}$ mM)
H_3BO_3	1,240 ($2 \cdot 10^{-2}$ mM)

¹nur bei Variante 1

Gegossen wurde täglich mit destilliertem Wasser. Nach 30 Tagen erfolgte die Ernte von Spross und Wurzel. Die Wurzellängenbestimmung wurde nach der Methode von Tennant, (1975) durchgeführt, indem 1,0 g Wurzelfrischmasse auf einer Glasplatte, unter der sich ein Gitterraster mit einem Linienabstand von 1 cm befand, ausgebreitet und alle Überkreuzungen der Wurzeln mit dem Raster gezählt wurden. Bei der Ermittlung der Gesamtwurzellänge kam folgende Formel zur Anwendung:

$$\text{Wurzellänge} = 0,786 \cdot \text{Anzahl der Überkreuzungen}$$

Auf der Grundlage der Wurzellänge konnten andere Wurzelmerkmale ermittelt werden (Wendt, 1991): Wurzelradius, Wurzellängendichte, Wurzeloberfläche sowie das Wurzel/Spross-Verhältnis (Wurzellänge je Einheit Sproßgewicht).

Mittels der Varianzanalyse wurde untersucht, ob ein statistisch gesicherter Einfluss der Prüffaktoren auf die Prüfmerkmale vorliegt. Anschließend wurde der Mittelwertvergleich durchgeführt (Tuckey-Test, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%). Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten wurden mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet. Weiterhin erfolgten Regressionsanalysen.

ERGEBNISSE

Erträge, P-Gehalte der Pflanzen und Phosphataufnahme

Erwartungsgemäß ergab sich eine beträchtliche Variation der Erträge der Zwischenfrüchte und ihrer P-Gehalte. Im Durchschnitt aller Fruchtarten war das Ertragsniveau bei den sauren Sandböden (A und C) niedriger als das bei den Lehmböden (B und D) und sank bei mangelhafter P-Versorgung (*Tabelle 4*). Die geringen Erträge von Raps, Senf und Rübsen sind infolge der für diese Arten ungünstigen Aussaatzeit auch durch den Photoperiodismus bedingt.

Tabelle 4

Erträge an Trockenmasse je Gefäß (g) und P-Gehalte in der Trockensubstanz (mg 100 g⁻¹ TM) im Gefäßversuch. Durchschnittswerte aus beiden Versuchsjahren (für Boden D nur für das 2. Versuchsjahr)

Yields of intercrops (g) and P contents in the dry matter (mg 100 g⁻¹ DM) in the vessel trial. Averages of both years (for soil D only for the second year)

Pflanzen	Erträge				P-Gehalte			
	Boden A	Boden B	Boden C	Boden D	Boden A	Boden B	Boden C	Boden D
Lupine	26,1 c	18,1 a	22,0 c	40,3 c	180,2 a	131,0 a	157,5 ab	212,6 a
Erbse	32,2 c	46,2 d	23,6 c	79,3 e	186,3 a	138,6 a	148,4 a	217,2 a
Mais	49,1 d	59,2 e	41,2 d	80,2 e	166,3 a	129,8 a	158,3 ab	190,0 a
Rübsen	16,8 b	21,1 a	15,2 b	33,5 b	215,7 ab	233,4 b	179,3 ab	197,6 a
Ölrettich	27,0 c	28,1 bc	25,8 c	38,4 bc	353,7 d	241,8 bc	275,7 c	350,0 cd
Senf	9,1 a	20,9 a	7,2 a	24,9 a	222,0 b	254,1 c	167,8 ab	279,9 b
Phacelia	9,2 a	29,2 bc	6,6 a	38,5 bc	214,1 ab	233,6 b	196,2 b	407,7 d
Serradella	25,9 c	28,7 bc	23,8 c	50,6 d	293,2 c	213,4 b	272,6 c	380,0 d
Buchweizen	42,4 d	51,8 de	42,2 d	82,9 e	328,3 cd	200,3 b	319,7 d	212,1 a
Weidelgras	31,0 c	32,5 cd	27,9 c	43,8 c	245,9 bc	231,5 b	235,9 bc	318,7 c
Raps	21,2 bc	24,0 ab	15,9 b	28,9 ab	256,2 bc	229,7 b	211,0 b	294,8 bc
Mittelwert	26,4	32,6	22,8	49,2	242,0	203,4	211,1	278,2

Unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede hinsichtlich der Erträge und den P-Aufnahmen der einzelnen Fruchtarten für den jeweiligen Boden (einfaktoriell, ANOVA).

Die P-Gehalte in der Trockensubstanz – gemittelt über die Fruchtarten – folgten den Gehalten der Böden an DL-löslichem Phosphor mit der Reihenfolge B<C<A<D. Allerdings war diese Abfolge nicht bei allen Zwischenfrüchten gegeben. Pflanzenartspezifisch zeigte sich eine beträchtliche Differenzierung der P-Gehalte. Als P-arm ist der Spross von Mais, Lupine und Erbse zu beurteilen, während Ölrettich durchgehend eine hohe P-Konzentration im Spross aufwies.

Die höchsten P-Aufnahmen (Untersucht wurde nur der Spross) hatten sowohl auf den Lehm- als auch auf den Sandböden Buchweizen und Mais. Auf den Sandböden waren diese ebenfalls bei den Varianten Ölrettich und Weidelgras sehr hoch, während sehr große P-Aufnahmen auf den Lehm Böden außerdem noch für Serradella und Erbsen ermittelt wurden. Die geringste P-Aufnahme hatten in diesem Versuch Lupine, Rübsen und Senf, was im Wesentlichen an den geringen Erträgen lag. Im Durchschnitt wurden die höchsten Phosphataufnahmen für den P-reichen Lehm

festgestellt, wobei die Unterschiede zwischen den Fruchtarten zum Teil erheblich waren.

Vergleich von aufgenommener P-Menge und Veränderung der DL-löslichen P-Menge

Am Ende der Versuchszeit hatten alle Fruchtarten dem Boden mehr P entzogen, als die Verringerung der DL-löslichen P-Menge im Gefäß betrug (Tabelle 5). Das galt für alle 4 Versuchsböden. Auf den Sandböden waren die Unterschiede besonders bei den Varianten Buchweizen, Ölrettich und Serradella deutlich. So hatte auf Boden C Buchweizen 269,9 mg P entzogen, die Menge an doppelactatlöslichem Phosphor im Gefäß verringerte sich jedoch nur um 72,0 mg. Bei Ölrettich betrug diese Differenz 94 mg P und bei Serradella 93 mg P Gefäß⁻¹. Der Anbau der beiden monocotylen Fruchtarten Mais und Einjähriges Weidelgras bewirkte hingegen auf beiden Sandböden nur geringe Unterschiede zwischen P-Aufnahme und Änderung der P(DL)-Menge.

Tabelle 5

**P-Aufnahme der Zwischenfrüchte sowie Veränderung der DL-extrahierbaren P-Menge im Boden (Δ DL-P),
Summe aus beiden Versuchsjahren (für Boden D nur für das 2. Versuchsjahr) (in mg P Gefäß⁻¹)**

Crop P uptake and changes in soil DL-P (Δ DL-P) over 2 years (for soil D only for the second year) (mg P vessel⁻¹)

Pflanzen	Boden A		Boden B		Boden C		Boden D	
	P-Aufnahme	Δ DL-P	P-Aufnahme	Δ DL-P	P-Aufnahme	Δ DL-P	P-Aufnahme	Δ DL-P
Lupine	94,1 bc	-60 bc	47,3 a	18 a	69,3 b	-30 bc	85,7 a	-24 abc
Erbse	119,8 cd	-60 bc	128,1 bc	6 a	70,2 b	-12 c	172,3 cd	-6 abc
Mais	163,4 de	-150 a	153,8 c	6 a	130,5 c	-84 ab	152,4 bc	-12 abc
Rübsen	72,7 ab	-12 cd	98,3 b	6 a	54,7 ab	-6 c	66,2 a	-42 abc
Ölrettich	191,0 e	-84 bc	135,9 bc	0 a	142,3 c	-48 bc	134,4 b	-72 a
Senf	40,2 a	6 d	106,0 b	-6 a	24,0 a	-6 c	69,7 a	12 c
Phacelia	39,4 a	12 d	136,2 bc	-6 a	25,9 a	-12 c	157,0 c	0 bc
Serradella	152,2 de	-78 bc	122,3 bc	18 a	129,5 c	-36 bc	192,3 cd	-18 abc
Buchweizen	278,4 f	-90 b	207,6 d	6 a	269,9 d	-72 abc	175,9 cd	18 c
Weidelgras	152,7 de	-132 a	150,5 c	0 a	131,9 c	-108 a	139,6 b	-60 ab
Raps	108,4 bc	-48 c	110,3 bc	0 a	67,1 b	-54 abc	85,2 a	12 c

Unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede hinsichtlich der Veränderung der P-Aufnahme und der DL-P-Gehalte für den jeweiligen Boden (einfaktoriell ANOVA).

Auf dem P-armen Lehm Boden (B) zeigte sich trotz der Phosphorentzüge durch die Pflanzen nach 2 Versuchsjahren im Durchschnitt eine Erhöhung des P(DL)-Gehaltes im Boden. Obwohl die Unterschiede hinsichtlich des P-Entzuges durch die Pflanzen sehr groß waren, konnten in der Veränderung der DL-extrahierbaren P-Menge dieses Bodens keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten gefunden werden.

Für beide Sandböden ließ sich ein gesicherter Zusammenhang zwischen aufgenommener P-Menge

und Veränderung der P(DL)-löslichen P-Menge je Gefäß ermitteln, für die Lehm Böden hingegen nicht (Tabelle 6). Auch die bei den Sandböden während des Versuches ermittelte Verringerung des Anteils an DL-löslichem Phosphor am gesamten Phosphor im Boden konnte auf den beiden Lehm Böden nicht festgestellt werden. Hier trat eine Steigerung des P(DL)-Anteils während des Versuches ein. Für alle Versuchsböden ließ sich ein statistisch gesicherter Zusammenhang zwischen P-Aufnahme und Veränderung der Pges.-Gehalte im Boden nachweisen (Tabelle 6).

Tabelle 6

Beziehung zwischen der Veränderung der P(DL)-Menge im Boden und der P-Aufnahme der Pflanzen ($\Delta P(\text{DL})/\text{P-Aufnahme}$) und zwischen der Veränderung der Pges.-Menge im Boden und der P-Aufnahme der Pflanzen ($\Delta P_{\text{ges}}/\text{P-Aufnahme}$) (Pearsons Correlation Coefficient)

Relation between the changes of P(DL) amount in soil and P uptake by plants ($\Delta P(\text{DL})/\text{P-uptake}$) and between the changes of amount of total P and P uptake by plants ($\Delta P_{\text{ges}}/\text{P-uptake}$) (Pearsons Correlation Coefficient)

	Boden A	Boden B	Boden C	Boden D
$\Delta P(\text{DL})/\text{P-Aufn.}$	0,72*	0,30	0,66 *	0,05
$\Delta P_{\text{ges.}}/\text{P-Aufn.}$	0,88*	0,87*	0,68*	0,59*

*signifikant bei Signifikanzlevel $\alpha = 0,01$

Auswirkung der P-Versorgung auf die Wurzelmorphologie

Die P-Aufnahme hängt nicht nur von den Versorgungsbedingungen des Bodens ab, sondern auch von den Aneignungs- und Mobilisierungsmöglichkeiten der Pflanzen.

Die im Modellversuch zugegebenen P-Verbindungen eigneten sich in unterschiedlichem Maße für die P-Ernährung der Pflanzen und

beeinflussten die Ausbildung morphologischer Wurzelmerkmale. Die höchste P-Aufnahme wurde nach der Zugabe des leichtlöslichen Phosphates (KH_2PO_4) und des Tricalciumphosphates ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) ermittelt (Tabelle 7). Das Eisenphosphat konnte von den Pflanzen nicht genutzt werden. Bei der Zugabe dieser Verbindung ergab sich keine signifikante Erhöhung der P-Aufnahme gegenüber der Variante ohne Phosphorzugabe.

Tabelle 7

P-Aufnahme der Zwischenfrüchte (mg P Gefäß⁻¹) bei Zugabe verschiedener Phosphorverbindungen

P uptake of the catch crops in dependence on the added phosphorus compounds (mg P vessel⁻¹)

Fruchtart	KH_2PO_4	FePO_4	AlPO_4	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	P-	Mittelwert
Buchweizen	10,40 c	1,83 a	5,01 b	8,60 c	1,62 a	5,49 ab
Lupine	13,19 d	5,39 b	8,01 c	9,10 c	3,15 a	7,77 bc
Rübsen	10,63 c	1,40 a	5,97 b	10,39 c	1,40 a	6,00 ab
Phacelia	5,81 c	1,17 a	3,91 b	6,27 c	1,11 a	3,66 a
Serradella	6,30 c	1,51 a	5,48 b	7,60 c	1,48 a	4,48 a
Mais	15,91 d	4,96 a	7,78 b	11,93 c	4,44 a	9,00 c
Weidelgras	8,76 b	1,81 a	2,73 a	2,48 a	0,88 a	3,34 a
Mittelwert	10,14 d	2,58 a	5,56 b	8,05 c	2,01 a	

Unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede hinsichtlich der P-Aufnahme in Abhängigkeit der P-Verbindung bei den einzelnen Fruchtarten (einfaktoriell, ANOVA).

Die größten Wurzellängen ergaben sich im Durchschnitt der Zwischenfrüchte bei der Zugabe von $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ sowie der leichtlöslichen P-Form (Tabelle 8). Phacelia und Serradella reagierten hingegen auf die Zugabe aller wasserunlöslichen P-Verbindungen mit einer signifikanten Steigerung der Wurzellängen gegenüber der KH_2PO_4 -Variante. Die höchsten Wurzellängen hatten Mais und Einjähriges Weidelgras. Die Werte lagen hier bei ca. 240 m und 160 m Gefäß⁻¹. Lupine wies mit einem durchschnittlichen Wert von 37 m die geringste Wurzellänge auf.

Bei mangelnder P-Versorgung kommt es gewöhnlich zu einer Vergrößerung des Wurzel/Spross-Verhältnisses. Dadurch steht einer Einheit Spross mehr Wurzeloberfläche für die Nährstoffversorgung zur Verfügung. Das Wurzel/Spross-Verhältnis (ermittelt aus Wurzellänge in m je g Spross-TM) erhöhte sich bei allen Fruchtarten, wenn die Nährlösung kein leichtlösliches Phosphat enthielt (Tabelle 9). Die Zugabe von FePO_4 förderte bei den einzelnen Zwischenfrüchten die Wurzellänge je Einheit Sprossmasse am meisten. Die einzige Ausnahme ist

Mais. Hier ergab sich nach Zugabe der Nährlösung ohne Phosphor das größte Verhältnis. Zwischen den Fruchtarten bestanden große Unterschiede im Wurzel/Spross-Verhältnis. Bei Weidelgras war es unabhängig von der zugegebenen P-Verbindung am größten, bei Lupine am geringsten. Die über alle Fruchtarten gemittelten Wurzellängen und Wurzel/Spross-Verhältnisse zeigen in Abhängigkeit von der zugegebenen P-Verbindung keine signifikanten Unterschiede, was mit den großen wurzelmorphologischen Unterschieden der Fruchtarten begründet werden kann.

Das Wurzel/Spross-Verhältnis steht im Zusammenhang zum P-Gehalt im Spross. Die Korrelation ist negativ; das heißt, je höher der P-Gehalt war, um so geringer war das Verhältnis. Sie ist jedoch nicht bei allen Fruchtarten signifikant (Tabelle 10). Bei der 2-faktoriellen Varianzanalyse zeigten sich die Wirkungen der Fruchtarten und der P-Verbindung auf die P-Aufnahme, die Wurzellängen und das Wurzel/Spross-Verhältnis signifikant (Tabelle 11).

Tabelle 8

Wurzellänge der Zwischenfrüchte (m Gefäß⁻¹) bei Zugabe verschiedener Phosphatverbindungen

Root length of the catch crops at addition of different P compounds (m vessel⁻¹)

Fruchtart	KH ₂ PO ₄	FePO ₄	AlPO ₄	Ca ₃ (PO ₄) ₂	P-	Mittelwert
Buchweizen	52,13 c	42,53 b	50,49 c	43,83 b	34,13 a	44,60 a
Lupine	34,43 b	49,27 c	36,63 b	39,50 b	25,50 a	37,07 a
Rübsen	43,33 b	40,00 b	52,07 c	62,03 d	32,87 a	46,06 a
Phacelia	28,00 a	47,33 b	48,56 b	48,07 b	35,57 a	41,50 a
Serradella	39,77 a	64,60 bc	59,20 b	71,07 c	43,73 a	55,67 a
Mais	271,97 b	209,87 a	207,13 a	248,60 b	268,90 b	241,20 c
Weidelgras	202,00 c	167,63 b	177,80 b	196,80 c	66,37 a	162,12 b
Mittelwert	96,0	88,7	90,3	101,4	72,4	

Unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede der Wurzellängen in Abhängigkeit der P-Verbindung bei den einzelnen Fruchtarten (einfaktoriell, ANOVA).

Tabelle 9

Verhältnis aus Wurzellänge und Sprossgewicht der Zwischenfrüchte bei Zugabe verschiedener Phosphatverbindungen (m Wurzel 1 g Sross-TM⁻¹)

Relation between root length and shoot weight of the catch crops at addition of different P compounds (m root 1 g shoot-DM⁻¹)

Fruchtart	KH ₂ PO ₄	FePO ₄	AlPO ₄	Ca ₃ (PO ₄) ₂	P-	Mittelwert
Buchweizen	13,97 a	23,21 b	19,74 ab	14,44 a	20,66 ab	18,41 b
Lupine	5,06 a	9,60 c	5,50 a	7,62 cd	6,91 ab	6,94 a
Rübsen	13,02 a	28,65 b	22,68 b	19,40 ab	26,40 b	22,03 bc
Phacelia	18,36 a	40,75 b	28,59 ab	17,38 a	33,38 b	27,69 cd
Serradella	22,17 a	47,01 c	30,19 b	33,65 b	34,54 b	33,51 de
Mais	36,78 a	38,48 a	35,72 a	34,37 a	49,27 b	38,93 e
Weidelgras	63,29 a	90,31 a	85,38 a	83,64 a	61,00 a	76,73 f
Mittelwert	24,67	39,71	32,54	30,07	33,17	

Unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede der Wurzel/Spross-Verhältnisses in Abhängigkeit der P-Verbindung bei den einzelnen Fruchtarten (einfaktoriell, ANOVA).

Tabelle 10

Funktionen zur Berechnung der Beziehung zwischen den P-Gehalten im Spross (x; mg P 100 g TM⁻¹) und den Wurzellängen (y; m Gefäß⁻¹) bei den einzelnen Zwischenfrüchten

Functions for calculating the Relationships between the P contents of the shoots (x; mg P 100 g DM⁻¹) and the root length (y; m vessel⁻¹) for the catch crops

Fruchtart	Regressionsgleichung	Pearsonscher Korrelationskoeffizient (r)
Buchweizen	y = -0,04 x + 26,09	-0,944*
Lupine	y = -0,02 x + 9,41	-0,445
Rübsen	y = -0,05 x + 32,30	-0,879*
Phacelia	y = -0,08 x + 44,80	-0,946*
Serradella	y = -0,05 x + 45,07	-0,610*
Mais	y = -0,06 x + 47,48	-0,463
Weidelgras	y = -0,07 x + 83,32	-0,330

*signifikant bei Signifikanzlevel $\alpha = 0,05$

Einfluss der geprüften Faktoren auf die P-Aufnahme, die Wurzellänge und das Wurzel/Spross-Verhältnisses
(Angabe der Signifikanzniveaus und der Effektstärke der Haupt- und Interaktionseffekte)

Influences of the proofed factors on P uptake, root length and root/shoot relationship
(specification of significance level and effect size for main and interaction effects)

	Fruchtart		P-Verbindung		Wechselwirkung Fruchtart*P-Verb	
	Sign.-Niveau (p)	Eta ²	Sign.-Niveau (p)	Eta ²	Sign.-Niveau (p)	Eta ²
P-Aufnahme	0,001	0,961	0,001	0,990	0,001	0,827
Wurzellänge	0,001	0,998	0,001	0,933	0,001	0,958
Wurzel/Spross-Verh.	0,001	0,982	0,011	0,771	0,052	0,464

DISKUSSION

Im Gefäßversuch ließen sich bezüglich des Ertrages und der P-Aufnahme von Zwischenfrüchten auf 4 verschiedenen Böden teilweise erhebliche Unterschiede zwischen den Varianten ermitteln. Pflanzen, die ertraglich nur geringfügig auf unzureichende P-Ernährung reagieren, haben eine hohe Phosphoreffizienz (Gerath, 1993). Nach den vorliegenden Ergebnissen war das für Buchweizen, Ölrettich und Einjähriges Weidelgras auf Sandböden und Raps und Senf auf Lehmböden der Fall. Da Phosphor weltweit einer der am meisten limitierenden Faktoren in der Landwirtschaft ist, könnte zukünftig die Suche nach P-effizienten landwirtschaftlichen Kulturen eine größere Rolle spielen. Andererseits kann es bei hoher P-Zufuhr zu einer Steigerung des Nährstoffgehaltes in der Pflanze kommen, ohne daß der Ertrag steigt (Kaselowski, 1990).

Der Einsatz von Zwischenfrüchten, die eine hohe P-Aufnahme haben, könnte infolge des zusätzlichen P-Entzuges zum Abbau hoher Phosphatanreicherungen im Boden und zu einer Reduzierung von Phosphatverlusten aus der Landwirtschaft beitragen. Nach den Ergebnissen des Gefäßversuches wären Buchweizen, Mais und Ölrettich auf Sandböden sowie Buchweizen, Serradella und Erbse auf Lehmböden dafür in Betracht zu ziehen. Zu beachten ist, daß die Erträge und damit auch die P-Aufnahme der Zwischenfrüchte bei ungünstigem Aussaatzeitpunkt drastisch sinken können. Ergebnisse zu den kruzifernen Zwischenfrüchten im Gefäßversuch und zu Buchweizen in einem Feldversuch (Eichler, 2001) bestätigen dies. Die Einordnung von Zwischenfrüchten in die heutigen Fruchtfolgen dürfte sich häufig als schwierig erweisen.

Bei allen geprüften Varianten war die P-Aufnahme durch die Fruchtarten größer als die Verringerung der P(DL)-Menge je Gefäß. Das heißt, dass die Pflanzen zur Deckung des eigenen Bedarfs Phosphate, die durch die DL-Methode nicht erfaßt wurden, mobilisiert haben bzw. daß während der Versuchszeit Phosphate aus schwerlöslichen Fraktionen durch bodenchemische Prozesse in den verfügbaren Pool nachgeliefert wurden.

Unter P-Mangelbedingungen könnten hohe P-Aufnahmen einiger Zwischenfrüchte, die nur geringfügige Auswirkungen auf den Gehalt an DL-

löslichen Phosphaten im Boden haben, bei der Verwendung dieser Fruchtarten als Gründünger zur Verbesserung der P-Ernährung in der Fruchtfolge beitragen. Nach den Ergebnissen des Gefäßversuches wäre das zum Beispiel für Buchweizen, Ölrettich und Serradella der Fall. Allerdings sind zur weiteren Klärung fortführende Untersuchungen zur Umsetzung der in den Boden eingearbeiteten Zwischenfruchtmasse und zur Mineralisierung und Verfügbarkeit der darin enthaltenen P-Verbindungen notwendig. Statistisch gesicherte Zusammenhänge zwischen dem P-Entzug durch die Pflanzen und Verringerung der P(DL)-Menge im Boden konnten nur bei den Sand- nicht jedoch bei den Lehmböden ermittelt werden. Diese Ergebnisse spiegeln die allgemeine Problematik der P-Bestimmungsmethodik wider. International existieren zahlreiche Methoden zur Ermittlung des verfügbaren Phosphors, die zwar momentane Gehalte im Boden wiedergeben, jedoch nicht die ständig im Boden ablaufenden Mobilisierungs- und Festlegungsprozesse berücksichtigen und so zu ungenauen Prognosen und Empfehlungen führen können. Deshalb sind genauere Informationen über das tatsächliche Angebot an pflanzenverfügbarem Phosphor für einen Standort nur durch Feldversuche vor Ort zu erlangen (Kerschberger et al., 1997).

Auch pflanzliche Anpassungsmechanismen und Interaktionen von Pflanze und Boden werden häufig unterschätzt (Schilling et al., 1998). So können zum Beispiel Wurzelabscheidungen von Pflanzen entscheidend zur Erhöhung der Phosphatverfügbarkeit im Boden beitragen (Gerke, 1994; Staunton-Leprince, 1996; Gransee, 1997). Darüber hinaus sind auch morphologische Anpassungsmechanismen bekannt. Pflanzen können bei P-Mangel ihr Wurzelsystem relativ zum Spross vergrößern (Silberbusch-Barber, 1983; Gerke, 1995). Dadurch erhöht sich das Bodenvolumen, welches zur P-Versorgung der Pflanze beiträgt, und der P-Anspruch bzw. der P-Influx der Einzelwurzel sinkt. Im Modellversuch bestand ein Zusammenhang zwischen zugeführter P-Verbindung, P-Gehalten in der pflanzlichen Trockenmasse und Wurzel/Spross-Verhältnis. Von den 3 zugegebenen wasserunlöslichen P-Verbindungen konnten die Pflanzen Tricalciumphosphat am besten aufnehmen, während das Eisenphosphat sich nicht zur P-Ernährung der Pflanzen eignete. Die P-Aufnahme betrug nur durchschnittlich ein Viertel gemessen an der Aufnahme bei der leichtlöslichen P-Variante und es ergab sich

keine signifikante Erhöhung der P-Aufnahme gegenüber der Variante ohne Phosphorzugabe. Lupine bildet hierbei eine Ausnahme. Hier ließ sich eine statistisch gesicherte Erhöhung der P-Aufnahme bei Zugabe von Eisenphosphat im Vergleich zur Nullvariante ermitteln. Gerke (1995) untersuchte, dass bei Mangel an leichtlöslichen Phosphaten die weiße Lupine organische Substanzen im Proteoidwurzelbereich ausscheidet. Je geringer die P-

Gehalte im Spross waren, um so mehr vergrößerte sich die Wurzellänge im Verhältnis zur Sprossmasse. In der Höhe des Wurzel/Spross-Verhältnisses unterschieden sich die Fruchtarten beträchtlich. Bei Einjährigem Weidelgras und Mais war dieses Verhältnis sehr groß, bei Lupine hingegen gering. Das große Wurzelsystem vieler monocotyler Fruchtarten erschließt ein hohes Bodenvolumen, was die Versorgung der Pflanzen auch bei P-Mangelbedingungen gewährleisten kann.

LITERATUR

- Anonymus (1998): Düngung 1998. Hinweise und Richtwerte für die landwirtschaftliche Praxis. Herausgeber: Ministerium für Landwirtschaft und Naturschutz Mecklenburg-Vorpommern
- Ehlert, P. (2001): Evaluation of long-term trials with IMPHOS. Fate of phosphorus in soil. EU-COST action 832: Quantifying the Agricultural Contribution to Eutrophication. Minutes of the 3rd meeting of Working Group 1 'Phosphorus inputs from agriculture'. University of Rostock, Germany 22-24 March, 2001
- Eichler, B. (2001): The Effect of fertilising strategies on important soil P parameters. 12th World Fertilizer Congress, Beijing August 2001, Book of Papers
- Eichler, B. (2001): Untersuchungen zur Auswirkung organischer Düngemittel auf ausgewählte Phosphatgehalte im Boden. Ergebnisse eines 2-jährigen ungarisch-deutschen Forschungsprojektes. Kongressband VDLUFA-Tagung in Berlin, 126.
- Frohberg, K. (2001): Wirtschaftliche Ausgangssituation für die Integration der MOEL unter den Bedingungen einer gemeinsamen Landwirtschaft. 113. VDLUFA-Kongress September 2001, Kongressband Teil I, Vorträge zur Plenartagung, 33-54.
- Gerath, H. (1993): Entwicklung von stickstoffeffizientem Winterraps. Forschungsreport Ernährung, Landwirtschaft, Forsten 8, 9-10.
- Gerke, J. (1994): Kinetics of soil phosphate desorption as affected by citric acid. Z. Pflanzennähr. Bodenk. 157. 17-22.
- Gerke, J. (1995): Chemische Prozesse der Nährstoffmobilisierung in der Rhizosphäre und ihre Bedeutung für den Übergang vom Boden in die Pflanze. Habilitationsschrift, Univ. Göttingen
- Gransee, A. (1997): Untersuchungen zum Einfluß von Wurzelabscheidungen auf den Gehalt an pflanzenverfügbarem Phosphat in der Rhizosphäre. VDLUFA-Kongreßband 1997
- Hoffmann, G. (1991): Die Untersuchung von Böden. VDLUDFA-Methodenbuch Bd. 1, 4. Aufl. VDLUFA-Verlag Darmstadt.
- Isermann, K. (1998): Actual non-sustainable and future sustainable phosphorus balance of agriculture and waste water management in Germany. Practical and innovative measures for the control of agricultural phosphorus losses to water. An OECD sponsored workshop, 16.-19.June, 1998, Antrim (Northern Ireland)
- Jászberényi, I.-Loch, J. (1996): Soil Phosphate Adsorption and Desorption in 0,01M Calcium Chloride Electrolyte. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 27. 5-8. 1211-1225.
- Kaselowski, J. (1990): Wirkung von Lagerungsdichte und Wassergehalt des Bodens auf die Verfügbarkeit von Phosphat und Kalium sowie das Nährstoffaneignungsvermögen von Pflanzen. Diss. Univ. Göttingen
- Kerschberger, M.-Hege, U.-Jungk, A. (1997): Phosphordüngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf. Standpunkt VDLUFA
- Loch, J.-Szász, G. (2001): Das Ökologische Potential und die Pflanzenproduktion in Ungarn. 113. VDLUFA-Kongress September 2001, Kongressband Teil I, Vorträge zur Plenartagung, 87-96.
- Müller, R. (1988): Bedeutung des Wurzelwachstums und der Phosphatmobilität im Boden für die Phosphaternährung von Winterweizen, Wintergerste und Zuckerrüben. Diss. Univ. Göttingen
- Schilling, G.-Gransee, A.-Deubel, A.-Lezovic, G.-Ruppel, S. (1998): Phosphorus availability, root exudates, and microbial activity in the rhizosphere. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 161. 465-478.
- Silberbusch, M.-Barber, S. A. (1983): Sensitivity of simulated phosphorus uptake to parameters used by a mechanistic-mathematical model. Plant and Soil 74. 93-100.
- Staunton, S.-Leprince, F. (1996): Effect of pH and some organic anions on the solubility of soil phosphate: Implications for P bioavailability. Europ. J. Soil Sci. 47. 231-239.
- Tennant, D. (1975): A test of modified line intersect method of estimating root length. J. Ecol. 63 B, 995-1001.
- Tunney, H.-Carton, O. T.-Brookes, P. C.-Johnston, E. A. (1997): Phosphorus losses from soil to water. CAB International, Wallingford
- Wendt, J. (1991): Wirkung von Dünger- und Bodenphosphor auf die Phosphatversorgung von Ackerkulturen – Untersuchungen an mehrjährigen Feld- und Gefäßversuchen. Diss. Univ. Göttingen