

Phosphat-Mobilisierung durch Haupt- und Zwischenfrüchte nach Düngung von weicherdigem Rohphosphat im ökologischen Landbau

Phosphate mobilization by cultivating main and catch crop after application of mineral phosphorus fertilizer in organic farming

FKZ: 02OE424

Projektnehmer:

Justus-Liebig-Universität Gießen
Institut für Pflanzenernährung
Heinrich-Buff-Ring 26-32, 35392 Gießen
Tel.: +49 641 9939161
Fax: +49 641 9939169
E-Mail: plant-nutrition@uni-giessen.de
Internet: <http://www.uni-giessen.de>

Autoren:

Steffens, Diedrich; Stamm, Roland; Leithold, Günter; Schubert, Sven

Gefördert vom Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
im Rahmen des Bundesprogramms Ökologischer Landbau (BÖL)

Projektabschlussbericht

über das Projekt

**Phosphat-Mobilisierung durch Haupt- und Zwischenfrüchte nach
Düngung von weicherdigem Rohphosphat im ökologischen Landbau**

Projektnummer: 020E424

vorgelegt

vom Institut für Pflanzenernährung und der Professur für Ökologischen Landbau
Fachbereich Agrarwissenschaften, Ökotoxikologie und Umweltmanagement
der Justus-Liebig-Universität, Gießen

A. Vorwort

Im nachfolgenden Abschlussbericht werden die Ergebnisse des vom BLE genehmigten Projektes „Phosphat-Mobilisierung durch Haupt- und Zwischenfrüchte nach Düngung von weicherdigem Rohphosphat im ökologischen Landbau“ vorgestellt.

Im ersten Teil des Berichtes werden die Ergebnisse aus der Fruchtfolgerotation 2002/2003 dargestellt. Im zweiten Teil des Berichtes, der die von uns erstellten Publikationen umfasst, werden die Ergebnisse aus der Fruchtfolgerotation 2003/2004 komprimiert dargestellt.

Erwähnen möchten wir auch, dass wir im Rahmen unseres Projektes den Workshop „Aspekte der Phosphaternährung und Phosphatdüngung im ökologischen Landbau am 11. Juli 2003 durchgeführt haben.

Dem Bundesprogramm ökologischer Landbau danken wir für die finanzielle Projektförderung.

Ganz besonderer Dank gilt unserer Projektbetreuerin Frau K. Kotzia für die konstruktive Koordination und die Geduld bei der Erstellung unseres Abschlussberichtes.

Inhaltsverzeichnis

I. Tabellenverzeichnis	4
II. Abbildungsverzeichnis	7
1 Einleitung	8
2 Material und Methoden	13
2.1 Feldversuch.....	13
2.1.1 Versuchsstandort	13
2.1.2 Versuchsaufbau	14
2.1.3 Versuchsdurchführung	15
2.1.4 Verwendete Sorten und ackerbauliche Maßnahmen	17
2.2 Gefäßversuch.....	17
2.2.1 Versuchsaufbau	17
2.2.2 Versuchsdurchführung	19
2.3 Analysen	23
2.3.1 Pflanzen	23
2.3.1.1 Erfassung der Erntedaten.....	23
2.3.1.2 Phosphat-Bestimmung.....	25
2.3.1.3 Stickstoff-Bestimmung.....	25
2.3.1.4 C-Bestimmung.....	27
2.3.2 Boden.....	28
2.3.2.1 CAL-Extraktion.....	30
2.3.2.2 DL-Extraktion.....	32
2.3.2.3 EUF-Extraktion	35
2.3.2.4 CaCl ₂ -Extraktion zur N-, C _{org} - und pH-Bestimmung.....	37
2.4 Auswertung der Ergebnisse.....	38
3 Ergebnisse	39
3.1 Gefäßversuch.....	39
3.1.1 Pflanzen	39
3.1.1.1 Erträge der Hauptfrüchte im Gefäßversuch.....	39
3.1.1.2 Nährstoffkonzentrationen in den Hauptfrüchten.....	41

3.1.1.3 Erträge der Zwischenfrüchte	47
3.1.1.4 Nährstoffkonzentrationen in den Zwischenfrüchten	49
3.1.1.5 Nährstoffentzug durch die Zwischenfrüchte	51
3.1.1.6 Ertrag, P-Konzentration und P-Aufnahme sowie N-Konzentration von der Nachfrucht Mais, Gefäßversuch.....	52
3.1.2 Boden.....	56
3.1.2.1 Ergebnisse der CAL-Extraktion	56
3.1.2.2 Ergebnisse der DL-Extraktion.....	58
3.1.2.3 Ergebnisse aus der Elektro-Ultra-Filtration	60
3.1.2.4 Gesamt-N im Gefäßversuch nach Ernte der Hauptfrüchte.....	60
3.2 Feldversuch.....	62
3.2.1 Erträge	62
3.2.2 Nährstoffe	62
3.2.2.1 Konzentrationen	62
3.2.2.2 Entzüge	63
3.2.2.3 Zwischenfrüchte	64
3.2.2.4 Nachfrucht Mais	66
3.2.3 Boden.....	69
3.2.3.1 CAL-extrahierbares Phosphat	69
3.2.3.2 DL-extrahierbares Phosphat.....	69
3.2.3.3 EUF-Analyse	70
3.2.3.4 N _{min}	71
3.2.3.5 pH-Wert.....	72
4 Diskussion.....	73
4.1 Gefäßversuch.....	73
4.1.1 Phosphataufnahme des Spinats	73
4.1.2 Phosphataufnahme des Rapses	75
4.1.3 Phosphataufnahme der Hauptfrüchte	77
4.1.4 Effekte der Hauptfrüchte auf den Boden.....	78
4.1.5 Wirkung der Strohdüngung	80
4.2 Feldversuch.....	83
4.2.1 Phosphataufnahme der Zwischenfrüchte Raps und Spinat	83

4.2.2 Phosphataufnahme der Hauptfrüchte	84
4.2.3 Effekte der Hauptfrüchte auf den Boden.....	85
5 Fazit	89
6 Zusammenfassung.....	90
7 Literatur.....	92
III. Anhang	97

8 Publikationen

8.1 Beitrag zur 8. Wissenschaftstagung: Ökologischer Landbau - Ende der Nische. 1.- 4. März 2005 Witzenhausen	98
8.2 Vortrag auf dem 8. Kongress der European Society of Agronomy in Kopenhagen, 11. - 15. Juli 2004	102
8.3 Flyer für den Workshop	104

I. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Klimadaten und Charakterisierung des Versuchsstandortes	13
Tabelle 2: Düngungsmaßnahmen im Feldversuch	14
Tabelle 3: Übersicht der einzelnen Fruchtfolgevarianten.....	15
Tabelle 4: Sorten und Saatstärken der verwendeten Kulturen im Feldversuch.....	17
Tabelle 5: Gefäßbelegung.....	19
Tabelle 6: Applizierte Düngermengen im Gefäßversuch.....	20
Tabelle 7: Aussat- und Erntetermine der Haupt- und Zwischenfrüchte im Gefäßversuch	20
Tabelle 8: Benötigte N-Menge zum Ausgleich des C/N-Verhältnisses der Vorfruchtreste (Gefäßversuchsstation, November 2002).....	21
Tabelle 9: Erntetermine im Feld- und Gefäßversuch	23
Tabelle 10: Probenzeitpunkte und Probentiefen im Feldversuch.....	29
Tabelle 11: Probezeitpunkte im Gefäßversuch.....	29
Tabelle 12: Kornertrag der Hauptfrüchte im Gefäßversuch (Gefäßversuchsstation, 2002)	39
Tabelle 13: Strohertrag der Hauptfrüchte im Gefäßversuch (Gefäßversuchsstation, 2002)	39
Tabelle 14: Phosphatkonzentration im Korn der Hauptfrüchte des Gefäßversuchs (Gefäßversuchsstation, 2002)	41
Tabelle 15: Phosphatkonzentration im Stroh der Hauptfrüchte im Gefäßversuch (Gefäßversuchsstation, 2002)	42
Tabelle 16: Stickstoffkonzentration im Stroh der Hauptfrüchte im Gefäßversuch (Gefäßversuchsstation, 2002)	42
Tabelle 17: C/N-Verhältnis im Stroh der Hauptfrüchte im Gefäßversuch (Gefäßversuchsstation, 2002)	43
Tabelle 18: Phosphatentzug durch Export der Körner der Hauptfrüchte im Gefäßversuch (Gefäßversuchsstation, 2002)	44
Tabelle 19: Phosphatentzug durch das Stroh der Hauptfrüchte im Gefäßversuch (Gefäßversuchstation, 2002).....	44
Tabelle 20: Phosphataufnahme (Korn + Stroh) durch die Hauptfrüchte im Gefäßversuch (Gefäßversuchsstation, 2002)	45
Tabelle 21: Phosphatzufuhr in das System durch Strohdüngung (40 g TM/Gefäß) im Gefäßversuch (Gefäßversuchsstation, 2002)	46

Tabelle 22: Sprosserträge der Zwischenfrüchte in Abhängigkeit von Vorfrucht und P-Form (Gefäßversuchsstation, Frühjahr 2003).....	47
Tabelle 23: P-Konzentration im Spross der Zwischenfrüchte in Abhängigkeit von P-Form und Vorfrucht (Gefäßversuchsstation, Frühjahr 2003).....	49
Tabelle 24: N-Konzentration der Zwischenfrüchte in Abhängigkeit von der Vorfrucht und der applizierten P-Form (Gefäßversuchsstation, Frühjahr 2003)	50
Tabelle 25: P-Entzüge der Zwischenfrüchte Spinat und Raps in Abhängigkeit von der Vorfrucht (Gefäßversuchsstation, Frühjahr 2003).....	51
Tabelle 26: N-Entzug der Zwischenfrucht in Abhängigkeit von P-Form und Vorfrucht (Gefäßversuchsstation, Frühjahr 2003).....	52
Tabelle 27: CAL-extrahierbares Phosphat im Boden des Gefäßversuchs vor und nach dem Anbau der Hauptfrüchte (Gefäßversuchsstation, 2002).....	56
Tabelle 28: CAL-extrahierbares Phosphat in Abhängigkeit von Vorfrucht, P-Form und Zwischenfrucht (Gefäßversuchsstation, November 2002)	57
Tabelle 29: DL-extrahierbares Phosphat im Boden des Gefäßversuchs vor und nach dem Anbau der Hauptfrüchte (Gefäßversuchsstation, 2002).....	58
Tabelle 30: DL-extrahierbares Phosphat in Abhängigkeit von Vorfrucht, P-Form und Nachfrucht (Gefäßversuchsstation, November 2002)	59
Tabelle 31: Durch EUF extrahierbares Phosphat im Boden des Gefäßversuchs vor und nach dem Anbau der Hauptfrüchte (Gefäßversuchsstation, 2002).....	60
Tabelle 32: Gesamt-N im Boden des Gefäßversuchs abhängig von der Vorfrucht in den einzelnen Zwischenfruchtvarianten (Gefäßversuchsstation, November 2002)	61
Tabelle 33: Kornertrag im Feldversuch (Glabbacher Hof, 2002)	62
Tabelle 34: Strohertrag im Feldversuch (Glabbacher Hof, 2002).....	62
Tabelle 35: P-Konzentrationen im Korn der Hauptfrüchte im Feldversuch (Glabbacher Hof, 2002).....	62
Tabelle 36: P-Konzentration im Stroh der Hauptfrüchte im Feldversuch (Glabbacher Hof, 2002).....	63
Tabelle 37: N-Konzentration im Stroh der Hauptfrüchte im Feldversuch (Glabbacher Hof, 2002).....	63
Tabelle 38: P-Entzüge durch das Korn der Hauptfrüchte im Feldversuch (Glabbacher Hof, 2002).....	64
Tabelle 39: P-Rückfuhr in das System durch Strohdüngung im Feldversuch (Glabbacher Hof, 2002)	64
Tabelle 40: P-Aufnahme der Hauptfrüchte im Feldversuch (Glabbacher Hof, 2002) ...	64

Tabelle 41: Erträge der Zwischenfrüchte in Abhängigkeit von der Vorfrucht im Feldversuch (Gladbacher Hof, Frühjahr 2003).....	65
Tabelle 42: P-Konzentration der Zwischenfrüchte in Abhängigkeit von der Vorfrucht im Feldversuch (Gladbacher Hof, 2003).....	65
Tabelle 43: Düngungseffekt des Rohphosphats und Effekte der Hauptfrüchte nach CAL-Analyse im Feldversuch (Gladbacher Hof, 2002).....	69
Tabelle 44: Düngungseffekt des Rohphosphats und Effekte der Hauptfrüchte nach DL-Analyse im Feldversuch (Gladbacher Hof, 2002)	69
Tabelle 45: EUF-extrahierbares Phosphat zu den drei verschiedenen Probezeitpunkten (Gladbacher Hof, 2002)	70
Tabelle 46: N _{min} im Boden des Feldversuchs nach der Ernte der Hauptfrüchte in verschiedenen Bodentiefen (Gladbacher Hof, Herbst 2002)	71
Tabelle 47: pH-Wert im A _p -Horizont des Feldversuchs in Abhängigkeit von der Hauptfrucht (Gladbacher Hof, November 2002)	72
Tabelle 48: Bilanz der Entzüge und der durch CAL ermittelten P-Aufnahme der Hauptfrüchte	86
Tabelle 49: Bilanz der Entzüge und der durch DL ermittelten P-Aufnahme der Hauptfrüchte	87
Tabelle 50: Trockenmasse-Erträge des Raps-Sprosses im Gefäßversuch (Gefäßversuchsstation, Frühjahr 2003).....	97
Tabelle 51: Trockenmasse-Erträge des Spinat-Sprosses im Gefäßversuch (Gefäßversuchsstation, Frühjahr 2003).....	97
Tabelle 52: P-Zufuhr im Gefäßversuch auf 1 ha umgerechnet (Lagerungsdichte 1,4 g/cm ³ → 280 dt Stroh/ha).....	97

II. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau des Feldversuchs	14
Abbildung 2: Zeitlicher Ablauf des Versuches	16
Abbildung 3: Aufbau des Gefäßversuchs.....	18
Abbildung 4: Schema einer Parzelle mit Abmessungen und die beerntete Kernparzelle.....	24
Abbildung 5: Schematische Darstellung des Elektrodenkammer-Mittelzellen-Blocks eines EUF-Gerätes (VDLUFA: Methodenbuch Band 1, Methoden zur Bodenuntersuchung)	36
Abbildung 6: Sommerweizen im Entwicklungsstadium EC 77 (späte Milchreife) in Abhängigkeit von der P-Form (Gefäßversuchsstation, Sommer 2002).....	40
Abbildung 7: Wachstum der Weißlupine im Entwicklungsstadium EC 79 (Grünreife) in Abhängigkeit von der P-Form (Gefäßversuchsstation, Sommer 2002).....	40
Abbildung 8: Wachstum der Ackerbohne im Entwicklungsstadium EC 69 (Ende der Blüte) in Abhängigkeit von der P-Form (Gefäßversuchsstation, Sommer 2002)..	41
Abbildung 9: Spinatwachstum in der Rohphosphatvariante in Abhängigkeit von der Vorfrucht (Gefäßversuchsstation, Frühjahr 2003).....	48
Abbildung 10: Spinatwachstum in der CaHPO ₄ -Variante in Abhängigkeit von der Vorfrucht (Gefäßversuchsstation, Frühjahr 2003).....	48
Abbildung 11: Rapswachstum in der Rohphosphat-Variante in Abhängigkeit von der Vorfrucht (Gefäßversuchsstation, Frühjahr 2003).....	48
Abbildung 12: Rapswachstum in der CaHPO ₄ -Variante in Abhängigkeit von der Vorfrucht (Gefäßversuchsstation, Frühjahr 2003).....	49
Abbildung 13: Schematische Darstellung der drei wichtigsten Phosphatfraktionen im Boden für die Pflanzenernährung (aus: Mengel & Kirkby, 2001)	82
Abbildung 14: Typische Welke an Fiederblättern der Weißlupine bei Anthraknose- Befall.....	84

1 Einleitung

Phosphor ist ein Pflanzennährstoff, dessen Mangel erhebliche Auswirkungen auf das Wachstum der Pflanzen hat. Ein Beispiel für die Bedeutsamkeit des Phosphats ist das ATP, welches P in Form von Pyrophosphat inkorporiert und als Träger chemischer Energie fungiert. Damit wird Phosphat im Stoffwechsel der Pflanze bei vielen Energie verbrauchenden Prozessen benötigt. Weiterhin wird Phosphat bei Getreide und Leguminosen im Korn als Phytin und in Proteinen gespeichert, wodurch es zu Phosphatexport aus dem System kommt. Daher spielt die Phosphatversorgung der Pflanzen zur Ertragssicherung eine wichtige Rolle in der Pflanzenproduktion. Dazu stehen dem Landwirt eine Reihe von Phosphatdüngern unterschiedlicher Löslichkeit zur Verfügung, deren Effizienz erheblich von Bodenart und Boden-pH abhängig ist.

Phosphataufnahme

Die Pflanze nimmt Phosphat aus der Bodenlösung in Form von H_2PO_4^- oder HPO_4^{2-} auf und erzeugt dadurch in der Bodenlösung ein Konzentrationsgefälle zur Wurzel, welches zur Anlieferung von gelöstem Phosphat durch Diffusion zur Wurzel führt. Dadurch kommt es in der Bodenlösung zu einer Absenkung der Konzentration des gelösten Phosphats, was zu einem Ionenaustausch mit dem austauschbar gebundenen Phosphat und der Bodenlösung führt und damit Phosphat in die Bodenlösung abgegeben wird (Hamon, 1995; McLaughlin et al., 1998). Es bestehen zwischen den verschiedenen Pflanzenarten Unterschiede bezüglich der P-Aneignungseffizienz, denn die Fähigkeit, mehr oder weniger stark an Bodenbestandteile adsorbiertes Phosphat zu entziehen, spielt dabei eine große Rolle. Pflanzen, die ein höheres Konzentrationsgefälle bezüglich Phosphat zwischen der Bodenlösung und der festen Phase des Bodens erzeugen können, sind auch bei geringen Phosphatkonzentrationen in der Bodenlösung in der Lage, ausreichend Phosphat aufzunehmen (Parfitt, 1979; Hinsinger and Gilkes, 1996). Der Unterschied zwischen den Arten bezüglich dieser Fähigkeit ist in erster Linie auf Unterschiede im Wurzelsystem, bzw. auf die unterschiedlichen Reaktionen

auf Phosphatmangel zurückzuführen, welche sich in zwei Gruppen einteilen lassen:

- Morphologische Unterschiede
- Physiologische Unterschiede

Die Wurzelmorphologie spielt insofern eine Rolle, da ein Wurzelsystem mit langen Wurzelhaaren einen höheren Anteil an Rhizosphärenboden zur Verfügung stehen hat und damit eine größere Wurzeloberfläche besitzt als ein Wurzelsystem, das weniger oder weniger lange Wurzelhaare besitzt. Winterraps besitzt eine höhere Phosphataufnahmefähigkeit als Mais trotz einer geringeren Wurzeltrockenmasse (Hendricks et al., 1981; Jungk, 1996). Die Konzentration des Phosphats in der Bodenlösung in der Rhizosphäre des Winterrapses (*Brassica napus* L.) ist durch eine intensivere Interzeption mit längeren Wurzelhaaren stärker abgesunken und erreicht damit ein höheres Konzentrationsgefälle. Dies führt zu einer verstärkten Desorption des in der Rhizosphäre austauschbar gebundenen Phosphats (Morel and Hinsinger, 1999). Einen weiteren Vorteil haben Pflanzen, die als Wirte für Mykorrhiza fungieren. Deren Hyphen bewirken eine enorme Vergrößerung der Kontaktfläche der Wurzel mit dem Boden, was die Phosphataufnahme der Wirtspflanze verbessert (Hayman, 1980). Zusätzlich können Hyphen Phosphat räumlich effizienter erschließen, da ihr Durchmesser 2-4 μm beträgt (Schlechte, 1976), während Wurzelhaare einen fünfmal höheren Durchmesser haben. Nach Cress et al. (1979) haben Hyphen eine höhere Phosphataufnahmerate als Pflanzenwurzeln.

Physiologische Unterschiede bezüglich der P-Aneignung beruhen zum einen auf den unterschiedlichen Aneignungsmechanismen der verschiedenen Arten und zum Zweiten auf der Reaktion der verschiedenen Arten auf einen Phosphatmangel. Pflanzenwurzeln geben Protonen oder OH⁻- Ionen ab, wodurch der pH-Wert der Rhizosphäre durch die Pflanzenwurzel verändert wird. Der pH-Wert des übrigen Bodens bleibt dabei aber unbeeinflusst (Smiley, 1974; Römheld, 1986, Hinsinger, 1998; Jaillard et al., 2001). Hierbei spielt die N-

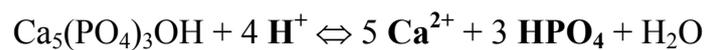
Ernährung bzw. die Form der N-Applikation eine wichtige Rolle, denn Pflanzen können N in Form von NH_4^+ und NO_3^- aufnehmen, was sich unterschiedlich auf den pH-Wert in der Rhizosphäre auswirkt. Es wurde gezeigt, dass mit NH_4^+ gedüngtes Weidelgras (*Lolium perenne* L.) die Rhizosphäre stärker ansäuert als das, welches mit NO_3^- gedüngt wurde (Gahoonia et al., 1992), so dass der pH-Wert der Rhizosphäre gesenkt und die Löslichkeit von Ca-Phosphaten erhöht wird. Es sollte angemerkt werden, dass die Messung des pH-Wertes nicht zwangsläufig ein Maß für die Protonenabgabe ist, denn ein gut abgepufferter Boden wird auf die erhöhte Protonenabgabe im pH-Wert keine Reaktion zeigen (Hinsinger, 1998). Böden mit einem Gehalt von 2-6% CaCO_3 haben eine hohe Pufferkapazität und zeigen geringe bis keine Reaktionen bezüglich des pH-Wertes gegenüber schwach gepufferten Böden, bei welchen ein Absinken des pH-Wertes um 0,73 - 1,49 beobachtet werden konnte (Schubert et al., 1990). Eine hohe Effizienz bezüglich der Phosphataneignung zeigen auch Leguminosen, die aufgrund ihrer symbiotischen N_2 -Fixierung von Luftstickstoff eine höhere Protonenabgabe in die Rhizosphäre aufweisen (Römheld, 1986; Tang et al., 1997).

Eine weitere Strategie von Pflanzen, Phosphat im Boden effizient zu nutzen, ist die Exsudation von organischen Säuren, wie es bei der Weißlupine (*Lupinus albus* L.) der Fall ist (Yan et al., 2002). Die Weißlupine bildet Proteoidwurzeln aus, die durch ihre Morphologie in der Lage sind, ein begrenztes Bodenvolumen stark zu durchwurzeln, womit der Anteil der Rhizosphäre und damit die Wurzeloberfläche im Gesamtwurzelraum sehr hoch ist. Zusätzlich exsudiert die Weißlupine Zitronensäure und Äpfelsäure, wobei die Mengen beider Exsudate im Zeitverlauf gegeneinander variieren (Neuman und Römheld, 1999). Die Ausbildung dieser Proteoidwurzeln und die Exsudation der organischen Säuren ist von der Phosphatkonzentration in der Pflanze abhängig und nicht von der Phosphatmenge im Boden (Marschner et al., 1987). Durch die oben angeführten Eigenschaften der Weißlupine ist diese in der Lage, schwerlösliches Phosphat zu lösen. Es konnte gezeigt werden, dass durch die Mischkultur von Weißlupine und

Weizen appliziertes schwerlösliches Rohphosphat durch die Weißblupine gelöst werden konnte. Die Konzentration des extrahierbaren Phosphats in der Rhizosphäre war um den Faktor drei höher als im übrigen Boden, wovon der Weizen profitieren konnte, was sich anhand der erhöhten Phosphataufnahme zeigen ließ (Horst und Waschkiel, 1987).

Ziel der Arbeit

Weicherdiges Rohphosphat ist ein schwer löslicher Phosphatdünger, der eine niedrige P-Freisetzungsrage in Böden mit einem pH-Wert über 6 aufweist. Dies ist auf das apatitisch gebundene Phosphat in diesem Dünger zurückzuführen. Die folgende Gleichung beschreibt annähernd die P-Freisetzung aus einem Apatit (Steffens, 1992):



Gleichung 1: P-Freisetzung aus einem Apatit (Steffens, 1992)

Diese Gleichung besagt, dass insbesondere Protonen die Lösung von P aus einem Apatit fördern, Ca^{2+} - sowie HPO_4^{2-} -Ionen hingegen die Löslichkeit des Apatits reduzieren. Da Böden zur Stabilisierung der Bodenfruchtbarkeit und der Bodenstruktur gekalkt werden, liegt der pH-Wert mineralischer Böden meist über 6. Dadurch kann Rohphosphat nur sehr ineffizient durch die Pflanze genutzt werden, da nur wenig Phosphat pflanzenverfügbar vorliegt, und die Lösungsprozesse aufgrund des Überschusses an Calcium-Ionen im Boden nur sehr langsam ablaufen. Im ökologischen Landbau ist Rohphosphat als P-Dünger zugelassen, was mittelfristig zu Problemen in der P-Versorgung der Kulturpflanzen führt. Es stellt sich die Frage, wie dieser Problematik begegnet werden soll, da die Verwendung leichtlöslicher Phosphatdünger, wie das neue Thomasphosphat (CaHPO_4), im ökologischen Landbau nicht erlaubt ist. Eine effiziente Ausnutzung des schwerlöslichen Apatits soll daher durch die Eingliederung P-mobilisierender Feldfrüchte in die Fruchtfolge erreicht werden. Dies könnte mit der P-effizienten Weißblupine (*Lupinus albus L.*) erreicht werden,

da diese aufgrund ihrer Proteoidwurzeln in der Lage ist, apatitisch gebundenes Phosphat zu mobilisieren. Auch die Ackerbohne (*Vicia faba* L.) ist für diese Fragestellung von besonderem Interesse, da sie aufgrund der symbiotischen N-Ernährung durch Fixierung von N_2 aus der Luft die Rhizosphäre ansäuert und damit analog zu Gleichung 1 apatitisch gebundenes Phosphat mobilisieren kann. Die zentralen Versuchsfragen des Projektes können wie folgt zusammengefasst werden:

- Ist es durch den Anbau der Weißlupine (*Lupinus albus* L.) und der Ackerbohne (*Vicia faba* L.) möglich, Phosphat aus gedüngtem weicherdigem Rohphosphat pflanzenverfügbar zu machen?
- Können nachgebaute P-ineffiziente Pflanzen, wie Spinat (*Spinacia oleracea* L) dieses Phosphat für sich nutzen und mehr Phosphat aufnehmen als nach Sommerweizen (*Triticum aestivum* L.)?
- Wie ist die Mobilisierungsleistung der P-mobilisierenden Vorfrüchte im Vergleich zu leichtlöslichen Phosphatdüngern zu beurteilen?

Um diese Fragen zu beantworten, werden parallel ein Gefäßversuch und ein Feldversuch angelegt, wobei der Vergleich von leichtlöslichem Thomasphosphat mit Rohphosphat aus oben genannten Gründen nur im Gefäßversuch vorgenommen werden kann.

2 Material und Methoden

2.1 Feldversuch

2.1.1 Versuchsstandort

Der Standort des Feldversuches ist der Gladbacher Hof in Aumenau bei Villmar im Kreis Limburg-Weilburg. Der Betrieb liegt in einem nordwestlichen Ausläufer des Taunus in einer Höhe von 130 bis 300 m über NN. Die jährliche Jahresniederschlagsmenge beträgt 670 mm, die durchschnittliche Jahrestemperatur 9,0°C. Der Gladbacher Hof ist ein Versuchsbetrieb der Professur für Organischen Landbau der Justus-Liebig-Universität Giessen und gleichzeitig ein Bioland-Betrieb. Daher wirtschaftet dieser Betrieb nach Bioland-Richtlinien, was auf den Versuch Auswirkungen bezüglich der Düngungsvarianten hat. Bezüglich Pflanzenschutz und Düngung sind natürlich andere Voraussetzungen gegeben als im Gefäßversuch.

Der Schlag, auf dem der Versuch angelegt wird, hat eine Höhenlage von 190 m über NN und kann als Parabraunerde charakterisiert werden. Die Bodenart ist schluffiger Lehm (IU) und die Ackerzahl 74. In Tabelle 1 sind die Standortcharakteristika noch einmal zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 1: Klimadaten und Charakterisierung des Versuchsstandortes

Schlag	Am Pfaffengraben IV
Höhe über NN	190 m
Bodenart	uL (schluffiger Lehm)
Bodentyp	Parabraunerde
pH 0,01 M CaCl ₂ (nach LUFA, 2000)	6,7
CAL-P-Versorgung (nach LUFA, 2000)	34,9 mg P/kg Boden
CAL-K-Versorgung (nach LUFA, 2000)	99,6 mg K/kg Boden
Ackerzahl	74
Jahresdurchschnittstemperatur (2002)	9,6
Jahresdurchschnittstemperatur (langjährig)	9,3
Jahresdurchschnittsniederschlag (2002)	684,9 mm
Jahresdurchschnittsniederschlag (langjährig)	682,0 mm

2.1.2 Versuchsaufbau

Im ersten Versuchsjahr sollen drei Hauptfrüchte angebaut werden, die hinsichtlich ihrer Phosphatmobilisierungs-Eigenschaften überprüft werden sollen. Vor dem Anbau der Hauptfrüchte wird weicherdiges Rohphosphat entsprechend einer Düngungsempfehlung der LUFA Kassel per Hand parzellenweise appliziert. Tabelle 2 zeigt die applizierten Nährstoffe im Feldversuch.

Tabelle 2: Düngungsmaßnahmen im Feldversuch

Dünger	Zusammensetzung	Applizierte Menge	Applikationsart
GAFSA-Phosphat	11,8% P	110 kg P/ha	Handapplikation
Kalimagnesia	17,6% K + 10,8% Mg + 17% S	355 kg K/ha	Handapplikation

Weißblupine, Ackerbohne und Sommerweizen werden als Hauptfrüchte angebaut, Spinat und Winterraps als Winterzwischenfrüchte und Mais als Hauptfrucht, der

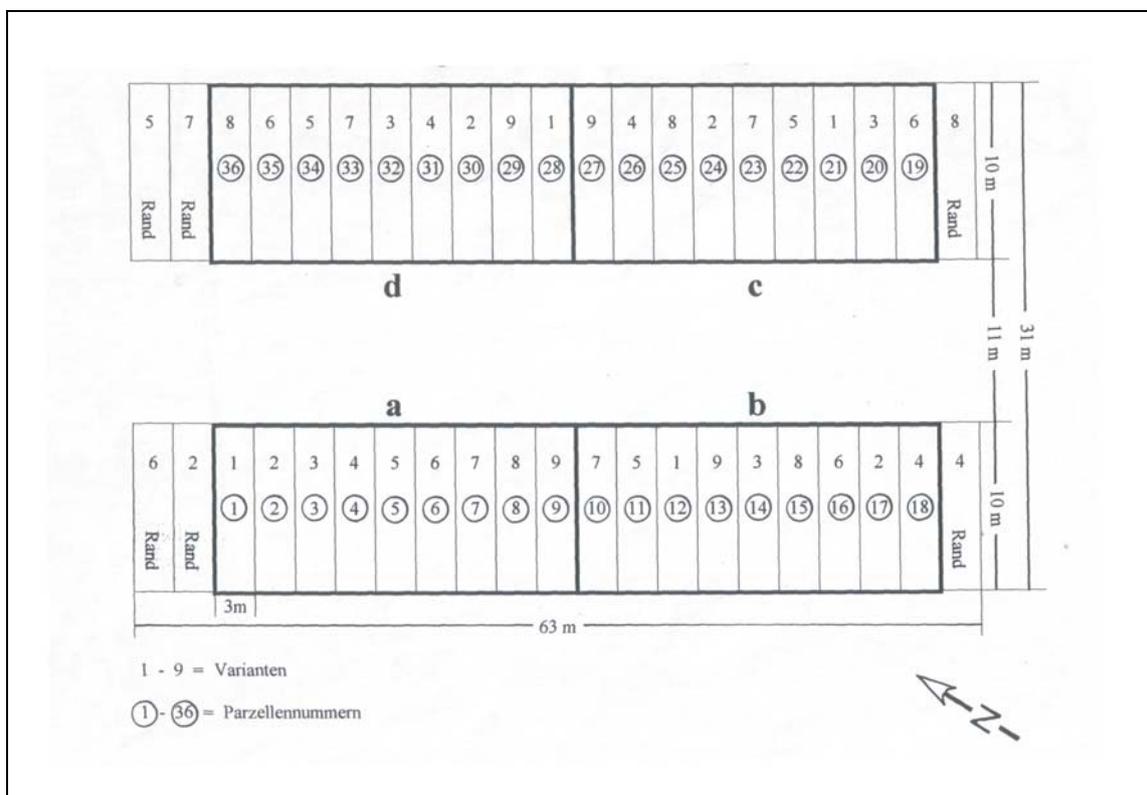


Abbildung 1: Aufbau des Feldversuchs

als Zeigerpflanze für die Vorfruchteffekte der ersten Hauptfrüchte dient. Der Versuch wird als zweijähriger Fruchtfolgeversuch auf dem oben beschriebenen

Standort angelegt. Die Versuchsanlage ist eine vollrandomisierte Blockanlage, bei der die erste Wiederholung (a) in der Reihenfolge der Varianten angelegt ist. Abbildung 1 zeigt den Versuchsplan des Feldversuchs. Die Anzahl der Varianten ergibt sich aus den 3 Hauptfrüchten, den 2 nachgebauten Winterzwischenfrüchten und der Schwarzbrache. Tabelle 3 zeigt eine Aufschlüsselung der Variantennummern.

Tabelle 3: Übersicht der einzelnen Fruchtfolgevarianten

Variante	Fruchtfolge
1	Weißlupine + Winterraps
2	Weißlupine + Spinat
3	Weißlupine + Schwarzbrache
4	Ackerbohne + Winterraps
5	Ackerbohne + Spinat
6	Ackerbohne + Schwarzbrache
7	Sommerweizen + Winterraps
8	Sommerweizen + Spinat
9	Sommerweizen + Schwarzbrache

2.1.3 Versuchsdurchführung

Vor der Aussaat der Hauptfrüchte und vor der Düngung des Versuchsfeldes werden Bodenproben aus der Ackerkrume (0 – 30 cm) entnommen, ebenfalls nach der Düngung mit Rohphosphat und Kalimagnesia. Diese Beprobungen dienen der Ermittlung des Düngungszustandes des Versuchsstandortes und des Düngungseffektes des applizierten Rohphosphates.

Es werden die drei Hauptfrüchte im Frühjahr 2002 ausgesät, bis zur Totreife im Sommer kultiviert und dann geerntet. Das Korn wird vom Feld abgefahren, das Stroh wird nach der Erfassung des Gewichtes je Parzelle zurückgeführt und gemulcht. Die Körner sowie die entnommenen Strohproben werden im Labor analysiert. Vor der Einarbeitung der Ernterückstände werden Bodenproben bis 90 cm Tiefe gezogen, um die Effekte der Hauptfrüchte zu erfassen. Die Beprobung der tieferen Bodenschichten erfolgt zur Erfassung eventueller Effekte der Hauptfrüchte in der Tiefe.

Nach Mulchen und Einarbeiten des Strohs werden die Parzellen im Spätsommer gepflügt und die Zwischenfrüchte Spinat und Raps ausgesät, welche im Vergleich zu einer Brachevariante als Winterzwischenfrucht dienen. Im Herbst 2002 werden auf den Bracheparzellen weitere Bodenproben gezogen, um den Boden- und Düngungszustand des Versuchs vor Wintereinbruch zu dokumentieren.

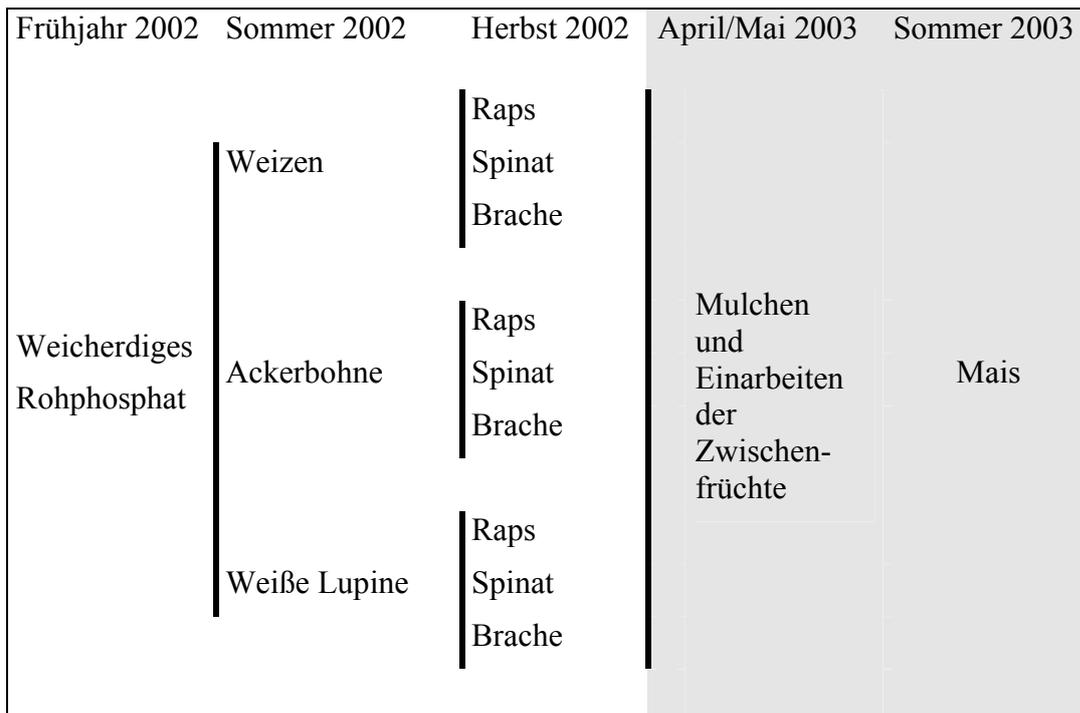


Abbildung 2: Zeitlicher Ablauf des Versuchs

Im Frühjahr 2003 werden die Zwischenfrüchte gemulcht und in den Boden eingearbeitet. Eine weitere Beprobung des Bodens erfolgt im Frühjahr 2003 vor Aussaat des Mais in der Ackerkrume (0 – 30 cm), um den Düngungszustand nach dem Winter zu dokumentieren.

Im Juni 2003 wird eine Zwischenernte im Mais vorgenommen, die für jedes Versuchsglied den Ernährungszustand des Mais dokumentieren soll. Die Zwischenernte wird derart durchgeführt, dass pro Parzelle aus den mittleren zwei Reihen auf zwei Meter Pflanzen entnommen werden. In Abbildung 2 ist der zeitliche Ablauf des Versuchs aufgeführt. Der grau unterlegte Bereich der Abbildung bezeichnet den Teil des Versuchs, der für die vorliegende Arbeit nicht mehr relevant sein wird.

2.1.4 Verwendete Sorten und ackerbauliche Maßnahmen

Es werden folgende in Tabelle 4 aufgeführte Sorten der Hauptfrüchte und Zwischenfrüchte ausgesät. Das Saatgut der Leguminosen wird vor der Aussaat mit *Rhizobium* inokuliert.

Tabelle 4: Sorten und Saatstärken der verwendeten Kulturen im Feldversuch

Kultur	Sorte	Saatstärke	TKG [g]	Saattermin	Ernte	Vegetationszeit [Tage]
Weißblupine	Amiga	65 Körner/m ²	41,4	31.03.2002	26.08.2002	148
Ackerbohne	Condor	40 Körner/m ²	478	31.03.2002	20.08.2002	142
Sommerweizen	Triso	470 Körner/m ²	467	30.03.2002	14.08.2002	137
Winterraps	Akela	12 kg/ha	k.A.	06.09.2002	ausgewintert	-
Spinat	Falcon	70 kg/ha	k.A.	06.09.2002	ausgewintert	-
Mais	Agadir		k.A.	01.05.2003	22.08.2003	-

Die Bodenbearbeitung im Feldversuch erfolgt betriebsüblich, zur jeweiligen Saat der Kulturen erfolgt eine Pflugfurche. Zur Unkrautbekämpfung werden die Leguminosen vor Auflauf blind gestriegelt und nach Auflauf maschinell gehackt, der Weizen wird gestriegelt. Im Sommer wird zweimal Unkraut von Hand gezogen, wobei dieses auf dem Feld belassen wird. Die Ernte erfolgt zur Reife der Hauptfrüchte, die aufgrund der unterschiedlichen Kulturen nicht gleichzeitig für alle Hauptfrüchte stattfindet (siehe auch: 2.3.1.1 Erfassung der Erntedaten, S. 23). In Tabelle 4 sind die Erntetermine und die Vegetationsdauer für jede Hauptfrucht aufgeführt.

2.2 Gefäßversuch

2.2.1 Versuchsaufbau

Der Gefäßversuch wird auf der Gefäßversuchsstation Launsbacher Weg 31 des Instituts für Pflanzenernährung der Justus-Liebig-Universität Giessen durchgeführt. Zur Anlage des Gefäßversuchs werden ca. 800 kg Boden aus dem A_p-Horizont des Feldversuchstandortes entnommen und auf der Gefäßversuchsstation für den Gefäßversuch aufbereitet. Der Boden wird getrocknet und auf 4 mm zerkleinert. Dann wird der Boden in tarierte kleine

Mitscherlich-Gefäße, die je 6 kg fassen, gefüllt. Je Gefäß wird den Varianten entsprechend Dünger in den Boden eingemischt und die Aussaat der Hauptfrüchte vorgenommen.

Abbildung 3 zeigt den Aufbau des Gefäßversuchs vor dem Randomisieren. Die Gefäße werden auf zwei Wagen voll randomisiert aufgestellt, und während des gesamten Versuchszeitraums mehrfach auf dem Wagen umgestellt, damit die Bedingungen für alle Gefäße gleich sind, Randgefäße sind daher nicht erforderlich.

Der Versuch umfasst 72 Gefäße (2 Düngungsvarianten x 3 Hauptfrüchte x 3 Überwinterungsvarianten (2 Zwischenfrüchte + Brache) x 4 Wiederholungen).

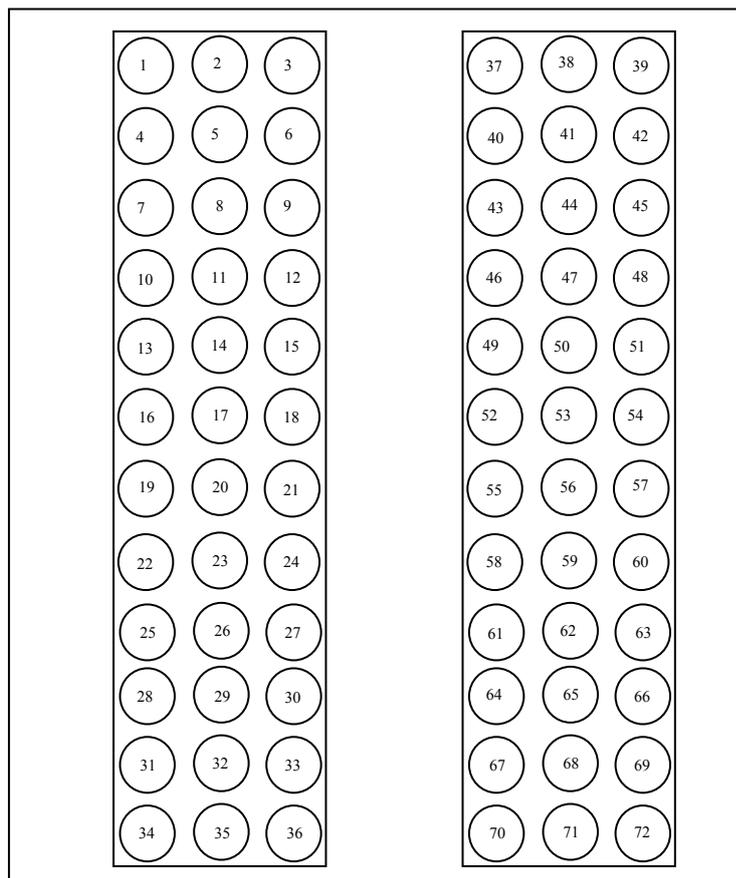


Abbildung 3: Aufbau des Gefäßversuchs

Die Tabelle 5 zeigt die Varianten und die zugehörige Gefäßnummer.

Tabelle 5: Gefäßbelegung

Variante	Gefäßnummer
Rohphosphat+ Sommerweizen + Spinat	1 - 4
Rohphosphat + Sommerweizen + Winterraps	5 – 8
Rohphosphat + Sommerweizen + Brache	9 – 12
CaHPO ₄ + Sommerweizen + Spinat	13 – 16
CaHPO ₄ + Sommerweizen + Winterraps	17 – 20
CaHPO ₄ + Sommerweizen + Brache	21 – 24
Rohphosphat + Weißlupine + Spinat	25 – 28
Rohphosphat + Weißlupine + Winterraps	29 – 32
Rohphosphat + Weißlupine + Brache	33 – 36
Rohphosphat + Ackerbohne + Spinat	37 – 40
Rohphosphat + Ackerbohne + Winterraps	41 – 44
Rohphosphat + Ackerbohne + Brache	45 – 48
CaHPO ₄ + Weißlupine + Spinat	49 – 52
CaHPO ₄ + Weißlupine + Winterraps	53 – 56
CaHPO ₄ + Weißlupine + Brache	57 – 60
CaHPO ₄ + Ackerbohne + Spinat	61 – 64
CaHPO ₄ + Ackerbohne + Winterraps	65 – 68
CaHPO ₄ + Ackerbohne + Brache	69 - 72

2.2.2 Versuchsdurchführung

Der Ablauf des Gefäßversuchs ist identisch zum Ablauf des Feldversuchs. In Tabelle 6 sind die applizierten Düngermengen aufgeführt. Der Dünger wird vor Anlage des Versuchs je Gefäß in den Boden eingemischt.

Tabelle 6: Applizierte Düngermengen im Gefäßversuch

Varianten	Düngerform	Applizierte Menge	Zeitpunkt
Nur Sommerweizen	NH ₄ NO ₃	0,17 g N/kg Boden	Vor Aussaat
Rohphosphat-Variante	GAFSA 27	0,3 g P/kg Boden	Vor Aussaat
CaHPO ₄ -Variante	CaHPO ₄ (19,2% P)	0,3 g P/kg Boden	Vor Aussaat
CaHPO ₄ -Variante	Konverterkalk (37,4% Ca)	0,14 g Ca/kg Boden	Vor Aussaat
Sommerweizen	NH ₄ NO ₃	0,5 g N/Gefäß	Bestockungsbeginn
Sommerweizen	NH ₄ NO ₃	0,3 g N/Gefäß	Schossbeginn
Zwischenfrüchte (nach Weizen)	NH ₄ NO ₃	2,0 g N/ Gefäß	Vor Aussaat
Zwischenfrüchte (nach Leguminosen)	NH ₄ NO ₃	1,6 g N/Gefäß	Vor Aussaat
Alle Zwischenfrüchte	NH ₄ NO ₃	0,175 g N/ Gefäß	28 Tage nach Saat

Der Weizen wird zusätzlich während des Bestockens mit 0,5 g N/Gefäß und zum Schossen mit 0,3 g N/Gefäß mit NH₄NO₃ gedüngt (Tabelle 6).

Die Aussaat der Haupt- und Zwischenfrüchte ist in Tabelle 7 aufgeführt. Es werden die gleichen Sorten wie im Feldversuch verwendet, die Saatstärken werden für Gefäßversuche üblich gewählt und später auf eine optimale Pflanzdichte vereinzelt.

Tabelle 7: Aussat- und Erntetermine der Haupt- und Zwischenfrüchte im Gefäßversuch

Kultur	Saatstärke	Nach Vereinzlung	Aussaat- termin	Ernte- termin	Vegetations- zeit[d]
Sommerweizen	30 Kö./Gefäß	18 Pflanzen	25.03.2002	31.07.2002	128
Weißblupine	15 Kö./Gefäß	4 Pflanzen	25.03.2002	12.08.2002	140
Ackerbohne	15 Kö./Gefäß	4 Pflanzen	25.03.2002	12.08.2002	140
Spinat	15 Kö./Gefäß	10 Pflanzen	17.09.2002	21.03.2003	185
Winterraps	15 Kö./Gefäß	10 Pflanzen	17.09.2002	21.03.2003	185

Die Ernten im Gefäßversuch werden per Hand durchgeführt. Vor der Ernte abfallende Blätter der Hauptfrüchte werden vor dem Abfallen von Hand eingesammelt und für jedes Gefäß bis zur endgültigen Ernte aufbewahrt, um diese bei den anschließenden Analysen mitzuerfassen. Die Ernte erfolgt wie auch

im Feldversuch zur Reife der Hauptfrüchte (siehe auch: 2.3.1.1 Erfassung der Erntedaten, S. 23). Während des Versuchs werden regelmäßig Unkräuter entfernt und im Gefäß belassen. Abweichend vom Feldversuch wird nicht die gesamte anfallende Biomasse nach Ernte der Hauptfrüchte in die Gefäße zurückgeführt, sondern nur eine für alle Gefäße gleichgroße Menge von 40 g. Diese Maßnahme ist von Nöten, da die anfallende Biomasse überproportional hoch ist im Verhältnis zur vorhandenen Bodenmenge. Um eine optimale Strohrotte zu erreichen, werden die unterschiedlichen C-N-Verhältnisse der Ernterückstände durch eine der Vorfrucht angepassten Stickstoffgabe auf 1:10 vereinheitlicht, die Ernterückstände fein (<1mm) zermahlen und in den Boden eingemischt (siehe Tabelle 8). Dann erfolgt die Aussaat der Zwischenfrüchte, die kurz nach der Keimung auf eine optimale Pflanzdichte vereinzelt werden. Zur Zwischenernte bei den Zwischenfrüchten wurde die Vereinzlung der Zwischenfrüchte von 10 auf 6 genutzt. Im Frühjahr 2003 werden die Zwischenfrüchte geerntet, getrocknet, analysiert und wieder in den Boden eingearbeitet. Dann erfolgt die Aussaat des Maises als zweite Hauptfrucht.

Anpassung des C/N-Verhältnisses

Das angestrebte C/N-Verhältnis sollte ca. 10:1 betragen. Um dies zu erreichen werden die C/N-Verhältnisse innerhalb einer Vorfruchtvariante gemittelt und auf das gewünschte C/N-Verhältnis umgerechnet. Der ermittelte Wert stellt die Menge des zu applizierenden Stickstoffs in Reinform pro g zurückgeführten Strohs dar. Die errechneten Düngermengen des Ammoniumnitrat (NH_4NO_3) beziehen sich auf die applizierte Strohmenge von 40 g und wird bei der Düngung der Nachfrüchte Raps und Spinat berücksichtigt.

Tabelle 8: Benötigte N-Menge zum Ausgleich des C/N-Verhältnisses der Vorfruchtreste (Gefäßversuchsstation, November 2002)

	Weizenstroh	Leguminosenstroh
Mittelwert C/N-Verhältnis	162,9	36,9
N-Zugabe [g NH_4NO_3 /Gefäß]	1,86	0,42

Tabelle 8 zeigt das C/N-Verhältnis des Strohfrüchte aus dem Gefäßversuch und die zu applizierende N-Menge, um auf das angestrebte C/N-Verhältnis von 10:1 zu kommen. Dabei zeigt die untere Zeile der Tabelle die errechnete Menge des zu applizierenden Stickstoffs in Form von NH_4NO_3 . Nach der Ernte von Spinat und Raps wurde der Boden erneut aus den Gefäßen geschüttet, getrocknet sowie mit den Wurzelresten in die Gefäße gefüllt. In der Brachevariante wurde der Boden ebenfalls aus den Gefäßen geschüttet, getrocknet und in die Gefäße gefüllt. Anschließend wurde die entsprechende Menge der zuvor geernteten und gemahlten Raps- bzw. Spinatbiomasse sowie die entsprechenden Nährsalze (K_2SO_4 , MgSO_4 , NH_4NO_3) in ausreichender Menge gründlich mit dem Boden vermischt. Vier Wochen nach dem Einarbeiten der Sprossbiomasse von Raps und Spinat erfolgte Anfang Mai 2003 die Aussaat von Mais (*Zea mays* cv. Agadir).

Zunächst wurden acht Samen pro Gefäß ausgesät, die nach dem Auflaufen auf vier Pflanzen pro Gefäß vereinzelt wurden. Damit die Stickstoffernährung kein limitierender Wachstumsfaktor für Mais ist, wurde der Mais nochmals mit 2 g N (NH_4NO_3) pro Gefäß, verteilt auf zwei Gaben, nachgedüngt. Die Ernte der Maispflanzen erfolgte am 25.06.2003.

2.3 Analysen

2.3.1 Pflanzen

2.3.1.1 Erfassung der Erntedaten

Tabelle 9 zeigt die Termine der durchgeführten Ernten und Zwischenernten im Feld- und im Gefäßversuch.

Tabelle 9: Erntetermine im Feld- und Gefäßversuch

Art der Ernte	Kultur	Datum	Versuchsart
Hauptfruchternte	Sommerweizen	31.07.2002	Gefäßversuch
Hauptfruchternte	Ackerbohnen	12.08.2002	Gefäßversuch
Hauptfruchternte	Weißlupine	12.08.2002	Gefäßversuch
Hauptfruchternte	Sommerweizen	14.08.2002	Feldversuch
Hauptfruchternte	Ackerbohnen	20.02.2002	Feldversuch
Hauptfruchternte	Weißlupine	26.08.2002	Feldversuch
Haupternte	Spinat	2003	Gefäßversuch
Haupternte	Winterraps	2003	Gefäßversuch
Haupternte	Mais	22.08.2003	Feldversuch

Bei der Ernte des Gefäßversuchs und des Feldversuchs werden die Körner und das Stroh getrennt erfasst, die Frischmasse und die Trockenmasse bestimmt und von jeder Parzelle bzw. jedem Gefäß Proben zur Analyse bereitgestellt. Die vor der Ernte abgefallenen und eingesammelten Blätter werden jedem Gefäß zugeordnet und der Strohmasse beigelegt. Im Feldversuch wird außerdem die Tausend-Korn-Masse (TKM) ermittelt. Das Pflanzenmaterial wird gemahlen und dann auf folgende Nährstoffe untersucht:

- Phosphatkonzentration
- Stickstoffkonzentration
- C-Konzentration → Bestimmung des C-N-Verhältnisses im Stroh

Die Ernte im Gefäßversuch wird mit der Hand durchgeführt, im Feldversuch erfolgt die Beerntung der einzelnen Parzellen mit einem Parzellenmähdrescher,

der eine Arbeitsbreite von 1,5 m besitzt. Dadurch kann die Parzelle derart geerntet werden, dass nur der Mittelteil der Parzelle, die Kernparzelle, zur Erfassung der Erntedaten herangezogen wird. Dadurch werden Randeffekte, die durch die direkte Nachbarschaft zu andern Varianten entstehen, ausgeschlossen. Die Ränder von ca. 0,75 m Breite links und rechts werden nach Beerntung der Kernparzelle abgeerntet. Vor der Ernte der Kernparzelle werden an allen Parzellen die Randbereiche an den kurzen Seiten der Parzellen durch Hineinfahren mit dem Mähdrescher geerntet (ca. 1,0 m). Die genaue Abmessung der Kernparzelle wird dann mit einem Maßband ermittelt und für jede Kernparzelle notiert, um in späteren Berechnungen den flächenbezogenen Ertrag ermitteln zu können (jeweils ca. 20 m²). Abbildung 4 zeigt am Beispiel einer Parzelle deren Abmessungen.

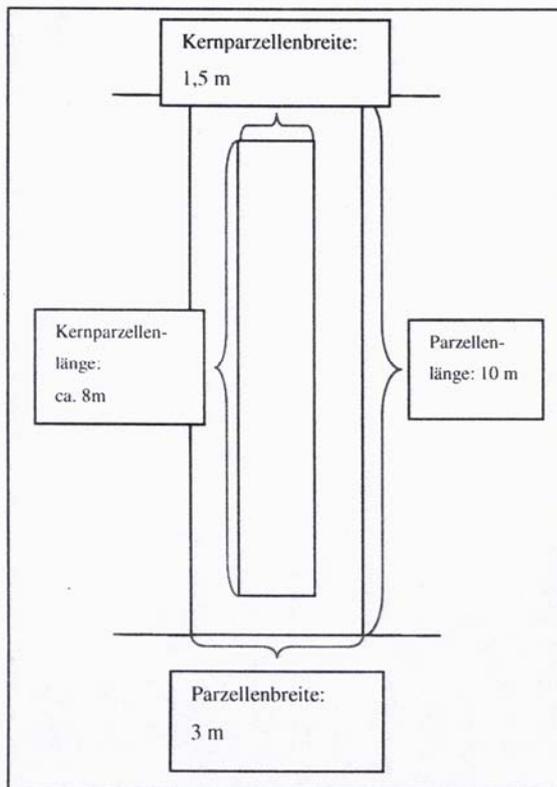


Abbildung 4: Schema einer Parzelle mit Abmessungen und die beerntete Kernparzelle

Das Stroh der Hauptfrüchte wird bei der Ernte aufgefangen und gewogen, um den Strohertrag zu erfassen. Es wird eine Probe von ca. 100 g für spätere Analysen entnommen und der Rest auf die entsprechende Parzelle zurückgeführt, wo es später gemulcht und in den Boden eingearbeitet wird.

2.3.1.2 Phosphat-Bestimmung

Prinzip

Die Bestimmung der Phosphatkonzentration im Spross und im Korn der Haupt- und Zwischenfrüchte wird nach trockener Veraschung mit der Vanadat-Gelb-Methode durchgeführt. Durch das Verglühen der Pflanzenproben wird P freigesetzt, das mit dem Ammoniumvanadat-Molybdat-Reagenz einen gelb gefärbten Komplex bildet, dessen Konzentration in einer Lösung kolorimetrisch bestimmt werden kann. Aus dem Ergebnis kann man dann auf die P-Konzentration im Pflanzenmaterial zurückrechnen.

Durchführung

Dazu werden 0,5 g Pflanzenmaterial über Nacht bei 550°C verascht, mit 2 ml destilliertem Wasser und 5 ml 5 M HNO₃ versetzt, erwärmt und dann über Weißbandfilter in 100 ml-Messkolben überspült und bis zur Eichmarke aufgefüllt. Davon werden 10 ml abgenommen, mit 7,5 ml Vanadat-Reagenz versetzt und auf 25 ml aufgefüllt. Diese Lösung wird nach 30 Minuten Reaktionszeit bei 450 nm in der 1 cm-Durchflussküvette am PM7-Photometer gemessen.

2.3.1.3 Stickstoff-Bestimmung

Prinzip

Die Bestimmung der N-Konzentration in Korn und Stroh wird nach Kjeldahl durchgeführt. Die organische Substanz wird dabei mit konzentrierter Schwefelsäure und mit CuO als Katalysator und Kaliumsulfat (Siedepunktserhöhung) aufgeschlossen. Die Lösung wird mehrere Stunden am Sieden gehalten; dabei wird die organische Substanz vollständig oxidiert und der dabei freiwerdende Stickstoff als NH₄⁺ in der schwefelsauren Lösung gebunden. Die Aufschlusslösung wird nach Verdünnung mit destilliertem Wasser mit einem Überschuss an NaOH alkalisiert und dann in einem geschlossenen System destilliert. Das bei der Alkalisierung entstehende Ammoniak (NH₃) wird abdestilliert und im Wasserdampf über einen Liebigkühler geführt, an welchem

es kondensiert und in eine Vorlage mit einem Überschuss an bekannter Menge Schwefelsäure geleitet wird. Nach Abschluss der Destillation wird die nicht verbrauchte Menge an Schwefelsäure in der Vorlage titriert. Die Differenz aus der Menge der Schwefelsäure vor und nach der Destillation ergibt die durch das Ammoniak neutralisierte Menge Schwefelsäure, durch die man auf die Ammoniakmenge und damit auf die Stickstoffkonzentration in der Probe schließen kann.

Durchführung

200 mg feingemahlene Pflanzenmaterial werden in eine Büchi-Aufschlussröhre eingewogen und mit 10 ml konzentrierter H_2SO_4 versetzt, eine Kjeldahl-Tablette (3,5 g, titanfrei) hinzu gegeben und eine Stunde im Heizblock aufgeschlossen. Die Probe wird anschließend in einem geschlossenen System mit 0,1 molarer Natronlauge versetzt und etwa 5 Minuten destilliert. Das gasförmige Ammoniak wird über einen Liebigkühler in eine mit Farbindikator versetzte saure Vorlage bekannter Molarität geführt und diese dann mit Natronlauge titriert. Die Destillation wird mit einer Büchi-Destillation Unit B-324 durchgeführt. Die Titration erfolgt mit 0,1 molarer Natronlauge, bis der Farbindikator umschlägt. Neben den Proben werden auch Standards analysiert, die zur Kontrolle der Analyse dienen. Um einen Wiederfindungsfaktor WF ermitteln zu können, wird eine Probe bekannter N-Konzentration analysiert. Der WF dient zum Ausgleich der N-Verluste, die im Laufe der Analyse auftreten können. Gleichung 2 zeigt die Berechnung des WF. Außerdem wird ein Blindwert ermittelt, der Einflüsse der gesamten Analyse erfasst und damit in der Auswertung der Daten berücksichtigt wird. Gleichung 3 zeigt, wie die Stoffmenge des Ammoniaks aus der Destillation der Probe ermittelt wird.

$$\text{Wiederfindungsfaktor} = \frac{\text{mgN} - \text{Eichprobe}_{\text{Ist-Wert}}}{\text{mgN} - \text{Eichprobe}_{\text{Soll-Wert}}}$$

Gleichung 2: Berechnung des Wiederfindungsfaktors WF als Verlust-Ausgleich

$$n(\text{NH}_3) = [n(\frac{1}{2} \text{H}_2\text{SO}_4 \text{Vorlage} - n(\text{NaOH}) \text{Rücktitration}] - n(\text{eq}) \text{Blindwert}$$

Gleichung 3: Berechnung der Stoffmenge des Ammoniaks aus der destillierten Probe

Zur Berechnung der N-Konzentration in den Proben muss die molare Masse des reinen Stickstoffes ($M=14,008 \text{ mg/mmol}$) und die Einwaage der jeweiligen Probe berücksichtigt werden.

2.3.1.4 C-Bestimmung

Prinzip

Der vollautomatische Analysenablauf basiert auf einer oxidativen Aufschlussmethode, wobei als Detektor eine Wärmeleitfähigkeitsmesszelle eingesetzt wird.

Der Aufschluss der Analysensubstanz beruht auf einer explosionsartigen Verbrennung in einer mit Sauerstoff hoch angereicherten Heliumatmosphäre in einem CuO-gefüllten Verbrennungsrohr aus Quarzglas bei 950 bis 1000°C. Bei der Verbrennung entstehen aus den Elementen C und N neben elementarem Stickstoff CO_2 , H_2O , NO , NO_2 sowie flüchtige Halogen- und Schwefelverbindungen. Die Stickoxide werden im nachgeschalteten Reduktionsrohr (Kupferkontakt) bei 500°C quantitativ zu elementarem Stickstoff reduziert und überschüssiger Sauerstoff gebunden. Als Träger- und Spülgas dient Helium. Nachfolgend wird der Gasstrom von flüchtigen Reaktionsprodukten befreit: Halogenverbindungen werden an Silberwolle chemisch gebunden, Schwefelverbindungen werden an einer Bleichromatschicht chemisch gebunden und H_2O durch eine mit Phosphoroxid gefüllte Absorptionssäule, die

Schwefelverbindungen werden an einer Bleichromatschicht chemisch gebunden und H_2O durch eine mit Phosphoroxid gefüllte Absorptionssäule, die nachgeschaltet ist. Der Gasstrom enthält nun nur noch Helium, CO_2 und N_2 und wird dem Messsystem zugeführt.

Die Wärmeleitfähigkeitsmesszelle WLD ist nicht spezifisch, d.h. die Reaktionsprodukte müssen nacheinander gemessen werden und somit getrennt werden. Die Gasmischung wird durch eine Absorptionssäule geführt, in welcher das CO_2 quantitativ aus dem Gasstrom entfernt wird. Der Stickstoff wird nicht beeinflusst und mit dem Trägergas zur Messzelle transportiert. Sobald die Messung des Stickstoffs abgeschlossen ist, wird die Absorptionssäule auf 100°C aufgeheizt. Dadurch wird das CO_2 desorbiert und durch das Helium in die Messzelle gespült. Nach Abschluss der CO_2 -Messung wird ein neuer Analysenablauf gestartet.

Der Nachweis erfolgt in einer Detektionseinheit, welche hinsichtlich des Trägergases Helium optimiert ist. Sie besteht aus zwei Kammern, von der eine mit Helium mit konstanter Geschwindigkeit durchströmt wird und als Referenzstrom für die zweite Kammer dient, die vom Helium mit Fremdgasanteil durchströmt wird (Messstrom). Die beiden Kammern bilden eine Messbrücke, deren unterschiedliche elektrische Spannung ein direktes Maß für den Fremdgasanteil im Trägergas des Messstroms ist. Die Zellenausgangsspannung wird in Form eines Peaks in Abhängigkeit von der Zeit aufgezeichnet, digitalisiert, integriert und als Integralzahl dargestellt. Um eine Nullpunktdrift des Detektors zu vermeiden, wird vor jeder Messung ein Nullpunktgleich durchgeführt.

Durchführung

Die Analyse der Strohproben des Gefäßversuchs wird von einer Mitarbeiterin des Instituts für Organischen Landbaus am Elementaranalysator VARIO EL durchgeführt.

2.3.2 Boden

Die Probennahme im Feldversuch findet an den in Tabelle 10 gezeigten Terminen statt.

Tabelle 10: Probenzeitpunkte und Probentiefen im Feldversuch

Probenzeitpunkt	Datum	Probentiefe [cm]
Vor Düngung	13.03.2002	0 – 30
Nach Düngung	28.03.2002	0 – 30
Nach Ernte der Hauptfrüchte	Weizen: 15.08.2002	0 – 90
	Ackerbohnen: 26.08.2002	0 – 90
	Weißlupine: 27.08.2002	0 - 90
Herbst in der Brache	Brache: 20.11.2002	0 - 90

Es werden pro Parzelle fünf Einstiche (vor und nach der Düngung im A_p-Horizont, nach der Ernte und im Herbst 0-90 cm) mit einem dreiteiligen Probenbohrer vorgenommen, wobei die Einstiche in der Kernparzelle vorgenommen werden. Bei der Probennahme bis in 90 cm Tiefe wird jeder Einstich in drei Abschnitte unterteilt: 0-30 cm, 30-60 cm und 60-90 cm. Diese drei Bohrkerne werden getrennt aufgefangen und auch getrennt weiterverarbeitet. Die Bohrkerne der fünf Einstiche werden gemischt, in Tüten umgefüllt und gekühlt zur Probenaufbereitung ins Labor transportiert. Die Bodenproben werden dort nach einer einheitlichen Methode aufbereitet.

Im Gefäßversuch werden die Bodenproben zu den in Tabelle 11 gezeigten Terminen gezogen und dann wie unten beschrieben aufbereitet. Im Gefäß werden je Gefäß zwei Einstiche mit einem Handbohrer entnommen.

Tabelle 11: Probezeitpunkte im Gefäßversuch

Probenzeitpunkt	Datum
Nach Düngung	08.04.2002
Nach Ernte der Hauptfrüchte	13.08.2002
Herbst (Zwischenprobe)	05.11.2002

Probenaufbereitung

Zunächst wird jede Probe ein weiteres Mal mit der Hand gemischt, bevor ein Teil der Probe (ca. 200 g bei Feldversuchproben, gesamte Probe bei Gefäßversuch) im Trockenschrank bei 40°C getrocknet wird. Nach der Trocknung erfolgt das Mahlen der Proben auf ≤ 1 mm mit einer Bodenmühle. Die Bodenmühle wird

nach jeder Probe mit Pinsel und Druckluft gereinigt. Die Extraktion der Proben erfolgt mit den drei unten dargestellten Methoden.

2.3.2.1 CAL-Extraktion

Prinzip

Die Extraktion des Nährstoffs Phosphor erfolgt mit einer sauren, auf pH 4,1 gepufferten CAL-Lösung (Calcium-Acetate-Lactate-Lösung)(CAL-Methode nach Schüller, 1969) aus dem getrockneten Boden. Nach Filtration des Extraktes und einer Anfärbung des Filtrates erfolgt eine photometrische Bestimmung des Phosphors.

Extraktion und Filtration

Die Extraktionslösung wird durch eine fünf-fache Verdünnung der CAL-Vorratslösung hergestellt.

Die Vorratslösung wird wie folgt hergestellt:

Es werden 770 g Calciumlactat ($C_6H_{10}CaO_6 \cdot 5 H_2O$) und 395 g Calciumacetat $[(CH_3COO)_2Ca \cdot H_2O]$ in je 3 l destilliertem Wasser gelöst, später werden beide Lösungen vereinigt. Nach dem Abkühlen werden 895 ml Essigsäure (CH_3COOH , $\rho=1,06$ g/ml) zugegeben und mit destilliertem Wasser auf 10 l aufgefüllt.

Zur Extraktion werden 5 g des getrockneten und gemahlten Bodens und eine kleine Menge Aktivkohle mit 100 ml CAL-Lösung versetzt und 2 Stunden im Horizontalschüttler geschüttelt. Die Aktivkohle soll Verfärbungen vorbeugen, welche das Messergebnis später negativ beeinflussen können. Es kann bei carbonatreichen Böden auf Grund der sauren Extraktionslösung zu CO_2 -Freisetzung kommen, so dass man die Schüttelflaschen erst nach 1 Stunde Schütteln fest verschließt. Danach wird die Suspension durch ein trockenes Faltenfilter (512 ½) in trockene 100 ml-Plastikflaschen filtriert. Die Plastikflaschen werden mit 12 – 20 ml Filtrat vorgespült, bevor das Filtrat endgültig aufgefangen wird.

Färbereagenz und Anfärben der Proben

Zur Anfärbung wird das Vanadat-Molybdat-Reagenz verwendet. Dies setzt sich wie folgt zusammen:

Salpetersäure: 500 ml HNO₃, (65%) mit 1 l Wasser mischen.

Ammoniummonovanadat: 6,25 g NH₄VO₃ in heißem Wasser lösen, abkühlen, 20 ml Salpetersäure, ω = 65% zugeben und mit destilliertem Wasser auf 1 auffüllen.

Ammoniumheptamolybdat: 125 g [(NH₄)₆MO₇O₂₄ * 4 H₂O] in ca. 50°C heißem Wasser lösen, abkühlen und mit destilliertem Wasser auf 1 l auffüllen.

Die Gebrauchslösung wird durch Mischen der oben beschriebenen Lösung in der angegebenen Reihenfolge im Verhältnis 1:1:1 hergestellt. Zur Anfärbung werden 25 ml Extrakt mit 1 ml Salpetersäure (65%) und 5 ml Gebrauchslösung zugegeben und gemischt. Nach einer Reaktionszeit von 30 Minuten wird die Extinktion bei 406 nm im Photometer gemessen.

Kalibrierung des Photometers

Für die Messung des Phosphors in den Extrakten muss eine Kalibrierreihe erstellt werden, wobei die Lösungen dieser Reihe in gleicher Weise wie die Extrakte angefärbt werden. Die Kalibrierreihe soll 0 – 2,5 – 5,0 – 10 – 20 – 40 mg P₂O₅/100 g Boden enthalten. Diese Kalibrierreihe wird in aufsteigender Reihenfolge im Photometer gemessen und die Extinktionen zur Berechnung des Eichfaktors EF nach Gleichung 4 herangezogen:

$$\text{Eichfaktor [mg P}_2\text{O}_5\text{ / 100 g Boden]} = \frac{\sum \left[\frac{\text{Konzentration [mg P}_2\text{O}_5\text{ / 100 g Boden]}}{\text{Extinktion}} \right]}{\text{Anzahl Kalibrierlösungen}}$$

Gleichung 4: Berechnung des Eichfaktors EF

Der so ermittelte Eichfaktor wird zur Berechnung der P-Konzentration in den Extrakten herangezogen, indem die gemessenen dimensionslosen Extinktionen mit diesem multipliziert werden. Während der Messung der Proben sollte in regelmäßigem Abstand die Nulllösung der Kalibrierreihe gemessen werden, um eine Abweichung des Photometers von der Kalibrierung zu vermeiden.

Messen der Proben

Durch die Zugabe der Färbereagenzien bildet das Phosphat mit dem Ammoniummolybdat einen gelbgefärbten Komplex, wobei die Reaktion 30 Minuten nach Zugabe des Färbereagens abgeschlossen ist. Die Messung erfolgt am Durchflussphotometer bei 406 nm. Bei jeder Messreihe werden mindestens eine Blindprobe, die genau wie die anderen Extrakte behandelt wurde, außerdem mindestens ein laborinterner Standard und ein VDLUFA-Standard mitgemessen. Der Blindwert wird zur Berücksichtigung der Eigenfärbung der Extrakte (durch Zugabe von Aktivkohle und Salpetersäure minimiert) bei der Berechnung der Konzentrationen gemessen, die Standards zur Kontrolle der gesamten Messreihe. Da die Kalibrierlösungen in der Einheit [**mg P₂O₅/100 g Boden**] eingestellt sind, erfolgt eine Umrechnung der gefundenen Werte in die Einheit [**mg P/kg Boden**].

2.3.2.2 DL-Extraktion

Prinzip

Die Extraktion des Nährstoffs Phosphor erfolgt mit einer durch Salzsäure auf pH 3,6 eingestellten Lösung aus Calciumlactat aus dem getrockneten Boden. Nach Filtration der Extrakte und Anfärbung der Extrakte erfolgt die photometrische Bestimmung der P-Konzentration der Proben.

Extraktion und Filtration

Die Extraktionslösung wird durch zwanzigfache Verdünnung der Vorratslösung hergestellt, wobei die Vorratslösung wie folgt hergestellt wird:

600 g Calciumlactat (C₆H₁₀CaO₆ * 5 H₂O p.A.) werden mit 4 l kochendem Wasser gelöst und nach vollständigem Lösen des Calciumlactats wird der noch warmen Lösung 200 ml Salzsäure (c = 10 mol/l) zugesetzt. Nach Erkalten der Lösung wird auf 5 l aufgefüllt. Die Extraktionslösung wird täglich frisch bereitet. Es werden 5 g Boden in 750 ml-Glasflaschen (z.B. Weinflaschen) eingewogen und mit 250 ml Extraktionslösung versetzt. Die Proben werden in einem Überkopfschüttler 90 Minuten geschüttelt und danach durch 512 ½ Faltenfilter filtriert, wobei die ersten 10 – 20 ml des Filtrates verworfen werden.

Färbereagenz und Anfärben der Proben

Die Anfärbung erfolgt nach der Phosphormolybdänblau-Methode nach Murphy und Riley (1962). Zur Herstellung des Färbereagenz werden folgende Lösungen benötigt:

5 n Schwefelsäure: 140 ml konz. H_2SO_4 ($D = 1,84$) werden mit destilliertem Wasser auf 1 l aufgefüllt,

Ammoniummolybdatlösung: 40 g NH_4VO_3 werden in 1 l destilliertem Wasser gelöst,

0,1M Ascorbinsäure: 1,76 g Ascorbinsäure werden in 100 ml destilliertem Wasser gelöst. Diese Lösung muss täglich frisch angesetzt werden.

Kaliumantimon-III-oxytartrat-Lösung: 274,3 mg $\text{K}(\text{SbO})\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 0,5 \text{ H}_2\text{O}$ werden in 100 ml destilliertem Wasser gelöst.

Das Färbereagenz wird durch Mischen der oben beschriebenen Lösung in der angegebenen Reihenfolge hergestellt. Es muss nach jeder Zugabe kräftig umgeschüttelt werden, außerdem ist diese Lösung täglich frisch zu bereiten.

Die Anfärbung erfolgt durch Zugabe von 4 ml Färbereagenz in 10 ml Extrakt. Die Konzentration der Messlösung sollte zwischen 0,1 und 1,5 $\mu\text{g P/ml}$ liegen. Ist die Konzentration zu hoch, wird diese Lösung mit DL-Lösung verdünnt. Anschließend wird mit destilliertem Wasser aufgefüllt und kräftig geschüttelt.

Nach einer Reaktionszeit von 30 Minuten werden die Lösungen bei 882 nm gemessen (am Durchflussphotometer bei 820 nm).

Kalibrierung des Photometers

Um das Photometer zu kalibrieren, wird eine Kalibrierreihe mit den Konzentrationen 0 – 0,2 – 0,4 – 0,6 – 1,0 und 1,4 $\mu\text{g P/ml}$ hergestellt und in gleicher Weise wie die Extrakte mit Färbereagenz versetzt. Dabei ist darauf zu achten, dass jeder Kalibrierlösung soviel DL-Extraktionslösung zugegeben wird wie auch in den Extrakten enthalten ist (also im Normalfall 10 ml). Diese Kalibrierlösungen werden in aufsteigender Reihenfolge am Photometer gemessen und die gemessenen Werte zur Berechnung des Eichfaktors nach Gleichung 4 herangezogen. Der Eichfaktor hat in diesem Falle die Einheit [$\mu\text{g P/ml}$]. Um auf

die Einheit [mg P/kg Boden] zu gelangen, muss der Verdünnungsfaktor berücksichtigt werden, der nach Gleichung 5 berechnet wird:

$$VF = \frac{\text{Extraktionsvolumen (250 ml)} \cdot \text{Meßlösung (50 ml)}}{\text{Aliquot (10 ml)} \cdot \text{Einwaage (5000 mg)} \cdot 1000}$$

Gleichung 5: Berechnung des Verdünnungsfaktors VF

Die in Klammern angegebenen Volumina sind standardmäßig, bei Verdünnung der Messlösung wurde das Aliquot verändert.

Analyse der Proben

Durch Zugabe des Färbereagens bildet Phosphat mit dem Ammoniummolybdat einen gelbgefärbten Komplex, wobei die Ascorbinsäure als starkes Reduktionsmittel das sechs-wertige Molybdän zu niedrigeren Oxidationsstufen reduziert und ein blauer Farbkomplex entsteht. Die Extrakte werden nach einer Reaktionszeit von ca. 30 Minuten am Photometer bei 882 nm gemessen. Bei jeder Messreihe wird neben der Nulllösung der Kalibrierreihe mindestens eine Blindlösung, die in gleicher Weise wie die anderen Extrakte behandelt wird, gemessen. Außerdem wird ein laborinterner Standard und eine VDLUFA-Standard als Kontrolle gemessen, die genau wie die Proben extrahiert werden. Die Blindwerte dienen dazu, Eigenfärbungen der Extraktionslösungen zu erfassen und werden als Korrekturglied bei der Berechnung der Ergebnisse berücksichtigt. Durch Abzug der Extinktion der Blindlösungen von der Extinktion der Proben erhält man deren Netto-Extinktion (Gleichung 6), mit welcher die weiteren Berechnungen durchgeführt werden. Die Phosphat-Konzentration der Proben erhält man nach Gleichung 7.

$$\text{Netto-Extinktion} = \text{Extinktion}_{\text{Probe}} - \text{Extinktion}_{\text{Blindlösung}}$$

Gleichung 6 : Berechnung der Nettoextinktion

$$\text{P-Konzentration [mg P/kg Boden]} = \text{Netto-Extinktion}_{\text{Probe}} * \text{EF} * \text{VF}$$

Gleichung 7: Berechnung der P-Konzentration [mg P/kg Boden] in der Probe

2.3.2.3 EUF-Extraktion

Prinzip

Das Prinzip der Methode beruht auf der Extraktion von Ionen im elektrischen Feld. Durch Anlegen einer Spannung und eines Unterdrucks an eine Bodensuspension werden dieser Kationen und Anionen entzogen und können in den Extrakten mittels verschiedener Methoden bestimmt werden. Für Phosphat wird die Molybdän-Blau-Methode nach Murphy und Riley (1962) verwendet. Die EUF-Extraktion imitiert im weitesten Sinne das System Boden-Pflanze und ergänzt die Erfassung des pflanzenverfügbaren und nachlieferbaren Phosphats aus der labilen Phase.

Extraktion

Die zwei verwendeten EUF-Geräte sind vom Typ 724 mit gekühlter Mittelzelle der Firma Vogel, Gießen. Abbildung 5 zeigt eine schematische Darstellung der Funktionsweise des EUF-Gerätes. Es werden zwei Fraktionen extrahiert, wobei das Verfahren wie folgt funktioniert:

In die Mittelzelle werden 5 g Boden (bei 40°C getrocknet, auf ≤ 1 mm gesiebt) eingewogen und mit destilliertem Wasser im Verhältnis 1:10 suspendiert und bei einer konstanten Temperatur ständig gerührt. Durch Anlegen einer Spannung und eines Unterdrucks (-0,3 bar an der Kathode und -0,4 bar an der Anode) wird der Suspension durch ein Membranfilter (Filter aus Zellulosetriacetat der Firma Sartorius) mit einer Ausschlussgrenze von Molekülen > 20 kDa die Anionen und Kationen entzogen. Auf die Menge der extrahierten Anionen und Kationen haben im Wesentlichen die Temperatur, Spannung und Extraktionsdauer einen Einfluss. Für die Routineuntersuchung werden die Proben unter folgenden Bedingungen extrahiert:

1. Fraktion: 30 Minuten Extraktion bei 20°C und 200 V (≤ 15 mA)
2. Fraktion: 5 Minuten Extraktion bei 80°C und 400 V (≤ 150 mA)

Die Kathoden- und Anodenextrakte werden direkt bei der Extraktion vereinigt aufgefangen, wobei die erste Fraktion in einem 200 ml-Kolben aufgefangen wird und die zweite Fraktion in einem 100 ml-Kolben. Die Kolben werden bei

Raumtemperatur zur Eichmarke mit destilliertem Wasser aufgefüllt und am darauf folgenden Tag analysiert, wobei die Bezugsgröße für die späteren Berechnungen das Volumen der Kolben ist. Die Extrakte sind nur begrenzt haltbar und werden daher gekühlt aufbewahrt und spätestens am zweiten Tage nach der Extraktion analysiert. Es wird bei jedem Extraktionstag jeweils mindestens ein Standardboden extrahiert und je EUF-Gerät ein Blindwert erstellt, um die Extraktionsbedingungen zu dokumentieren. Weiterhin wird vor der ersten Extraktion ein Blind-Durchlauf mit jedem Gerät durchgeführt. Die verwendeten Filter werden außerdem 24 h vor der Extraktion in destilliertem Wasser eingelegt und vor der Extraktion gespült. Da je nach Charge der verwendeten Membranfilter unterschiedliche Extraktmengen zu erwarten sind (Appel, 1991), werden nur Membranfilter der gleichen Charge verwendet.

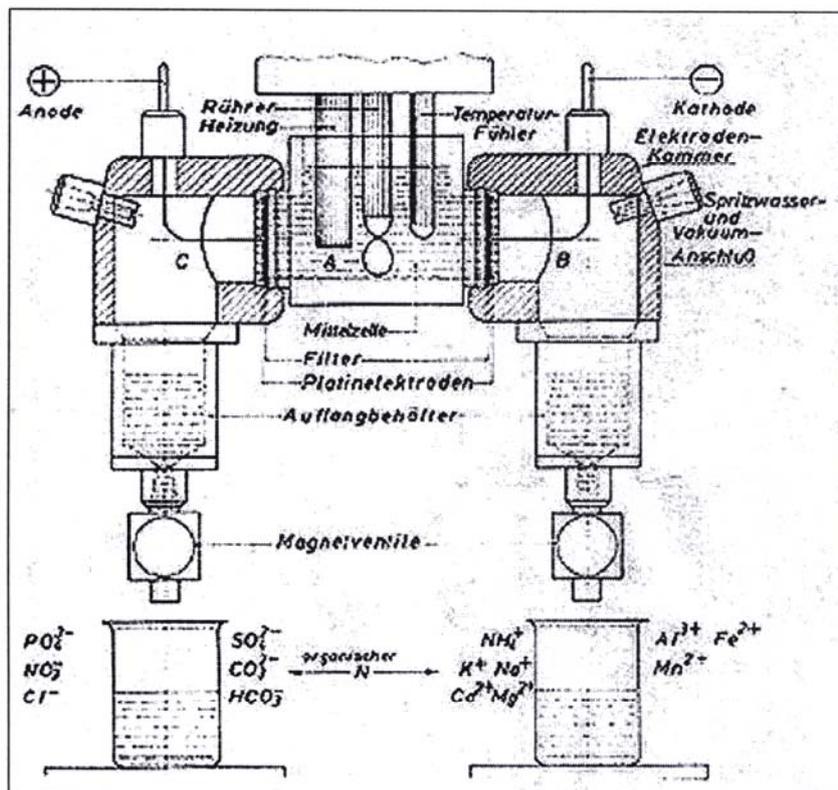


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Elektrodenkammer-Mittelzellen-Blocks eines EUF-Gerätes (VDLUFA: Methodenbuch Band 1, Methoden zur Bodenuntersuchung)

Anfärben und Analyse der Proben

Das Anfärben und die kolorimetrische Bestimmung der Phosphatkonzentration in den Extrakten wird analog zu der Analyse der Extrakte nach DL-Extraktion (siehe Kapitel 2.3.2.2: Extraktion der Proben) durchgeführt.

Die Berechnung der Phosphatgehalte wird mit Gleichung 6 und Gleichung 7 Extraktion (siehe Kapitel 2.3.2.2: Analyse der Proben) durchgeführt.

2.3.2.4 CaCl₂-Extraktion zur N-, C_{org}- und pH-Bestimmung

Die Extraktion der Proben mit Calciumchlorid nach Houba et. al. (1988) wird zur Bestimmung des Boden-pH und zur Bestimmung von NH₄-N, NO₃-N, N_{ges}, N_{org} und C_{org} angewendet.

Extraktion und Filtration

Zur Extraktion werden 10 g Boden (im Gefäßversuch 5 g Boden) mit 0,01 molarer CaCl₂-Lösung versetzt und 2 h über Kopf geschüttelt. Dann werden die Extrakte über N-freie Papierfilter (512 ½) filtriert und die folgenden Analysen durchgeführt.

pH-Bestimmung

Zur Bestimmung des pH-Wertes werden 25 g Boden in 50 ml 0,01 M CaCl₂-Lösung suspendiert und nach 1 h mittels Glaselektroden-Potentiometer der Firma Schott gemessen. Zur Vorbereitung des Potentiometers muss dieses mit einer Standard-Lösung im sauren Bereich und einer Standard-Lösung im alkalischen Bereich bekannten pH-Wertes kalibriert werden.

Bestimmung von NH₄-N, NO₃-N, N_{ges}, N_{org} und C_{org}

NH₄-N, NO₃-N, N_{ges} und C_{org} werden kolorimetrisch im CaCl₂-Extrakt am Dreikanal-Autoanalyser der Firma Technicon bestimmt. N_{org} wird nach Gleichung 8 rechnerisch bestimmt:

$$N_{\text{org}} = N_{\text{gesamt}} - (\text{NH}_4^+ \text{-N} + \text{NO}_3^- \text{-N})$$

Gleichung 8: Berechnung von N_{org}

2.4 Auswertung der Ergebnisse

Die Ergebnisse des Feldversuchs und des Gefäßversuchs werden unabhängig voneinander ausgewertet und dargestellt. Die Darstellung erfolgt daher in zwei Teilen (3.1 Gefäßversuch und 3.2 Feldversuch).

Die statistische Untersuchung der Ergebnisse der Bodenanalysen und der Pflanzenanalysen im Feldversuch wird mit einer einfaktoriellen Varianzanalyse mit anschließendem LSD-Test auf 5%-Niveau durchgeführt (Köhler et al. 1995).

Im Gefäßversuch werden die Ergebnisse der Boden- und Pflanzenanalyse durch eine zweifaktorielle Varianzanalyse mit anschließendem LSD-Test auf 5%-Niveau durchgeführt (Köhler et al. 1995). Damit werden im Gefäßversuch die Vergleiche zwischen den Düngungsvarianten erfasst.

Im Gefäßversuch werden Bodenproben nach unterschiedlichem Schema vor Versuchsbeginn und nach Versuchsablauf gezogen, sodass die statistische Auswertung speziell dieser Daten mittels der Varianzanalyse nicht möglich ist. Die Probennahme erfolgt in der Art, dass für jede Düngungsvariante ein Mittelwert der Phosphatkonzentration im Boden vor Versuchsbeginn ermittelt wird. Nach dem Anbau der Hauptfrüchte werden die Bodenproben aber derart gezogen, dass für jede Düngungsvariante und für jede Hauptfrucht Mittelwerte der Phosphatkonzentration im Boden ermittelt werden.

Die Daten werden daher mittels eines t-Testes ausgewertet, der zum Vergleich der Mittelwerte der Phosphatkonzentration im Boden nach Anbau der Hauptfrüchte mit einem festen (theoretischen) Wert geeignet ist (Köhler et al, 1995).

Die Auswertung der Daten und Erstellung der Diagramme erfolgt mit Microsoft® EXCEL Unterstützung und die Verrechnung der Daten erfolgt generell mit mehr Nachkommastellen als in der vorliegenden Arbeit tabellarisch dargestellt. In allen Darstellungen wird das Signifikanzniveau und dessen Wert angegeben.

3 Ergebnisse

3.1 Gefäßversuch

3.1.1 Pflanzen

3.1.1.1 Erträge der Hauptfrüchte im Gefäßversuch

Kornertrag

Tabelle 12: Kornertrag der Hauptfrüchte im Gefäßversuch (Gefäßversuchsstation, 2002)

Düngungsvariante	Weizen	Weißblupine [g TM/ Gefäß]	Ackerbohne
Rohphosphat	78,3 a	44,5 b	48,7 bd
CaHPO ₄	78,4 a	37,0 c	52,8 d

GD(5%) = 5,2 n = 12

Es ist zu beobachten, dass der Weizen in beiden Düngungsvarianten gleich hohe Kornerträge erbrachte, die Weißblupine jedoch auf die Düngung mit CaHPO₄ mit Ertragsdepression reagierte (Tabelle 12). Die Ackerbohne reagierte auf die CaHPO₄-Düngung mit einer Ertragssteigerung. Vergleicht man beide Düngungsvarianten, ist zu beobachten, dass die Weißblupine jeweils den geringsten Kornertrag erreichte.

Strohertrag

Tabelle 13: Strohertrag der Hauptfrüchte im Gefäßversuch (Gefäßversuchsstation, 2002)

Düngungsvariante	Weizen	Weißblupine [g TM/ Gefäß]	Ackerbohne
Rohphosphat	84,0 a	82,9 a	52,2 b
CaHPO ₄	83,7 a	86,0 a	56,4 b

GD(5%) = 5,4 n = 12

Es ist zu beobachten, dass die Ackerbohne in beiden Düngungsvarianten einen signifikant niedrigeren Strohertrag erbrachte als die Weißlupine und der Sommerweizen (Tabelle 13). Die Weißlupine und der Sommerweizen zeigten im Strohertrag bei beiden Düngungsvarianten keine signifikanten Unterschiede. Vergleicht man die beiden Düngungsvarianten, so ist innerhalb der Hauptfrüchte kein signifikanter Unterschied bezüglich des Strohertrags zu beobachten.

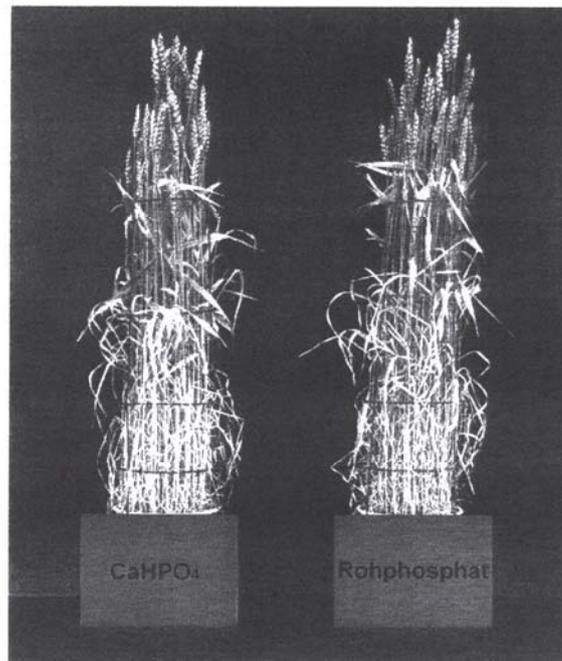


Abbildung 6: Sommerweizen im Entwicklungsstadium EC 77 (späte Milchreife) in Abhängigkeit von der P-Form (Gefäßversuchsstation, Sommer 2002)

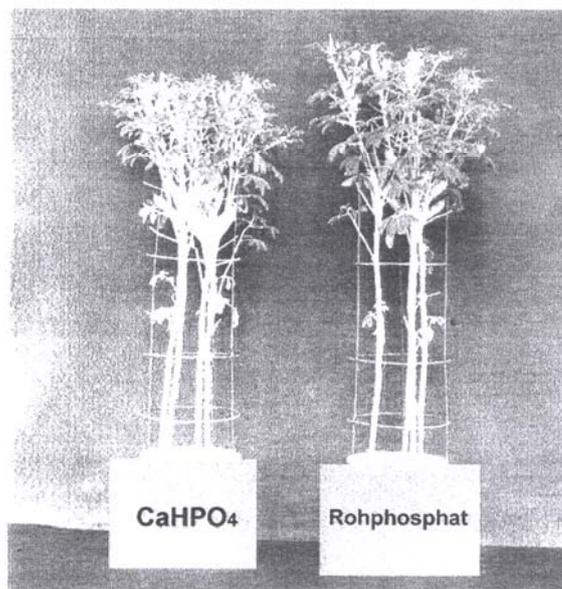


Abbildung 7: Wachstum der Weißlupine im Entwicklungsstadium EC 79 (Grünreife) in Abhängigkeit von der P-Form (Gefäßversuchsstation, Sommer 2002)

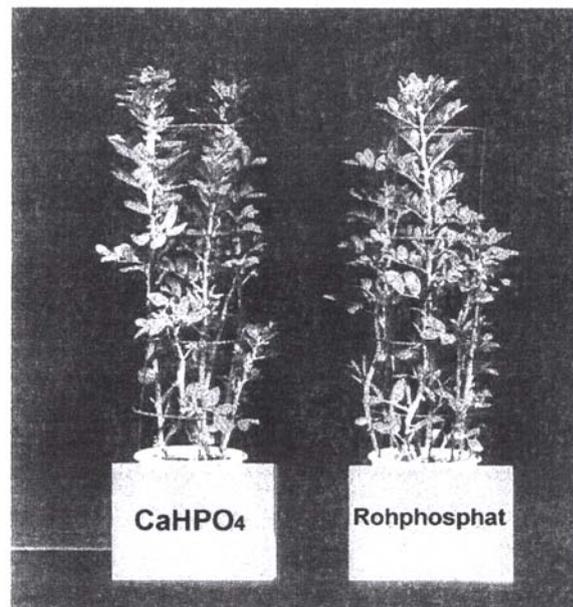


Abbildung 8: Wachstum der Ackerbohne im Entwicklungsstadium EC 69 (Ende der Blüte) in Abhängigkeit von der P-Form (Gefäßversuchsstation, Sommer 2002)

3.1.1.2 Nährstoffkonzentrationen in den Hauptfrüchten

In den folgenden Tabellen werden die Phosphatkonzentrationen im Korn und Stroh der Hauptfrüchte des Gefäßversuchs dargestellt.

Phosphatkonzentration im Korn

Tabelle 14: Phosphatkonzentration im Korn der Hauptfrüchte des Gefäßversuchs (Gefäßversuchsstation, 2002)

Düngungsvariante	Weizen	Weißlupine [mg P/g TM]	Ackerbohne
Rohphosphat	2,4 a	3,9 b	3,9 b
CaHPO ₄	3,3 c	5,0 d	5,6 e

GD(5%) = 0,2 n = 16

In der Düngungsvariante mit Rohphosphat ist zu beobachten, dass die Weißlupine und die Ackerbohne gegenüber dem Weizen eine signifikant höhere Phosphatkonzentration im Korn aufwiesen (Tabelle 14). In der mit CaHPO₄ gedüngten Variante ist zu beobachten, dass die Ackerbohne die höchste Phosphatkonzentration im Korn aufwies, die Weißlupine fiel dagegen etwas ab und der Weizen wies die geringste Phosphatkonzentration auf. Vergleicht man

die Hauptfrüchte bezüglich der Düngungsvarianten, ist zu beobachten, dass durch die Applikation des CaHPO_4 in allen Hauptfrüchten eine Steigerung der Phosphatkonzentration im Korn der Hauptfrüchte erreicht wurde.

Phosphatkonzentration im Stroh

Tabelle 15: Phosphatkonzentration im Stroh der Hauptfrüchte im Gefäßversuch (Gefäßversuchsstation, 2002)

Düngungsvariante	Weizen	Weißblupine [mg P/g TM]	Ackerbohne
Rohphosphat	0,3 a	0,7 b	0,8 b
CaHPO_4	0,5 a	1,9 c	1,3 d
GD(5%) = 0,2	n = 16		

Es ist in der Rohphosphatvariante zu beobachten, dass die Weißblupine und die Ackerbohne gegenüber dem Weizen eine signifikant höhere Phosphatkonzentration im Stroh aufwiesen (Tabelle 15). In der mit CaHPO_4 gedüngten Variante besaß die Weißblupine die höchste Phosphatkonzentration, die Ackerbohne hatte dagegen eine signifikant niedrigere Phosphatkonzentration. Im Weizen wurde die geringste Phosphatkonzentration im Stroh ermittelt. Vergleicht man die Hauptfrüchte bezüglich der Düngungsvarianten, erkennt man, dass die Applikation des CaHPO_4 eine Steigerung der Phosphatkonzentration im Stroh von Weißblupine und Ackerbohne bewirkte, der Weizen jedoch keine höhere Phosphatkonzentration im Stroh aufwies.

Stickstoffkonzentration im Stroh

Tabelle 16: Stickstoffkonzentration im Stroh der Hauptfrüchte im Gefäßversuch (Gefäßversuchsstation, 2002)

Düngungsvariante	Weizen	Weißblupine [mg N/g TM]	Ackerbohne
Rohphosphat	2,7 a	8,7 b	12,9 c
CaHPO_4	2,7 a	10,2 b	13,6 c
GD(5%) = 1,8	n = 4		

In beiden Düngungsvarianten kann man beobachten, dass die Ackerbohne die höchste Stickstoffkonzentration im Stroh besaß, die Weißblupine demgegenüber eine signifikant niedrigere Stickstoffkonzentration aufwies (Tabelle 16). Am niedrigsten war die Stickstoffkonzentration im Stroh des Weizens. Innerhalb der Hauptfruchtvarianten sind bezüglich der Düngungsvariante keine signifikant unterschiedlichen Stickstoffkonzentrationen zu beobachten.

C/N-Verhältnis im Stroh der Hauptfrüchte

Das C/N-Verhältnis des Strohs der Hauptfrüchte wird in der nachfolgenden Tabelle 17 dargestellt und soll für die Stickstoffausgleichsdüngung, die aufgrund der Strohdüngung erforderlich ist, als Anhaltspunkt dienen (siehe Tabelle 8: Benötigte N-Menge zum Ausgleich des C/N-Verhältnisses der Vorfruchtreste (Gefäßversuchsstation, November 2002)).

Tabelle 17: C/N-Verhältnis im Stroh der Hauptfrüchte im Gefäßversuch (Gefäßversuchsstation, 2002)

Düngungsvariante	Weizen	Weißblupine	Ackerbohne
	C/N-Verhältnis [C/N]		
Rohphosphat	159,9 c	49,1 c	32,2 a
CaHPO ₄	165,8 c	37,0 a	29,3 a
GD(5%) = 11,1	n = 4		

Da die Leguminosen in der Lage sind, Luftstickstoff zu binden, ist auch deren C/N-Verhältnis im Stroh enger als das des Weizens, wie in Tabelle 17 zu sehen ist. Das C/N-Verhältnis von Weizen war in beiden Düngungsvarianten signifikant weiter als das der Leguminosen und zeigte bezüglich der Düngungsvariante keinen signifikanten Unterschied im C/N-Verhältnis. Die Weißblupine zeigte in der Düngungsvariante mit Rohphosphat ein etwas weiteres C/N-Verhältnis als die Ackerbohne. In der Düngungsvariante mit CaHPO₄ zeigen sich zwischen den Leguminosen keine signifikanten Unterschiede.

Entzüge

In den nachfolgenden Tabellen wird der Phosphatentzug der Hauptfrüchte dargestellt, der sich aus Phosphatkonzentration und Ertrag zusammensetzt. Es wird dabei in Phosphatentzug durch Kornertag und durch Strohertrag unterschieden.

Tabelle 18: Phosphatentzug durch Export der Körner der Hauptfrüchte im Gefäßversuch (Gefäßversuchsstation, 2002)

Düngungsvariante	Weizen	Weißlupine [mg P/Gefäß]	Ackerbohne
Rohphosphat	188 a	174 a	144 b
CaHPO ₄	256 c	185 a	293 e
GD(5%) = 23,7		n = 16	

Es ist zu beobachten, dass der Weizen den höchsten Phosphatentzug zeigte, wobei der Phosphatentzug des Weizens durch die Applikation von CaHPO₄ deutlich gesteigert wurde. Auch die Ackerbohne zeigte durch die Applikation von CaHPO₄ einen gesteigerten Phosphatentzug, der auch den Weizen übertraf. In der Düngungsvariante mit Rohphosphat zeigte die Ackerbohne jedoch den geringsten Phosphatentzug. Die Weißlupine konnte durch die Applikation von CaHPO₄ keine Steigerung des Phosphatentzuges gegenüber der Düngung mit Rohphosphat zeigen (Tabelle 18).

Tabelle 19: Phosphatentzug durch das Stroh der Hauptfrüchte im Gefäßversuch (Gefäßversuchsstation, 2002)

Düngungsvariante	Weizen	Weißlupine [mg P/Gefäß]	Ackerbohne
Rohphosphat	29 a	54 b	42 ab
CaHPO ₄	44 a	161 c	70 d
GD(5%) = 15,0		n = 16	

Der Phosphatentzug des Strohs der Hauptfrüchte wird in Tabelle 19 dargestellt. In der Düngungsvariante mit Rohphosphat kann man beobachten, dass die Weißlupine signifikant mehr Phosphat mit dem Stroh entzog als der Weizen. In

der zweiten Düngungsvariante mit CaHPO_4 konnte man eine signifikante Steigerung des Phosphatentzuges durch das Stroh der Ackerbohne und der Weißlupine beobachten. Insbesondere die Weißlupine zeigte eine Verdreifachung des Phosphatentzuges durch das Stroh gegenüber der Düngungsvariante mit Rohphosphat. Der Weizen zeigte keinen signifikant höheren Phosphatentzug in der Düngungsvariante mit CaHPO_4 .

Tabelle 20: Phosphataufnahme (Korn + Stroh) durch die Hauptfrüchte im Gefäßversuch (Gefäßversuchsstation, 2002)

Düngungsvariante	Weizen	Weißlupine [mg P/Gefäß]	Ackerbohne
Rohphosphat	217 b	228 b	186 a
CaHPO_4	299 c	345 d	363 d
GD(5%) = 22,0	n = 16		

Die Phosphataufnahme der Hauptfrüchte war durch die Applikation des CaHPO_4 gegenüber der Düngungsvariante mit Rohphosphat signifikant höher. Beim Rohphosphat zeigte sich, dass die Ackerbohne die geringste Phosphataufnahme und die Weißlupine gegenüber dem Weizen keine signifikant höhere Phosphataufnahme aufwies. Bei CaHPO_4 wies der Weizen die geringste Phosphataufnahme auf, die Ackerbohne und die Weißlupine zeigten keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Phosphataufnahme (Tabelle 20).

Da im Gefäßversuch nur ein Teil des Strohs in das System zurückgeführt wurde, wird in Tabelle 21 die Phosphatzufuhr durch Strohdüngung in das System dargestellt.

Tabelle 21: Phosphatzufuhr in das System durch Strohdüngung (40 g TM/Gefäß) im Gefäßversuch (Gefäßversuchsstation, 2002)

Düngungsvariante	Weizen	Weißlupine [mg P/Gefäß]	Ackerbohne
Rohphosphat	14 a	26 bc	33 c
CaHPO ₄	21 ab	78 e	51 d

GD(5%) = 8,0 n = 16

Durch die Zugabe der gleichen Strohmenge in jedes Gefäß wird die Phosphatrückfuhr allein von der Konzentration im Stroh der betreffenden Hauptfrucht bestimmt, da beispielsweise kein Ausgleich der zurückgeführten Phosphatmenge durch einen höheren Strohertrag bei geringer Phosphatkonzentration stattfand. In der Düngungsvariante mit Rohphosphat zeigte sich, dass die Leguminosen gegenüber dem Weizen signifikant mehr Phosphat in das System zurückführten. Diese Beobachtung bestätigte sich auch in der Düngungsvariante mit CaHPO₄, wobei hier die zurückgeführte Phosphatmenge bei Weizen sich nicht signifikant zwischen den Düngungsvarianten unterschied. Die Weißlupine leistete die höchste Phosphatzufuhr und wies auch die höchste Steigerung der Phosphatzufuhr durch die Applikation des CaHPO₄ in das System auf.

3.1.1.3 Erträge der Zwischenfrüchte

In der folgenden Tabelle werden die Sprosserträge der Zwischenfrüchte aus dem Gefäßversuch dargestellt.

Tabelle 22: Sprosserträge der Zwischenfrüchte in Abhängigkeit von Vorfrucht und P-Form (Gefäßversuchsstation, Frühjahr 2003)

Zwischenfrucht	Vorfrucht Düngungs- variante	Weizen	Weißlupine [g/Gefäß]	Ackerbohne
Spinat	Rohphosphat	26,0 a	42,3 b	24,1 a
Raps		62,3 de	57,2 d	62,6 df
Spinat	CaHPO ₄	50,6 c	72,4 f	42,4 b
Raps		69,2 ef	72,4 f	69,4 f

GD(5%) = 7,16 n = 4

Der Spinat zeigte mit Rohphosphat nach der Weißlupine einen signifikant höheren Sprossertrag als nach den Hauptfrüchten Weizen und Ackerbohne (Tabelle 22). Im Vergleich dazu reagierte der Spinat auf die CaHPO₄-Düngung mit einer Ertragssteigerung, wobei die Unterschiede ähnlich der Rohphosphatvariante verlaufen. Augenfällig ist hier, dass bei der Düngungsvariante mit Rohphosphat der Spinat nach der Ackerbohne den signifikant geringsten Ertrag erbrachte (Abbildung 9). Betrachtet man den Ertrag des Rapses in der Rohphosphatvariante (Abbildung 11), so sieht man, dass sich der Sprossertrag gegenteilig zum Sprossertrag des Spinats in der gleichen Düngungsvariante verhielt. Hier war der Rapsenertrag nach der Weißlupine im Vergleich zu Weizen und Ackerbohne signifikant am niedrigsten. In der Düngungsvariante mit CaHPO₄ hingegen waren im Sprossertrag des Rapses keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten zu beobachten (Abbildung 12). Weiterhin konnte man erkennen, dass bei der Düngungsvariante mit CaHPO₄ insgesamt signifikant höhere Sprosstrockenmasseerträge auftraten als bei der Düngungsvariante mit Rohphosphat (Abbildung 10 und Abbildung 12).

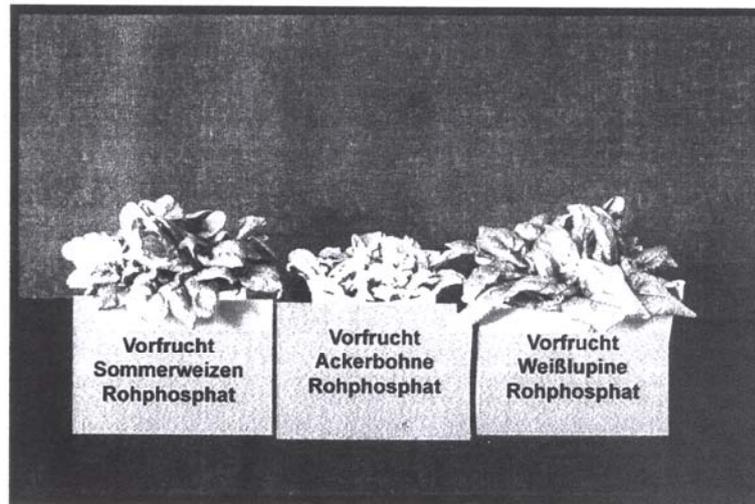


Abbildung 9: Spinatwachstum in der Rohphosphatvariante in Abhängigkeit von der Vorfrucht (Gefäßversuchsstation, Frühjahr 2003)

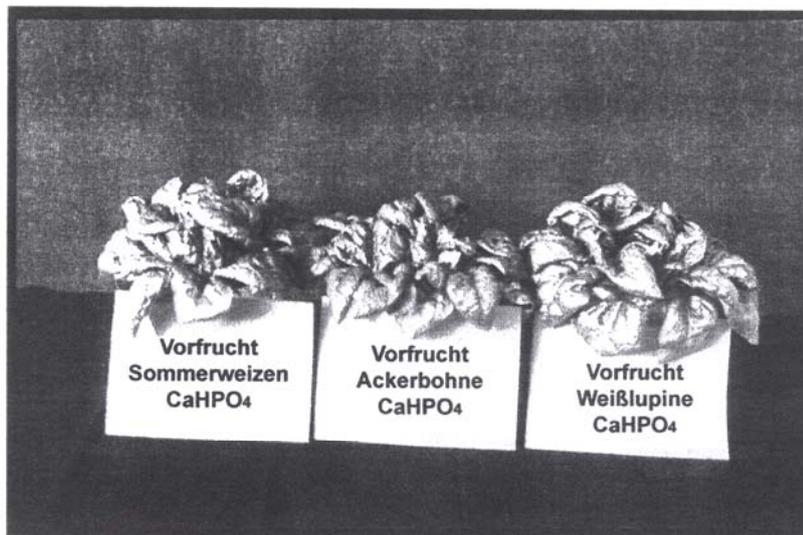


Abbildung 10: Spinatwachstum in der CaHPO₄-Variante in Abhängigkeit von der Vorfrucht (Gefäßversuchsstation, Frühjahr 2003)

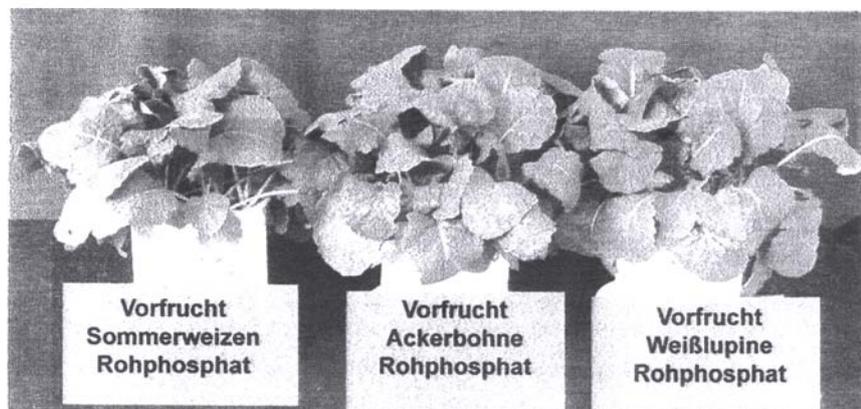


Abbildung 11: Rapswachstum in der Rohphosphat-Variante in Abhängigkeit von der Vorfrucht (Gefäßversuchsstation, Frühjahr 2003)

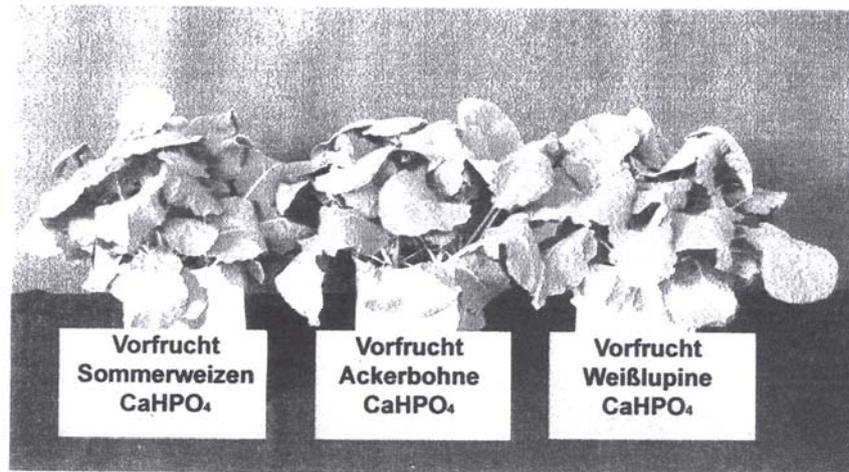


Abbildung 12: Rapswachstum in der CaHPO_4 -Variante in Abhängigkeit von der Vorfrucht (Gefäßversuchsstation, Frühjahr 2003)

3.1.1.4 Nährstoffkonzentrationen in den Zwischenfrüchten

Tabelle 23: P-Konzentration im Spross der Zwischenfrüchte in Abhängigkeit von P-Form und Vorfrucht (Gefäßversuchsstation, Frühjahr 2003)

Zwischenfrucht	Vorfrucht Düngungs- variante	Weizen	Weißlupine [mg P/g TM]	Ackerbohne
Spinat	Rohphosphat	3,85 de	3,52 d	4,07 e
Raps		2,50 b	1,93 a	2,56 b
Spinat	CaHPO_4	4,47 g	4,26 f	4,73 h
Raps		2,87 c	2,98 c	3,00 c

GD(5%) = 0,37 n = 4

Betrachtet man die P-Konzentration im Spross der Zwischenfrüchte (Tabelle 23), so fällt beim Spinat auf, dass die P-Konzentration im Spross nach der Weißlupine signifikant niedriger als nach der Ackerbohne war. Außerdem war nach der Ackerbohne die P-Konzentration im Spinatspross am höchsten. Auf einem signifikant höheren Niveau wiederholt sich diese Beobachtung in der Düngungsvariante mit CaHPO_4 . Auch hier ist die P-Konzentration im Spinatspross nach der Ackerbohne am höchsten und nach der Weißlupine am niedrigsten. Auch der Raps zeigte in der Düngungsvariante mit Rohphosphat bei der Vorfrucht Weißlupine die geringste Phosphatkonzentration im Spross; nach den Vorfrüchten Sommerweizen und Ackerbohne zeigten sich keine

signifikanten Unterschiede erkennen. Insgesamt war die P-Konzentration der Zwischenfrüchte gegenüber der Düngungsvariante mit Rohphosphat signifikant erhöht.

Weitere Analysen zur N-Konzentration im Spross der Zwischenfrüchte ergaben beim Spinat nach der Weißlupine in der Rohphosphatvariante eine signifikant niedrigere N-Konzentration als nach Ackerbohne und nach Weizen (Tabelle 24). Die N-Konzentration im Spinatspross in der Düngungsvariante mit CaHPO_4 war signifikant niedriger als in der Düngungsvariante mit Rohphosphat. Auch hier wies der Spinat nach Weißlupine eine signifikant niedrigere N-Konzentration als bei Weizen und Ackerbohne. Die Analysen des Rapssprosses ergaben, dass sich bezüglich der N-Konzentration weder die Hauptfruchtvarianten noch die Düngungsvarianten signifikant unterschieden.

Tabelle 24: N-Konzentration der Zwischenfrüchte in Abhängigkeit von der Vorfrucht und der applizierten P-Form (Gefäßversuchsstation, Frühjahr 2003)

Zwischenfrucht	Vorfrucht Düngungs- variante	Weizen	Weißlupine [mg N/g TM]	Ackerbohne
Spinat	Rohphosphat	43,73 d	35,85 c	42,64 d
Raps		21,81 a	22,93 ab	21,84 a
Spinat	CaHPO_4	33,13 c	26,19 b	37,37 c
Raps		19,56 a	19,10 a	20,20 a
GD(5%) = 4,45		n = 4		

3.1.1.5 Nährstoffentzug durch die Zwischenfrüchte

Tabelle 25: P-Entzüge der Zwischenfrüchte Spinat und Raps in Abhängigkeit von der Vorfrucht (Gefäßversuchsstation, Frühjahr 2003)

Zwischenfrucht	Vorfrucht Düngungs- variante	Weizen	Weißlupine [mg P/Gefäß]	Ackerbohne
Spinat	Rohphosphat	99 a	146 b	97 a
Raps		156 b	110 a	160 b
Spinat	CaHPO ₄	226 d	308 e	198 c
Raps		199 c	216 c	208 c

GD(5%) = 22,2 n = 4

Der Spinat konnte in der Düngungsvariante mit Rohphosphat nach Weißlupine signifikant mehr Phosphat aufnehmen als nach Weizen und Ackerbohne. Nach letzteren besteht im P-Entzug des Spinats kein signifikanter Unterschied. In der Düngungsvariante mit CaHPO₄ bietet sich auf einem höheren Niveau ein analoges Bild zur Rohphosphatvariante. Auch hier konnte der Spinat nach der Weißlupine signifikant mehr Phosphat entziehen als nach Weizen und Ackerbohne. In dieser Düngungsvariante zeigte sich außerdem beim Spinat nach Ackerbohne der niedrigste P-Entzug. Der Raps zeigte in der Düngungsvariante mit Rohphosphat nach der Weißlupine den geringsten P-Entzug, nach Weizen und Ackerbohne konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. In der Düngungsvariante mit CaHPO₄ zeigte der Raps keine signifikanten Unterschiede zwischen den Vorfruchtvarianten. Der P-Entzug war hier aber signifikant höher als in der Rohphosphatvariante.

Insgesamt konnte bei der CaHPO₄-Variante ein signifikant höherer P-Entzug der Zwischenfrüchte im Vergleich zur Rohphosphatvariante beobachtet werden.

Tabelle 26: N-Entzug der Zwischenfrucht in Abhängigkeit von P-Form und Vorfrucht (Gefäßversuchsstation, Frühjahr 2003)

Zwischenfrucht	Vorfrucht Düngungs- variante	Weizen	Weißlupine [mg N/Gefäß]	Ackerbohne
Spinat	Rohphosphat	1132 a	1466 c	1027 a
Raps		1356 b	1303 b	1365 b
Spinat	CaHPO ₄	1676 d	1892 e	1536 c
Raps		1352 b	1382 b	1401 b

GD(5%) = 139,9 n = 4

Der Spinat zeigte nach der Vorfrucht Weißlupine einen signifikant höheren N-Entzug in der Düngungsvariante mit Rohphosphat als nach Weizen und Ackerbohne. Nach letzteren beiden zeigten sich beim Spinat keine signifikanten Unterschiede bezüglich des N-Entzugs. In der Düngungsvariante mit CaHPO₄ war der N-Entzug des Spinats in allen drei Vorfruchtvarianten signifikant verschieden, wobei nach der Weißlupine der höchste und nach der Ackerbohne der niedrigste N-Entzug zu verzeichnen war.

Betrachtet man den N-Entzug des Rapses, so fällt auf, dass dieser weder in der Rohphosphatvariante noch in der CaHPO₄-Variante signifikant zwischen den Vorfrüchten voneinander zu unterscheiden war.

3.1.1.6 Ertrag, P-Konzentration und P-Aufnahme sowie N-Konzentration von der Nachfrucht Mais, Gefäßversuch

Die verschiedenen Hauptfrüchte (Sommerweizen, Weißlupine, Ackerbohne) sowie die nachfolgenden Zwischenfrüchte (Spinat, Raps) wurden angebaut, um

Phosphat zu mobilisieren bzw. Phosphat zu recyceln, welches in Form des gemahlene Sprossmaterials dem Boden wieder zugeführt wurde.

Tabelle 27 zeigt die Trockenmasseerträge von Mais in Abhängigkeit der Vor- und Zwischenfrüchte sowie der applizierten Phosphatform. Die höchsten Maiserträge wurden in den Varianten erzielt, die mit CaHPO_4 gedüngt werden, wobei hier in der Brachevariante niedrigere Erträge erreicht wurden als nach Spinat- und Rapsanbau (Tab. 27). Das gedüngte Rohphosphat wirkte weniger stark auf das Maiswachstum als das CaHPO_4 , auch wenn zuvor Weißlupine oder Ackerbohne Phosphat mobilisierten.

Betrachtet man den Maisertrag in der Rohphosphatvariante in Abhängigkeit der Hauptfrüchte in der Brachevariante, so fällt auf, dass der höchste Ertrag nach Ackerbohne, gefolgt von Weißlupine und Weizen erzielt wurde.

Vergleicht man die Erträge in der Rohphosphatvariante nach Spinatanbau, so ist zu erkennen, dass der höchste Maisertrag nach Ackerbohne, gefolgt von Weißlupine und Weizen ermittelt wurde. Diese Ergebnisse zeigen, dass die Maiserträge in der Tendenz höher nach den Hauptfrüchten Ackerbohne und Weißlupine waren als nach Weizen. Allerdings sind die Ertragsunterschiede zwischen diesen Varianten des Gefäßversuches statistisch nicht absicherbar.

In der Tabelle 28 ist die P-Konzentration im Mais dargestellt. Hier zeigt sich sehr deutlich, dass CaHPO_4 stärker auf die P-Konzentration im Maisspross wirkte als das Rohphosphat bzw. die verschiedenen Vorfrüchte (Tab. 28).

In der Tabelle 29 ist die P-Aufnahme von Maisspross wiedergegeben. Auch hier zeigt sich, dass die Pflanzen mehr Phosphat nach einer CaHPO_4 -Düngung aufnehmen als nach einer Rohphosphatdüngung.

Da das Wachstum der Maispflanzen im vorliegenden Versuch nicht nur von der P-Verfügbarkeit und Vorfruchteffekten beeinflusst wird, sondern auch von der N-Mineralisation, wurde die N-Konzentration im Maisspross analysiert. Die Ergebnisse dieser Bestimmung sind in der Tabelle 30 gezeigt. Bedingt durch das gute Wachstum in den Varianten mit CaHPO_4 waren die N-Konzentrationen im Maisspross etwas geringer als in den Rohphosphatvarianten. Die N-Konzentrationen im Maisspross innerhalb der Rohphosphatdüngung und

Vorfruchtvarianten waren fast identisch. Dies deutet daraufhin, dass die N-Versorgung nicht das Wachstum von Mais beeinflusste.

Tabelle 27: Einfluss von Vor- und Zwischenfrüchten sowie des P-Düngemittels auf den Maisertrag (Gefäßversuch 2003). Angaben in g TM/Gefäß. GD 5%: 5,8

	Weizen			Weiße Lupine			Ackerbohne		
	Br.	Sp.	R.	Br.	Sp.	R.	Br.	Sp.	R.
RP	71,9	70,4	54,3	69,5	73,0	67,2	76,3	75,3	65,5
CaHPO ₄	85,0	93,1	87,7	82,5	97,4	93,5	83,6	96,3	93,2

RP: Rohphosphat, Br.: Brache, Sp.: Spinat, R.: Raps

Tabelle 28: Einfluss von Vor- und Zwischenfrüchten sowie des P-Düngemittels auf die P-Konzentration im Maisspross (Gefäßversuch 2003). Angaben in mg P / g TM. GD 5%: 0,20

	Weizen			Weiße Lupine			Ackerbohne		
	Br.	Sp.	R.	Br.	Sp.	R.	Br.	Sp.	R.
RP	1,41	1,44	1,50	1,52	1,47	1,46	1,54	1,56	1,55
CaHPO ₄	2,28	1,96	1,90	2,31	1,93	2,00	2,28	2,00	1,92

RP: Rohphosphat, Br.: Brache, Sp.: Spinat, R.: Raps

Tabelle 29: Einfluss von Vor- und Zwischenfrüchten sowie des P-Düngemittels auf die P-Aufnahme (Spross) von Mais (Gefäßversuch 2003). Angaben in mg P / Gefäß. GD 5%: 13,9

	Weizen			Weiße Lupine			Ackerbohne		
	Br.	Sp.	R.	Br.	Sp.	R.	Br.	Sp.	R.
RP	101,0	101,1	81,4	105,2	107,2	97,9	117,3	117,3	99,4
CaHPO ₄	193,3	182,9	169,8	189,9	188,0	187,0	190,0	192,2	179,1

RP: Rohphosphat, Br.: Brache, Sp.: Spinat, R.: Raps

Tabelle 30: Einfluss von Vor- und Zwischenfrüchten sowie des P-Düngemittels auf die N-Konzentration im Maisspross (Gefäßversuch 2003). Angaben in mg N/g TM. GD 5%: 1,5

	Weizen			Weiße Lupine			Ackerbohne		
	Br.	Sp.	R.	Br.	Sp.	R.	Br.	Sp.	R.
RP	22,0	22,9	24,4	23,0	23,5	22,1	21,5	23,5	23,6
CaHPO ₄	21,8	21,1	18,2	22,1	17,1	17,6	22,2	20,7	17,7

RP: Rohphosphat, Br.: Brache, Sp.: Spinat, R.: Raps

3.1.2 Boden

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Bodenanalyse des Gefäßversuchs dargestellt.

3.1.2.1 Ergebnisse der CAL-Extraktion

Tabelle 31: CAL-extrahierbares Phosphat im Boden des Gefäßversuchs vor und nach dem Anbau der Hauptfrüchte (Gefäßversuchsstation, 2002)

Probennahme Vorfrucht Düngungs- variante	Vor HF-Anbau	Nach Ernte der HF (n = 12)		
	n = 4	Weizen [mg P/ kg Boden]	Weißblupine	Ackerbohne
Rohphosphat	79 b	60 a	56 a	54 a
CaHPO ₄	212 e	176 d	153 c	149 c

GD(5%) = 11,1

Tabelle 31 zeigt das CAL-extrahierbare Phosphat im Boden des Gefäßversuchs zu den verschiedenen Probenzeitpunkten¹. Hier zeigte sich, dass sich die Phosphatkonzentrationen im Boden der Rohphosphatvariante zwischen den verschiedenen Hauptfrüchten nicht signifikant unterschieden. Es waren aber im Vergleich zu der Konzentration des CAL-extrahierbaren Phosphats vor dem Versuch signifikante Unterschiede zu den Hauptfrüchten erkennbar.

Ebenso verhielt es sich bei der Düngungsvariante mit CaHPO₄; hier unterschieden sich die Konzentrationen des CAL-extrahierbaren Phosphats im Boden vor dem Versuch und nach der Ernte der Hauptfrüchte signifikant. Weiterhin konnte man in der Weizenvariante eine signifikant höhere Phosphatkonzentration im Boden beobachten.

Vergleicht man die Ergebnisse der Bodenanalyse im Gefäß nach dem Anbau der Hauptfrüchte und im Herbst 2002 (Tabelle 32) bezüglich des CAL-extrahierbaren Phosphats, so fällt auf, dass sich in der Rohphosphatvariante das

¹ Vor Versuchsbeginn wurden im Gefäßversuch Bodenproben unabhängig von der angebauten Hauptfrucht gezogen, sodass die Mittelwerte zwischen den Probezeitpunkten statistisch anders ausgewertet werden musste als die Mittelwerte der Hauptfrüchte nach der Ernte. Die angegebenen Grenzdifferenz bezieht sich auf die Daten mit n = 12.

Niveau der P-Konzentration kaum verändert hatte. In der CaHPO_4 -Variante dagegen gab es einen Rückgang um ca. 33 mg P/kg Boden bei den Leguminosen, bei Weizen sogar um ca. 40 mg P/kg Boden gegenüber der Beprobung unmittelbar nach dem Anbau der Hauptfrüchte zu beobachten. Innerhalb der Rohphosphatvariante verhalten sich die Ergebnisse sehr homogen, d.h. unter den verschiedenen Vorfrüchten konnten keine signifikanten Unterschiede beobachtet werden. In der CaHPO_4 -Variante zeigte der Boden der Variante Raps nach Ackerbohne das signifikant niedrigste CAL-extrahierbare Phosphat dieser Variante, während der Boden der Brache nach Weizen das signifikant höchste Ergebnis dieser Variante zeigte. Auch hier ist der Effekt des leichtlöslicheren CaHPO_4 zu erkennen, denn in der CaHPO_4 -Variante zeigte sich eine um Faktor 2,6 erhöhte P-Konzentration im Boden gegenüber der Rohphosphatvariante.

Tabelle 32: CAL-extrahierbares Phosphat in Abhängigkeit von Vorfrucht, P-Form und Zwischenfrucht (Gefäßversuchsstation, November 2002)

Zwischenfrucht	Düngungs- variante	Weizen	Weißblupine	Ackerbohne
		[mg P/ kg Boden]		
Spinat		49 a	47 a	45 a
Raps	Rohphosphat	49 a	46 a	43 a
Brache		52 a	46 a	46 a
Spinat		128 c	117 bc	117 bc
Raps	CaHPO_4	125 c	123 c	110 b
Brache		133 d	123 c	120 c
GD(5%) = 9,6		n = 4		

3.1.2.2 Ergebnisse der DL-Extraktion

Tabelle 33: DL-extrahierbares Phosphat im Boden des Gefäßversuchs vor und nach dem Anbau der Hauptfrüchte (Gefäßversuchsstation, 2002)

Probennahme Vorfrucht Düngungs- variante	Vor HF-Anbau	Nach Ernte der HF (n = 12)		
	n = 4	Weizen	Weißlupine	Ackerbohne
		[mg P/ kg Boden]		
Rohphosphat	143 a	135 ab	129 b	143 ab
CaHPO ₄	129 d	113 c	106 c	103 c

GD(5%) = 19,6

Tabelle 33 zeigt das DL-extrahierbare Phosphat im Boden des Gefäßversuchs zu den verschiedenen Probezeitpunkten². In dieser Tabelle zeigt sich, dass in der Düngungsvariante mit Rohphosphat die Weißlupine gegenüber den anderen Hauptfrüchten eine signifikant niedrigere Phosphatkonzentration im Boden aufwies. Auch sank die Phosphatkonzentration im Vergleich zu der Phosphatkonzentration vor Versuchsbeginn signifikant ab, was bei der Ackerbohne und dem Weizen nicht zu beobachten war.

In der Düngungsvariante mit CaHPO₄ waren zwischen den Hauptfrüchten keine signifikanten Unterschiede in der Konzentration des DL-extrahierbaren Phosphats zu beobachten. Gegenüber der Phosphatkonzentration vor Versuchsbeginn sank die Konzentration des DL-extrahierbaren Phosphats signifikant ab.

Vergleicht man die Ergebnisse der Bodenanalyse im Gefäß unmittelbar nach der Ernte der Hauptfrüchte (Tabelle 33) mit den Ergebnissen im Herbst 2002 (Tabelle 43) bezüglich des DL-extrahierbaren Phosphats, fällt auf, dass sich diese

² Vor Versuchsbeginn wurden im Gefäßversuch Bodenproben unabhängig von der angebauten Hauptfrucht gezogen, sodass die Mittelwerte zwischen den Probezeitpunkten statistisch anders ausgewertet werden musste als die Mittelwerte der Hauptfrüchte nach der Ernte. Die angegebenen Grenzdifferenz bezieht sich auf die Daten mit n = 12.

Phosphatfraktion in der Rohphosphatvariante im Herbst um im Mittel 96 mg P/kg Boden erhöhte, was etwa $\frac{2}{3}$ der Phosphatmenge unmittelbar nach Anbau der Hauptfrüchte entspricht.

Innerhalb der Rohphosphatvariante ergaben sich keine signifikanten Unterschiede. In der CaHPO₄-Variante zeigten sich ebenfalls Erhöhungen des DL-extrahierbaren Phosphats, allerdings sind diese je nach Vorfrucht stärker oder schwächer. Insgesamt unterschieden sich innerhalb dieser Variante nur die Brache nach Weizen und die Brache nach Weißlupine signifikant voneinander.

Tabelle 34: DL-extrahierbars Phosphat in Abhängigkeit von Vorfrucht, P-Form und Nachfrucht (Gefäßversuchsstation, November 2002)

Zwischenfrucht	Düngungs- variante	Weizen	Weißlupine	Ackerbohne
		[mg P/ kg Boden]		
Spinat	Rohphosphat	235 d	227 cd	230 cd
Raps		238 d	226 cd	231 cd
Brache		237 d	219 c	237 d
Spinat	CaHPO ₄	188 ab	181 ab	181 ab
Raps		189 ab	184 ab	173 a
Brache		206 c	189 b	184 ab

GD(5%) = 15,4

3.1.2.3 Ergebnisse aus der Elektro-Ultra-Filtration

Tabelle 35: Durch EUF extrahierbares Phosphat im Boden des Gefäßversuchs vor und nach dem Anbau der Hauptfrüchte (Gefäßversuchsstation, 2002)

Probennahme Vorfrucht Düngungs- variante	Vor HF-Anbau	Nach Ernte der HF (n = 12)		
	n = 4	Weizen	Weißblupine	Ackerbohne
		[mg P/ kg Boden]		
Rohphosphat	40 b	40 ab	33 a	32 a
CaHPO ₄	95 d	65 c	70 c	67 c

GD(5%) = 10,9

Tabelle 35 zeigt die Konzentration des durch EUF extrahierbaren Phosphats im Boden des Gefäßversuchs vor und nach dem Anbau der Hauptfrüchte³. Die Düngungsvariante mit Rohphosphat zeigte, dass die im Boden nach Anbau der Leguminosen eine signifikant niedrigere Konzentration an EUF extrahierbaren Phosphat zu finden war als vor deren Anbau. Bei der Hauptfrucht Weizen konnte dies nicht beobachtet werden. Es konnte allerdings kein signifikanter Unterschied bezüglich der Phosphatkonzentration im Boden zwischen den verschiedenen Hauptfruchtvarianten festgestellt werden. In der Düngungsvariante mit CaHPO₄ wurde durch den Anbau der Hauptfrüchte die Konzentration des EUF-Phosphats im Boden gegenüber der Konzentration desselben vor dem Anbau der Hauptfrüchte signifikant abgesenkt. Innerhalb der Hauptfrucht-Varianten nach deren Anbau bestanden diesbezüglich keine signifikanten Unterschiede.

3.1.2.4 Gesamt-N im Gefäßversuch nach Ernte der Hauptfrüchte

Tabelle 36 zeigt den Gesamt-N im Boden beider Zwischenfruchtvarianten des Gefäßversuchs im Herbst 2002. Es ist zu beobachten, dass die Phosphatkonzentrationen in beiden Düngungsvarianten bei Raps zwischen den Hauptfrüchten sich nicht signifikant unterschieden.

³ Vor Versuchsbeginn wurden im Gefäßversuch Bodenproben unabhängig von der angebauten Hauptfrucht gezogen, sodass die Mittelwerte zwischen den Probezeitpunkten statistisch anders ausgewertet werden musste als die Mittelwerte der Hauptfrüchte nach der Ernte. Die angegebenen Grenzdifferenz bezieht sich auf die Daten mit n = 12

In der Zwischenfrucht Spinat waren die Schwankungen der N-Konzentrationen im Boden zwischen den Hauptfrüchten höher. Die Werte des Gesamtstickstoffs im Boden der Leguminosen-Vorfrüchte waren gegenüber der Vorfrucht Weizen signifikant niedriger.

Tabelle 36: Gesamt-N im Boden des Gefäßversuchs abhängig von der Vorfrucht in den einzelnen Zwischenfruchtvarianten (Gefäßversuchsstation, November 2002)

Zwischenfrucht	Vorfrucht Düngungs- variante	Weizen	Weißlupine [mg N/kg Boden]	Ackerbohne
Raps GD(5%) = 63,9	Rohphosphat	348 a	295 a	320 a
	CaHPO ₄	337 b	266 a	285 a
Spinat GD(5%) = 75,9	Rohphosphat	373 a	294 b	318 ab
	CaHPO ₄	339 ab	267 b	301 b
n = 4				

3.2 Feldversuch

3.2.1 Erträge

Tabelle 37: Kornertrag im Feldversuch (Gladbacher Hof, 2002)

	Weizen	Weißlupine	Ackerbohne
Ertrag [dt TM/ha]	33,6 a	29,5 b	25,6 c

GD(5%) = 3,0 n = 12

Der Kornertrag des Sommerweizens war auffallend gering. Auffallend waren auch die schlechten Erträge der Leguminosen, die weit hinter ihrem eigentlichen Ertragspotenzial zurückblieben.

Tabelle 38: Strohertrag im Feldversuch (Gladbacher Hof, 2002)

	Weizen	Weißlupine	Ackerbohne
Ertrag [dt TM/ha]	39,8 a	48,4 b	32,7 c

GD(5%) = 3,7 n = 12

Die Stroherträge im Feldversuch waren wie der Kornertrag niedrig. Die Weißlupine erbrachte den höchsten Strohertrag, die Ackerbohne dagegen erbrachte analog zum Kornertrag den geringsten Strohertrag.

3.2.2 Nährstoffe

3.2.2.1 Konzentrationen

Phosphor

Tabelle 39: P-Konzentrationen im Korn der Hauptfrüchte im Feldversuch (Gladbacher Hof, 2002)

	Weizen	Weißlupine	Ackerbohne
P-Konzentration [mg P/ g TM]	3,66 a	4,22 b	6,41 c

GD(5%) = 0,24 n = 12

Die P-Konzentration war beim Sommerweizen am niedrigsten, die Weißlupine und die Ackerbohne wiesen signifikant höhere P-Konzentrationen auf. Diese Tendenz konnte auch in der P-Konzentration im Stroh der Hauptfrüchte beobachtet werden.

Tabelle 40: P-Konzentration im Stroh der Hauptfrüchte im Feldversuch (Gladbacher Hof, 2002)

	Weizen	Weißlupine	Ackerbohne
P-Konzentration [mg P/ g TM]	0,8 a	0,5 b	1,1 c
GD(5%) = 0,1	n = 12		

Die P-Konzentrationen im Stroh waren deutlich geringer als im Korn. Auffallend war die stark erhöhte P-Konzentration im Stroh der Ackerbohne.

Stickstoff

Tabelle 41: N-Konzentration im Stroh der Hauptfrüchte im Feldversuch (Gladbacher Hof, 2002)

	Weizen	Weißlupine	Ackerbohne
N-Konzentration [mg P/ g TM]	31,9 a	77,5 b	88,8 c
GD(5%) = 9,2	n = 12		

Die Tabelle 41 zeigt die N-Konzentrationen im Stroh der Hauptfrüchte. Bei den Leguminosen konnte man hohe N-Konzentrationen im Stroh beobachten, die N-Konzentration im Weizenstroh lag um mehr als die Hälfte darunter. Die N-Konzentration im Stroh der Ackerbohne hob sich ihrerseits signifikant vom Stroh der Weißlupine ab.

3.2.2.2 Entzüge

Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse zeigen die P-Entzüge der Hauptfrüchte, wobei in Entzug durch Kornertrag und Entzug durch Strohertrag unterschieden wird. Da das Stroh auf das Feld zurückgeführt wurde, kann man den P-Entzug des Strohs auch als P-Rückfuhr in den Boden durch Strohdüngung bezeichnen. Tabelle 42 zeigt den P-Entzug der Hauptfrüchte und gleichzeitig den P-Export aus dem System durch die Abfuhr der Körner vom Feld.

Tabelle 42: P-Entzüge durch das Korn der Hauptfrüchte im Feldversuch (Gladbacher Hof, 2002)

	Weizen	Weißlupine	Ackerbohne
P-Entzug [kg P/ ha]	12,3 a	12,4 a	16,4 b

GD(5%) = 1,4 n = 12

Es ist zu beobachten, dass sich der P-Entzug durch die Weizenkörner und die Körner der Weißlupine nicht signifikant unterschieden. Bei der Ackerbohne war ein hoher P-Export aus vom Feld aufgrund der hohen P-Konzentration im Korn zu beobachten.

Tabelle 43: P-Rückfuhr in das System durch Strohdüngung im Feldversuch (Gladbacher Hof, 2002)

	Weizen	Weißlupine	Ackerbohne
P-Zufuhr [kg P/ ha]	3,1 a	2,5 b	3,7 c

GD(5%) = 0,6 n = 12

Aufgrund der niedrigen P-Konzentration im Stroh erfolgte nur eine geringe P-Rückfuhr in den Boden. Bei der Ackerbohne konnte man eine erhöhte P-Rückfuhr beobachten, die Weißlupine zeigte die geringste P-Zufuhr.

Tabelle 44: P-Aufnahme der Hauptfrüchte im Feldversuch (Gladbacher Hof, 2002)

	Weizen	Weißlupine	Ackerbohne
P-Aufnahme [kg P/ ha]	15,4 a	14,9 a	21,1 b

GD(5%) = 1,6 n = 12

Die P-Aufnahme der Hauptfrüchte zeigt, dass die Ackerbohne die höchste P-Aufnahme erreichte. Zwischen Sommerweizen und Weißlupine waren keine signifikanten Unterschiede bezüglich der P-Aufnahme zu erkennen.

3.2.2.3 Zwischenfrüchte

Die folgenden Tabellen zeigen die Erträge bzw. die P-Konzentrationen der Zwischenfrüchte im Feldversuch. Die Erntemenge der Zwischenfrüchte war aufgrund des harten Winters und der damit verbundenen Auswinterung sehr

gering. Gegenüber der Vorfrucht Weizen konnte man eine leichte Steigerung des TM-Ertrages beim Spinat beobachten, wohingegen der Ertrag des Rapses bei den Leguminosen-Vorfrüchten etwas geringer ausfiel. Die Streuungsmaße, die in der Tabelle mit angegeben sind, zeigen jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Vorfrüchten auf.

Tabelle 45: Erträge der Zwischenfrüchte in Abhängigkeit von der Vorfrucht im Feldversuch (Glabacher Hof, Frühjahr 2003)

Hauptfrucht	Weizen	s	s _x	Weißblupine	s	s _x	Ackerbohne	s	s _x
Zwischenfrucht	[g TM/m ²]								
Spinat	13,5	6,5	3,2	16,9	5,2	2,6	24,3	10,6	5,3
Raps	41,9	3,4	1,7	39,1	10,4	5,2	36,0	8,8	4,4

Betrachtet man die P-Konzentrationen der Zwischenfrucht Spinat, so konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Vorfrüchten gezeigt werden. Dennoch konnte im Spinat nach der Weißblupine eine erhöhte P-Konzentration gegenüber der Vorfrucht Weizen beobachtet werden. Im Raps lagen die Werte der P-Konzentration zwischen Vorfrucht Weizen und Weißblupine sehr eng beieinander, die P-Konzentration war nach der Ackerbohne signifikant niedriger.

Tabelle 46: P-Konzentration der Zwischenfrüchte in Abhängigkeit von der Vorfrucht im Feldversuch (Glabacher Hof, 2003)

Hauptfrucht	Weizen	s	s _x	Weißblupine	s	s _x	Ackerbohne	s	s _x
Zwischenfrucht	[mg P/g TM]								
Spinat	4,14	0,06	0,03	4,39	0,33	0,17	4,12	0,21	0,11
Raps	4,39	0,20	0,10	4,48	0,11	0,05	4,11	0,15	0,08

3.2.2.4 Nachfrucht Mais

Foto 1 zeigt das recht gute Wachstum von Mais auf dem Versuchsgelände im Juni 2003.



Zwischenernte

In der nachfolgenden Tabelle 47 ist die P-Aufnahme von Mais in Abhängigkeit von der Haupt- und Zwischenfrucht dargestellt. Diese Zwischenernte erfolgte, um bereits im Juni 2003 einen Einfluss der Haupt- und Zwischenfrüchte auf die P-Aufnahme von Mais erfassen zu können. Im Vergleich zum Gefäßversuch war die P-Aufnahme von Mais im Juni nach Weißlupine niedriger als nach Weizen oder Ackerbohne. Allerdings sind die Unterschiede statistisch nicht signifikant. Demzufolge ist die Aussage berechtigt, dass unter den Feldversuchsbedingungen die Haupt- und Zwischenfrüchte keinen Einfluss auf die P-Aufnahme von Mais haben. Offensichtlich ist die P-Nachlieferung für Mais im Juni 2003 unter Feldversuchsbedingungen ausreichend gewesen.

Haupternte

Die Haupternte vom Silomais erfolgte im Jahr 2003 aufgrund der großen Sonnentrockeheit bereits am 22.8. Die Ergebnisse der Abschlussernte sind in den Tabellen 47 bis 50 gezeigt. In der Tendenz waren die Silomaiserträge nach den Körnerleguminosen höher als nach Sommerweizen und höher nach Brache im Vergleich zu den Zwischenfrüchten Spinat und Raps. Die von uns beobachteten Unterschiede waren statistisch nicht signifikant abzusichern.

Die P-Aufnahme von Mais wurde durch die zuvor angebauten Haupt- und Zwischenfrüchte nicht beeinflusst (Tabelle 49).

Die P-Konzentration im Silomaisspross in Abhängigkeit der Haupt- und Zwischenfrüchte ist in der Tabelle 50 dargestellt. Die Tabelle zeigt, dass die P-Konzentration von Mais nicht signifikant durch die zuvor angebauten Haupt- und Zwischenfrüchte unter den gegebenen Feldversuchsbedingungen beeinflusst wurde (Tabelle 50).

Tabelle 47: Einfluss von Haupt- und Zwischenfrüchten auf die P-Aufnahme von Mais. Feldversuch, Zwischenernte: Juni 2003. Angaben in mg P / m².

Hauptfrucht	Weizen	s	Weißlupine	s	Ackerbohne	s
Zwischenfrucht						
Brache	594	56	478	61	533	47
Spinat	536	86	480	75	530	60
Raps	591	107	481	50	510	76

Tabelle 48: Einfluss von Haupt- und Zwischenfrüchten auf den Silomaisertrag. Feldversuch, Abschlussernte 2003. Angaben in dt TM ha⁻¹. GD 5 %: 24,1.

Hauptfrucht	Weizen	Weißlupine	Ackerbohne
Zwischenfrucht			
Brache	123,3	130,8	138,1
Spinat	116,4	128,3	120,4
Raps	112,2	119,0	130,2

Tabelle 49: Einfluss von Haupt- und Zwischenfrüchten auf P-Aufnahme der oberirdischen Silomaissbiomasse. Feldversuch, Abschlussernte 2003. Angaben in Kg P ha⁻¹. GD 5 %: 4,6.

Hauptfrucht	Weizen	Weißlupine	Ackerbohne
Zwischenfrucht			
Brache	23,2	20,5	21,5
Spinat	20,3	22,4	19,3
Raps	21,0	21,3	21,6

**Tabelle 50: Einfluss von Haupt- und Zwischenfrüchten auf die P-Konzentration im Maisspross.
Feldversuch, Abschlussernte 2003. Angaben in mg P g⁻¹ TM. GD 5 %: 0,16.**

Hauptfrucht	Weizen	Weißlupine	Ackerbohne
Zwischenfrucht			
Brache	1,88	1,63	1,56
Spinat	1,74	1,76	1,60
Raps	1,88	1,72	1,66

3.2.3 Boden

3.2.3.1 CAL-extrahierbares Phosphat

Tabelle 51: Düngungseffekt des Rohphosphats und Effekte der Hauptfrüchte nach CAL-Analyse im Feldversuch (Gladbacher Hof, 2002)

Zeitpunkt der Probennahme	Weizen	Weißblupine	Ackerbohne
	[mg P/kg Boden]		
Vor Düngung	49 a	42 a	40 a
Nach Düngung	62 b	54 b	52 b
Nach Ernte	38 a	40 a	37 a

GD(5%) = 11,6 n = 12

Tabelle 51 zeigt das CAL-extrahierbare Phosphat im Feldversuch. Zu allen drei Probezeitpunkten gab es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Hauptfrüchten bzgl. des CAL-extrahierbaren Phosphats im Boden. Es ist zu beobachten, dass durch die Applikation des Rohphosphats eine Erhöhung des CAL-extrahierbaren Phosphats im Boden und durch den Anbau der Hauptfrüchte eine Absenkung desselben auf das Niveau vor der Applikation des Rohphosphats erreicht wurde.

3.2.3.2 DL-extrahierbares Phosphat

Tabelle 52: Düngungseffekt des Rohphosphats und Effekte der Hauptfrüchte nach DL-Analyse im Feldversuch (Gladbacher Hof, 2002)

Zeitpunkt der Probennahme	Weizen	Weißblupine	Ackerbohne
	[mg P/kg Boden]		
Vor Düngung	91 a	93 a	98 a
Nach Düngung	193 c	146 b	138 b
Nach Ernte	103 a	103 a	103 a

GD(5%) = 33,2 n = 12

Tabelle 52 zeigt das DL-extrahierbare Phosphat im Feldversuch. Vor der Applikation und nach der Ernte der Hauptfrüchte traten keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Konzentration des DL-extrahierbaren Phosphats im Boden auf. Die Applikation des Rohphosphats bewirkte eine Erhöhung des DL-extrahierbaren Phosphats. Der Anbau der Hauptfrüchte führte zu einer Absenkung desselben auf das Niveau vor der Applikation des Rohphosphats.

3.2.3.3 EUF-Analyse

Tabelle 53 zeigt die Ergebnisse der EUF-Analyse bezüglich der Phosphatkonzentration im Boden des Feldversuchs.

Tabelle 53: EUF-extrahierbares Phosphat zu den drei verschiedenen Probezeitpunkten (Gladbacher Hof, 2002)

Zeitpunkt der Probennahme	Weizen	Weißblupine	Ackerbohne
	[mg P/kg Boden]		
Vor Düngung	21 a	22 a	23 a
Nach Düngung	32 b	40 c	33 b
Nach Ernte	22 a	22 a	23 a
GD(5%) = 6,3 n = 12			

Durch die Applikation von Rohphosphat wurde eine Erhöhung des EUF-extrahierbaren Phosphats erreicht (Tabelle 53). Nach dem Anbau der Hauptfrüchte sank das EUF-extrahierbare Phosphat wieder auf das Niveau wie vor der Applikation des Rohphosphats. Es fällt auf, dass nach der Applikation des Rohphosphats das durch die EUF extrahierbare Phosphat in der Variante Weißblupine signifikant höher war als bei den anderen Hauptfrüchten.

3.2.3.4 N_{\min}

Tabelle 54 zeigt die N_{\min} -Konzentration im Boden des Feldversuchs nach der Ernte der Hauptfrüchte im Herbst 2002.

Tabelle 54: N_{\min} im Boden des Feldversuchs nach der Ernte der Hauptfrüchte in verschiedenen Bodentiefen (Gladbacher Hof, Herbst 2002)

Probtiefe [m]	Weizen	Weißlupine	Ackerbohne
	[mg N/ kg Boden]		
0 – 0,3	11 a	11 a	12 a
0,3 – 0,6	10 a	11 a	15 c
0,6 – 0,9	3 b	4 b	6 b
Summe 0 - 0,9	24 d	26 d	33 e
GD(5%) = 3,7		n = 4	

Es konnten im Oberboden keine signifikanten Unterschiede bezüglich des N_{\min} zwischen den Varianten nachgewiesen werden. Nach Aufsummierung der N_{\min} -Konzentrationen der einzelnen Probtiefen konnte man im Vergleich zum Weizen eine höhere N_{\min} -Konzentration bei der Ackerbohne beobachten. Im Boden der Variante mit Weißlupine konnte zwar eine Erhöhung der N_{\min} -Konzentration beobachtet werden, diese war aber nicht signifikant von der Weizenvariante zu unterscheiden. Dieser Befund deutet daraufhin, dass die N-Versorgung der Zwischenfrüchte nach den Hauptfrüchten fast gleich sein dürfte.

3.2.3.5 pH-Wert

Um den Einfluss der Wurzeln der Hauptfrüchte auf den pH-Wert des Gesamtbodens zu dokumentieren, wurde in den Bodenproben vom Herbst 2002 der pH-Wert ermittelt.

Tabelle 55: pH-Wert im A_p-Horizont des Feldversuchs in Abhängigkeit von der Hauptfrucht (Glabacher Hof, November 2002)

	Weizen	Weißlupine	Ackerbohne
pH-Wert	6,8 a	6,9 a	6,7 a

GD(5%) = 0,25 n = 4

Es zeigt sich, dass durch den Anbau verschiedener Hauptfrüchte kein signifikanter Unterschied im Boden-pH beobachtet werden konnte (Tabelle 55).

4 Diskussion

Das vorliegende Projekt sollte Aufschluss darüber geben, ob durch den Anbau verschiedener P-mobilisierender Pflanzen weicherdiges Rohphosphat für weniger P-aneignungseffiziente Pflanzen biologisch aufgeschlossen werden kann. Die Frage ist für den ökologischen Landbau von besonderer Bedeutung, da auf zahlreichen Flächen die P-Verfügbarkeit gering ist (Schulte und Schröder, 1993) und keine leichtlöslichen P-Düngemittel zugelassen sind. Untersuchungen von Horst und Waschkies (1986) haben gezeigt, dass Weizen in Mischkultur mit Weißlupine durch deren Proteoidwurzeln eine erhöhte Phosphataufnahme aufweist. Dabei profitierte der Weizen von der Mobilisierung des Phosphats durch die Exsudation organischer Säuren in der Rhizosphäre der Weißlupine, da die Wurzelräume beider Pflanzenarten nicht voneinander getrennt waren. Beim Weizen verdoppelte sich die Sprosstrockenmassebildung gegenüber der Vergleichsvariante, in welcher die Wurzelräume durch Stahlnetzzyylinder getrennt waren. Signifikant erhöhte P-Konzentrationen im Weizenspross bei signifikant erhöhter Sprosstrockenmassebildung sind ein Hinweis auf die verbesserte P-Versorgung des Weizens in Mischkultur mit Weißlupine. Diese Erkenntnisse sollen zunächst auf Gefäßversuchsebene in abgewandelter Form zur biologischen P-Mobilisierung genutzt werden. Im Unterschied zur oben angeführten Arbeit sollen P-aneignungsineffiziente Pflanzen nach P-aneignungseffizienten Pflanzen angebaut werden, so dass eine Konservierung des Mobilisierungseffektes erreicht werden muss.

4.1 Gefäßversuch

4.1.1 Phosphataufnahme des Spinats

Der P-aneignungsineffiziente Spinat weist mit seinem erhöhten Ertrag nach der Weißlupine (siehe Tabelle 22) auf eine erfolgreiche Konservierung des Mobilisierungseffektes durch die Vorfrucht Weißlupine hin. Hier zeigt sich, dass nach der Vorfrucht Weißlupine der Sprossertrag des P-ineffizienten Spinats um

ca. 60% höher ist als nach der Vorfrucht Weizen. Vergleicht man die Düngungsvarianten untereinander, sieht man, dass die Erträge des Spinats in der Düngungsvariante mit CaHPO_4 deutlich erhöht sind. Dieser Effekt geht auf die bessere Löslichkeit dieses Düngemittels zurück. Aber auch hier ist eine Ertragssteigerung des Spinats um 43% durch den Anbau der Weißlupine zu beobachten.

Die Beobachtungen lassen eine höhere Verfügbarkeit des gedüngten Rohphosphates nach der Vorfrucht Weißlupine erkennen. Hocking und Randall (2001) erzielten mit einem ähnlichen Gefäßversuch mit Weißlupine als Vorfrucht vor P-ineffizientem Weizen ein analoges Ergebnis. Der festgestellte Ertragszuwachs des Weizens nach der Weißlupine betrug dort 70% der Trockenmasse und bestätigt das in der vorliegenden Arbeit erzielte Ergebnis.

In diesem Zusammenhang ist es aber auch von Interesse, ob der Spinat eine höhere Phosphataufnahme aufweist oder ob der Ertragszuwachs womöglich durch einen N-Effekt zustande kommt. Um dies schon im Vorfeld zu verhindern, ist die Vorfrucht Weizen und die Nachfrüchte mit N gedüngt worden (Tabelle 6) und ein Ausgleich des durch das Stroh zurückgeführten N vorgenommen worden (Tabelle 8). Ebenso kann nach Tabelle 36 ein N-Effekt ausgeschlossen werden, da die N-Konzentration im Boden der Leguminosen-Vorfrüchte nicht signifikant höher als die N-Konzentration im Boden der Vorfrucht Weizen ist. Weiterhin wird in Tabelle 24 deutlich, dass die N-Konzentration im Spross des Spinats gerade nach der Weißlupine am niedrigsten ist. Für einen Phosphateffekt spricht auch, dass der Spinat sowohl in der Rohphosphatvariante als auch in der CaHPO_4 -Variante nach Weißlupine signifikant mehr P aufgenommen hat als nach der Vorfrucht Weizen (siehe Tabelle 25). Aus dieser Tabelle geht ebenso hervor, dass eine P-Limitierung für den Spinat in der Rohphosphatvariante vorliegt, die durch den Anbau der P-effizienten Weißlupine aufgehoben worden ist. Die Steigerung der P-Aufnahme des Spinats und die zusätzliche Erhöhung der Sprosstrockenmasse durch die Düngung des CaHPO_4 ist ein weiterer Beweis dafür, dass P in der Rohphosphatvariante limitierend wirkt. Die Phosphatkonzentration im Spinatspross (Tabelle 23) nach der Weißlupine ist

dagegen nicht signifikant höher als im Spinatspross nach Weizen. Hierbei handelt es sich vermutlich um einen Verdünnungseffekt, der durch den höheren Ertrag des Spinats nach der Weißblupine hervorgerufen wird. Dafür spricht auch das Ergebnis der Erträge des Spinatsprosses nach der Ackerbohne: Hier wird aus Tabelle 23 deutlich, dass die P-Konzentration im Spinatspross erheblich gegenüber Spinat nach Weizen und Weißblupine erhöht ist. Diese hohe P-Konzentration ist vermutlich auf den geringeren Ertrag des Spinats nach der Ackerbohne zurückzuführen (Tabelle 22). Die Ackerbohne bewirkt vermutlich eine Wuchshemmung des Spinats (Abbildung 9), was einen Konzentrationseffekt des Phosphats im Spross verursacht. Der P-Entzug ist dabei nicht signifikant verschieden von Spinat nach Weizen (Tabelle 25). Paffrath et al. (2002) beobachteten bei N-Düngungsversuchen im Feldversuch ähnliche Ertragseinbußen bei Spinat, wenn Ackerbohnschrot oder Erbsenschrot als organischer N-Dünger verwendet wurde. Weitere Erkenntnisse dazu sind nicht erarbeitet worden, da die Zielsetzung der Arbeit von Paffrath et al. (2002) in eine andere Richtung ging.

4.1.2 Phosphataufnahme des Rapses

Im Vergleich zum Spinat zeigt der nachgebaute Raps in der Rohphosphatvariante eine Ertragsminderung von 10% nach der Vorfrucht Weißblupine gegenüber der Vorfrucht Weizen und Ackerbohne (siehe 22). Diese Ertragsminderung ist aber nur als signifikant zu bezeichnen, wenn die Zwischenfrüchte getrennt voneinander statistisch ausgewertet werden (siehe Anhang, Tabelle 56 und Tabelle 57). Dies verwundert zunächst, da Hoffland (1992) gezeigt hat, dass Raps bei P-Mangel erhebliche Mengen Malat an Wurzelspitze und Wurzelbasis exsudieren kann, welches Ca^{2+} chelatisiert bzw. apatitisches Phosphat mobilisiert. Allerdings kann genau dieser Aspekt eine Erklärung für die verminderte Sprossmassebildung des Rapses nach der Weißblupine liefern: Nach Johnson et al. (1996) exsudiert die Weißblupine zwischen 8 und 141 pmol Malat g^{-1} Wurzel-FM s^{-1} und zwischen 6 und 158 pmol Citrat g^{-1} Wurzel-FM s^{-1} . Raps exsudiert im Vergleich dazu nur 10 bis 59 pmol Malat g^{-1} Wurzel-FM s^{-1} und 4

bis 18 pmol Citrat g^{-1} Wurzel-FM s^{-1} . Beide Kulturen nehmen daher ähnliche Phosphatressourcen in der Rhizosphäre in Anspruch. Zusätzlich ist der Raps der Weißlupine in der Exsudationsleistung bzgl. organischer Säuren gegenüber der Weißlupine im Nachteil. Die verminderte Sprossmassebildung des Rapses nach der Weißlupine könnte weiterhin darauf zurückzuführen sein, dass der Raps insgesamt einen signifikant höheren Sprossertrag aufweist als der Spinat (Tabelle 22). Damit geht ein höherer Phosphatbedarf einher, was sich am Ergebnis des P-Entzuges des Rapses in der Düngungsvariante mit CaHPO_4 zeigt (Tabelle 25): Das leichtverfügbare Phosphat aus dem CaHPO_4 ist nicht limitierend für das Wachstum des Rapses, sodass der P-Entzug in dieser Variante nach allen Vorfrüchten gleich hoch und insgesamt signifikant höher als in der Rohphosphatvariante ist.

Durch das bessere P-Aneignungsvermögen der Weißlupine konnte diese dem Boden der Rohphosphatvariante mehr P durch das Stroh entziehen (Tabelle 19) als der Weizen. Es liegt also weniger Phosphat in apatitischer Form vor als nach Weizen, was sich durch die DL-Analyse des Bodens nach Anbau der Hauptfrüchte zeigen lässt (Tabelle 33): Hier zeigt sich eine signifikant stärkere Absenkung des DL-extrahierbaren Phosphats nach dem Anbau der Weißlupine gegenüber vor dem Anbau. Allerdings zeigen sich zwischen den Hauptfrüchten keine signifikanten Unterschiede im DL-extrahierbaren Phosphat. Die höhere P-Konzentration im Stroh der Weißlupine führt durch die Strohdüngung zu einer erhöhten P-Zufuhr in den Boden, allerdings ist das Phosphat dann organisch gebunden und muss zuerst mineralisiert werden, steht damit der direkten Nachfrucht nicht zur Verfügung. Vermutlich steht dem P-effizienten Raps nach Weizen mehr apatitisches Phosphat zur Verfügung, welches vom Weizen ungenutzt bleibt, als nach der Weißlupine. Dies könnte nach der Weißlupine bei einem höheren P-Bedarf des Rapses im Vergleich zum Spinat limitierend für die Ertragsbildung wirken. Der Spinat dagegen kann vermutlich bei einem niedrigeren Ertragspotenzial als Raps mit der durch die Vorfrucht Weißlupine erhöhten Menge mobilisierten Phosphats mehr Sprossmasse bilden als nach der P-ineffizienten Vorfrucht Weizen. Vergleicht man nun den Phosphatbedarf von

Raps, der nach Makowski (2000) 56 - 78 mg P/kg Boden benötigt, bevor Düngungsmaßnahmen erforderlich werden mit dem Wert des CAL-extrahierbaren Phosphats in der Rohphosphatvariante (Tabelle 31), so ist dieser Wert unterschritten. Dieses Ergebnis unterstützt die Ausführungen von oben.

4.1.3 Phosphataufnahme der Hauptfrüchte

Die bessere P-Aneignung der Weißlupine wie sie von Hinsinger (2001) beschrieben wird, kann in der vorliegenden Arbeit anhand ihrer P-Aufnahme im Gefäßversuch gezeigt werden (Tabelle 20). Hier ist die P-Aufnahme in der CaHPO_4 -Variante bei Weißlupine signifikant höher als beim Weizen. Für die Weißlupine lässt sich dies in der Rohphosphatvariante nur bedingt zeigen, da die Erhöhung der P-Aufnahme gegenüber dem Weizen nicht signifikant ist. Weiterhin zeigt die Ackerbohne sogar eine signifikant niedrigere P-Aufnahme als Weizen und Weißlupine. Dies ergibt sich aus:

- Den unterschiedlich hohen Erträgen der Hauptfrüchte
- Der unterschiedlichen Translozierung des aufgenommenen Phosphats vom Stroh ins Korn

In der Rohphosphatvariante zeigt sich bei den Leguminosen ein ca. 40% niedrigerer Kornertrag als beim Weizen (Tabelle 12). Die Verwendung des leichtlöslichen CaHPO_4 hat auf den Ertrag der Hauptfrüchte unterschiedliche Auswirkungen: Der Weizen und die Ackerbohne zeigen keine Ertragserhöhung, weder im Kornertrag, noch im Strohertrag (Tabelle 13). Die Weißlupine jedoch zeigt eine Einbuße beim Kornertrag von fast 17%, der Strohertrag jedoch bleibt gleich. Da CaHPO_4 handelsüblich mit 25% Konverterkalk angereichert wird, kann dieser sehr reaktive Kalk Auswirkungen auf das Wachstum der Weißlupine haben. Peiter et al. (2000) berichten, dass die Weißlupine auf eine erhöhte Kalkung (10% der Bodenmasse im Gefäßversuch) mit reduziertem Wachstum reagierte. Dabei wurden Sprosslänge, Anzahl der Blätter und Trockenmasseproduktion von Blauer Lupine (*Lupinus angustifolius* L.), Gelber Lupine (*Lupinus luteus* L.) und Weißlupine (*Lupinus albus* L.) im Vergleich zur

Erbse (*Pisum sativum* L.) erfasst. Dabei zeigte die Weißlupine zwar die geringste Wachstumsdepression der drei Lupinenarten, dennoch kann man die Weißlupine als calcifug im Vergleich zur Erbse bezeichnen.

Die P-Konzentrationen der Hauptfrüchte im Korn und Stroh zeigen anschaulich, dass der Weizen signifikant weniger P im Stroh zurücklässt als die Leguminosen (Tabelle 15). Die unterschiedliche Verlagerungsleistung der Hauptfrüchte kann teilweise auf die unterschiedliche Kornbildung zurückgeführt werden, was beim Vergleich der Düngungsvarianten bei der Weißlupine sehr deutlich wird: Durch die oben beschriebene Kornertragsminderung der Weißlupine steigt die P-Konzentration im Korn sowie im Stroh extrem an (Tabelle 12 und Tabelle 13). Aufgrund der verringerten Kornertragsleistung der Weißlupine ist die P-Translozierung in das Korn limitiert und bleibt damit im Stroh zurück. Dieser Erklärungsansatz kann auch auf die Ackerbohne angewendet werden: Die Düngung von Rohphosphat und leichtlöslichem CaHPO_4 hat keine unterschiedlichen Auswirkungen auf den Korn- und Strohertrag (Tabelle 12 und Tabelle 13). Dagegen erhöht sich im Korn die P-Konzentration während sie im Stroh durch die Düngung des CaHPO_4 abfällt (Tabelle 14 und Tabelle 15). Dies ist der Hinweis darauf, dass eine Translozierung des aufgenommenen Phosphats ins Korn stattfindet, sofern eine verminderte Kornbildung dies nicht limitiert. Im Vergleich ist beim Weizen keine Kornertragserrhöhung durch die Applikation des leichtlöslichen CaHPO_4 erfolgt (Tabelle 12 und Tabelle 13), so dass davon ausgegangen werden kann, dass die erhöhte P-Konzentration in Korn und Stroh (Tabelle 14 und Tabelle 15) der CaHPO_4 -Variante auf eine verbesserte P-Aufnahme des Weizens in dieser Düngungsvariante zurückzuführen ist.

4.1.4 Effekte der Hauptfrüchte auf den Boden

Um die besseren Erträge des P-ineffizienten Spinats nach der Weißlupine in der Rohphosphatvariante erklären zu können, sollten die durchgeführten Bodenanalysen Aufschluss über den Effekt der Hauptfrucht auf das Phosphat im Boden geben. Die CAL-Extraktion der Bodenproben erfasst einen Teil des pflanzenverfügbar gebundenen Phosphats im Boden. Hier ist im Gefäßversuch

nach den Hauptfrüchten nur eine generelle Erniedrigung des CAL-Phosphats gegenüber vor dem Anbau der Hauptfrüchte festzustellen. Auch die DL-Extraktion der Proben aus der Rohphosphatvariante zeigt zwischen den Hauptfrüchten keinerlei signifikante Unterschiede, sodass davon ausgegangen werden kann, dass andere Phosphatfraktionen im Boden eine bessere Verfügbarkeit aufweisen, die aber nicht mit den angewendeten Methoden nachgewiesen werden können. In diesem Zusammenhang ist erwähnenswert, dass das verwendete weicherde Rohphosphat zwar nachweislich schwerer löslich ist als CaHPO_4 (Tabelle 31), aber dennoch 18,9% Ameisensäurelösliches Phosphat enthält. In Verbindung mit dem verwendeten Substrat mit ca. 35 mg CAL-löslichen P/kg Boden kann dies vom P-ineffizienten Weizen zur ausreichenden Ertragsbildung genutzt werden (Tabelle 12). Weiterhin ist auffallend, dass die DL-Extraktion der Bodenproben aus der CaHPO_4 -Variante niedriger ausfallen als in der Rohphosphatvariante. Auch hier kann zur Erklärung der in dieser Düngungsvariante eingemischte reaktive Konverterkalk als Erklärung herangezogen werden. Die sauer reagierende DL-Extraktionslösung trifft in dieser Düngungsvariante mit einer großen Menge an Ca^{2+} -Ionen zusammen, die die Protonen des Extraktionsmittels neutralisieren und somit weniger Phosphat in Lösung gebracht werden kann. Damit sind die Ergebnisse der DL-Analysen in der CaHPO_4 -Variante nicht sehr aussagekräftig und unter Vorbehalt zu betrachten. Die durch die Elektro-Ultra-Filtration ermittelten Ergebnisse zeigen ebenso zwischen den Hauptfrüchten keine signifikanten Unterschiede, die auf eine bessere Verfügbarkeit des Phosphats im Boden hinweist. Lediglich der unterschiedliche Düngungseffekt von Rohphosphat und CaHPO_4 wird hier dokumentiert.

4.1.5 Wirkung der Strohdüngung

Die schon einmal angesprochene Strohdüngung im Gefäßversuch soll nun etwas genauer bezüglich der Düngewirkung betrachtet werden. Durch die Zugabe von 40 g Stroh/Gefäß ergibt sich eine P-Zufuhr in den Boden, wie Tabelle 21 dokumentiert. Diese Phosphatzugabe ist jetzt allein von der P-Konzentration im Stroh der Hauptfrüchte abhängig, womit durch das Leguminosenstroh in beiden Düngungsvarianten signifikant mehr Phosphat gedüngt wird als mit dem Weizenstroh. Dabei muss aber beachtet werden, dass die Strohdüngung im Gefäß realitätsfern ist, da eine Zugabe von 40 g Stroh auf 5,9 kg Boden bei einer Lagerungsdichte von ca. 1,4 g/cm³ etwa 280 dt Stroh/ha entspricht! Diese große Masse Stroh, die in den Boden zurückgeführt wird, entspricht einer Spanne in der P-Rückfuhr von 8,4 kg P/ha bei Weizen in der Rohphosphatvariante bis 53,2 kg P/ha bei der Weißlupine in der CaHPO₄-Variante. Zieht man hierzu die Bodenanalyse heran, die während der Vegetation der Zwischenfrüchte durchgeführt wurde, so zeigt sich in der Rohphosphatvariante beim DL-extrahierbaren Phosphat (Tabelle 30) eine Steigerung um 95,5 mg P/kg Boden gegenüber der Werte im Sommer, während das CAL-extrahierbare Phosphat (Tabelle 32) in der gleichen Düngungsvariante konstant bleibt. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass durch die intensive Bodendurchmischung nach der Ernte der Hauptfrüchte und Mineralisierung von Vorfruchtresten Phosphat freigesetzt wurde und DL-löslich gebunden wird. Da die Menge des durch die Strohdüngung zugeführten Phosphats wie oben beschrieben viel geringer ausfällt, muss diese Erhöhung zusätzlich aus Wurzelrückständen resultieren. Diese ist aber von den Vorfrüchten unabhängig, da anhand Tabelle 34 keine Differenzierung bezüglich DL-löslichem Phosphat zwischen den Vorfrüchten möglich ist. Die Erhöhung des DL-löslichen Phosphats im Boden kann eine Erhöhung des austauschbar gebundenen Phosphats bedeuten, die der Spinat durch die Aufnahme des in der Bodenlösung vorliegenden Phosphats und der damit verbundenen Nachlieferung dieses Phosphats nutzen könnte. Vermutlich ist die Nachlieferung von DL-löslichem Phosphat aus der stabilen Phase nach der

Weißlupine verbessert, da der P-ineffiziente Spinat eine höhere P-Aufnahme nach der Weißlupine aufweist (Tabelle 25). Dies steht im Gegensatz zu den Ergebnissen von Dessougi et al. (2003), welche eine Erniedrigung der P-Aufnahme in den Maisspross nach der Weißlupine gegenüber der Kontrolle ohne Ernterückstände der Weißlupine festgestellt haben. Allerdings konnten diese Autoren eine Erhöhung des P-Influges nach Einarbeitung von Rapsernterückständen beobachten und auch dabei weder eine Erhöhung des CAL-extrahierbaren Phosphats im Boden noch eine Erhöhung der P-Konzentration in der Bodenlösung nachweisen. Weitere Arbeiten wie die bereits zitierte von Hocking und Randall (2001) zeigen jedoch positive Vorfruchteffekte der Weißlupine auf das Wachstum und die P-Versorgung der P-ineffizienten Nachfrucht. Hierbei wurden nur die Wurzeln als Vorfruchtreste im Boden belassen und nach der Hauptfrucht Weißlupine eine signifikante Erhöhung des verfügbaren Phosphats im Boden gegenüber der Vorfrucht Weizen ermittelt. Diese Erhöhung wurde mittels der Methode von Larsen (1952) mit Hilfe von ^{32}P markiertem Orthophosphat nachgewiesen, so dass davon ausgegangen werden kann, dass die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Extraktionsmethoden für den Nachweis der Effekte der Wurzelexsudate nicht geeignet sind.

In Tabelle wird eine Absenkung des CAL-extrahierbaren Phosphats im Herbst 2002 um im Schnitt 33 mg P/kg Boden bei den Leguminosen und 40 mg P/kg Boden beim Weizen gegenüber der Probennahme nach der Ernte der Hauptfrüchte in der Düngungsvariante des leichtlöslichen CaHPO_4 beobachtet. Dieses Phänomen könnte auf eine P-Alterung hinweisen. Renno und Steffens (1985) haben gezeigt, dass insbesondere leichtlösliche Phosphatdünger, wie Nitrophos einer gewissen Phosphatalterung, also dem Übergang aus einer instabilen (löslichen) Form in eine stabile Form, unterliegt (Abbildung 13).

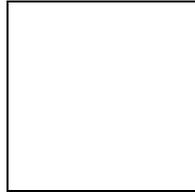


Abbildung 13: Schematische Darstellung der drei wichtigsten Phosphatfraktionen im Boden für die Pflanzenernährung (aus: Mengel & Kirkby, 2001)

Im Unterschied zu der vorliegenden Arbeit wurde bei Renno und Steffens (1985) der Boden in einem Gefäßversuch vier Monate vor der Aussaat mit unterschiedlichen P-Formen (Thomas-P, Nitrophosphat und Hyperphos) gedüngt. Zum Vergleich wurde eine zweite Variante mit den gleichen P-Formen direkt zur Saat gedüngt. Es ergab sich, dass die Varianten, die vier Monate vor der Aussaat gedüngt wurden, eine unabhängig von der P-Form geringere P-Konzentration im Boden aufwiesen, als jene Variante, die direkt zur Aussaat gedüngt wurde. Diese Ergebnisse haben weiterhin gezeigt, dass leichtlösliche Phosphatdünger vor allem auf sauren Mineralböden leicht durch Fe/Al-Oxide adsorbiert werden können und somit eine P-Alterung stattfindet. Dabei findet ein Ligandenaustausch zwischen den OH-Gruppen der Fe- und Al-Atomen und den H_2PO_4^- -Ionen statt, die zunächst eine lockere mononukleare Bindung eingehen. Diese kann aber leicht in eine binukleare feste Bindung übergehen, wodurch das Phosphat-Ion nicht mehr verfügbar ist (Mengel and Kirkby, 2001). Allerdings bleibt dieser Aspekt ungeklärt, da ein direkter Nachweis der P-Alterung in der vorliegenden Arbeit nicht geführt wurde, denn allein die Messung des pH-Wertes, sagt nichts über den tatsächlichen Effekt der exsudierten organischen Säuren auf die Rhizosphäre aus.

4.2 Feldversuch

4.2.1 Phosphataufnahme der Zwischenfrüchte Raps und Spinat

Um die im Gefäßversuch unter kontrollierten Bedingungen erzielten Ergebnisse unter praxisähnlichen Bedingungen zu überprüfen, wird wie unter Abschnitt 2.1 beschrieben, ein zum Gefäßversuch kongruenter Feldversuch angelegt. Die daraus hervorgegangenen Ergebnisse der Zwischenfruchternte im Frühjahr 2003 sind in Tabelle 45 und Tabelle 46 aufgeführt. Wie dort schon erwähnt, muss man diese Ergebnisse unter Vorbehalt betrachten, da vor allem der Spinat, aber auch der Raps aufgrund des harten Winter 2002/2003 stark ausgewintert war. Dennoch kann man beim Spinat einen erhöhten Ertrag bei den Leguminosen-Vorfrüchten beobachten. In Verbindung mit der erhöhten P-Konzentration im Spinatspross nach der Weißlupine könnte man von einem positiven Vorfruchteffekt ausgehen, der nicht auf die N-Fixierungsleistung der Leguminosen zurückzuführen ist. Letzteres ist auszuschließen, da der Raps sowohl nach dem P-ineffizienten Weizen, als auch nach der Weißlupine gleiche P-Konzentrationen im Spross und auch gleiche TM-Erträge aufweist. Weiterhin kann mit den Bodenanalysen im Herbst auf den Bracheflächen des Feldversuches bei der Untersuchung auf N_{\min} (Tabelle 54) nachgewiesen werden, dass diesbezüglich unter den verschiedenen Vorfrüchten keine signifikanten Unterschiede aufgetreten sind. Damit kann davon ausgegangen werden, dass der erhöhte Sprossmasseertrag der Zwischenfrucht Spinat nach der Weißlupine und die erhöhte P-Konzentration im Spross des Spinats auf die Vorfrucht Weißlupine zurückzuführen ist. Dennoch soll noch einmal darauf hingewiesen werden, dass diese Ergebnisse nicht voll statistisch abzusichern sind, aber mit Blick auf die erzielten Ergebnisse des Gefäßversuchs haben die oben angeführten Erläuterungen eine solide Grundlage.

Des Weiteren zeigt sich auch im Feldversuch, dass der Raps analog zur Rohphosphat-Variante im Gefäßversuch keine signifikanten Unterschiede in der Sprossmassebildung und der P-Konzentration im Spross in Abhängigkeit von der

Vorfrucht aufweist. Die im Gefäßversuch festgestellten Ertragseinbußen und die geringeren P-Konzentrationen im Rapsspross haben sich im Feldversuch nicht gezeigt (Tabelle 45 und Tabelle 46). Im Gegensatz zum Gefäßversuch ist im Feldversuch das den Pflanzen zur Verfügung stehende Bodenvolumen nicht begrenzt, wodurch es nicht zu einem P-Mangel aufgrund eines zu geringen Bodenvolumens kommen kann. Außerdem kommt hinzu, dass die Pflanzendichte aufgrund der niedrigen Temperaturen im Winter sehr gering geworden ist und damit keine Nährstoffkonkurrenz unter den Rapspflanzen herrschen kann.

4.2.2 Phosphataufnahme der Hauptfrüchte

Um die Vorfruchtwirkung der Hauptfrüchte Sommerweizen, Weißlupine und Ackerbohne auf die Nachfrüchte Raps und Spinat sinnvoll zu beurteilen, werden zunächst die Erträge der Hauptfrüchte betrachtet. Hierbei fällt auf, dass der Weizen einen relativ geringen Kornertrag erzielt (Tabelle 37), was mit der fehlenden Stickstoffdüngung im ökologischen Anbau zu erklären ist. Allerdings weisen auch die Leguminosen einen schwachen Kornertrag auf, der mit einem schwachen Befall durch Anthraknose (Erreger: *Colletotrichum sp.*) bei der Weißlupine begründet werden kann und mit Schokoladenfleckenkrankheit (*Botrytis fabae*) bei der Ackerbohne. Die Weißlupine hat ein Ertragspotenzial von bis zu 40 dt/ha, das hier weit unterschritten wird (INARO, 1997).

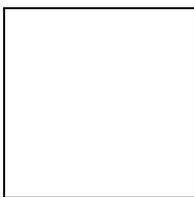


Abbildung 14: Typische Welke an Fiederblättern der Weißlupine bei Anthraknose-Befall

Die Ackerbohne, die je nach Bodenart und -fruchtbarkeit ein Ertragspotential bis zu 50 dt/ha hat (Makowski, 2000b), wird zusätzlich vom Samenkäfer (*Bruchus spec.*) befallen, was zusätzlich ertragsmindernd wirkt. Die krankheitsbedingt geringere Anzahl der Samenanlagen bedingt einen Konzentrationseffekt des ins Korn translozierten Phosphats bei der Ackerbohne, da dieser extrem gegenüber der Weißlupine erhöht ist (Tabelle 39). Der Strohertrag, der bei der Weißlupine am höchsten ausfällt und beim Weizen am geringsten, bestimmt in Verbindung mit der P-Konzentration im Stroh, die Menge des zurückgeführten Phosphats in den Boden. Hierbei zeigt sich im Gegensatz zum Gefäßversuch, wie gering diese P-Düngung durch Strohdüngung im Praxisanbau ausfällt. Hier stehen bei der Weißlupine beispielsweise 2,5 kg P/ha im Feldversuch (Tabelle 39) 55,3 kg P/ha im Gefäßversuch gegenüber (Tabelle 58).

4.2.3 Effekte der Hauptfrüchte auf den Boden

Die durchgeführten Bodenanalysen im Feldversuch zeigen analog zum Gefäßversuch zwischen den Vorfrüchten keine signifikanten Unterschiede. Einzig der Düngungseffekt des Rohphosphats zeigt sich in beiden Extraktionsmethoden deutlich. Man kann davon ausgehen, dass die gewählten Bodenanalyse-Methoden zwar unterschiedlich stark verfügbare P-Fractionen im Boden erfassen, jedoch ungeeignet zur Detektion von Effekten der Vorfrüchte Weißlupine und Ackerbohne im Vergleich zu Weizen sind. Es zeigt sich anhand der Tabelle 51 und Tabelle 52, dass die Düngung des Rohphosphats eine mittlere Erhöhung des CAL-extrahierbaren Phosphats von 29% bewirkt, während das DL-extrahierbare Phosphat demgegenüber um ca. 70% erhöht wird. Dies zeigt deutlich die niedrige Löslichkeit des Rohphosphats auf. Durch den Anbau der Hauptfrüchte wird das Niveau beider P-Fractionen wieder auf das Ausgangsniveau abgesenkt. Die Bodenanalyse dokumentiert damit lediglich den Düngungseffekt der Rohphosphat-Applikation und den Entzug der Hauptfrüchte. Die folgende Bilanz soll zeigen, wie viel Phosphat von den oberirdischen Pflanzenteilen gebunden und damit in den Analysen erfasst wird, und wie viel

Phosphat des applizierten und durch die beiden Extraktionsmethoden erfassten Rohphosphats demnach in einer organischen Form im Boden festgelegt wird.

Tabelle 59: Bilanz der Entzüge und der durch CAL ermittelten P-Aufnahme der Hauptfrüchte

	Sommerweizen	Weißlupine	Ackerbohne	Einheit
P-Applikation	110	110	110	kg P/ha
Gesamtentzüge	15,4	14,9	21,1	kg P/ha
Δ CAL-P ⁴	23,6	14,6	15,6	mg P/ kg Boden
* 4,2 10 ³ t Boden/ha ⁵	99,0	61,3	65,6	kg P/ha
Δ CAL-P - Entzüge	83,6 a	46,4 a	44,5 a	kg P/ha

$$GD(5\%) = 45,22$$

In dieser Bilanz erkennt man deutlich, dass nur ein Bruchteil des gedüngten und durch CAL-P erfassten Phosphats (Δ CAL-P - Entzüge) von den oberirdischen Pflanzenteilen aufgenommen worden ist. Der Rest kann daher in organischer Form in den Wurzelrückständen gebunden sein oder noch immer als Apatit vorliegen. Weder diese Bilanz, noch die durchgeführten Bodenanalysen können Aufschluss darüber geben, in welcher Form dieses Phosphat im Boden gebunden ist und ob das organisch gebundene Phosphat bei den Leguminosen durch schnellere Verrottung der Wurzeln schneller verfügbar ist als beim Sommerweizen. Da die Leguminosen mit Rhizobien symbiotisch Luftstickstoff binden und dies zu einem engeren C/N-Verhältnis der Wurzelmasse führt, kann es möglich sein, dass die dort gebundenen P-Reserven schneller nachfolgenden Früchten zur Verfügung stehen als nach Sommerweizen. Bei der Bilanz ist zu beachten, dass die ermittelten CAL-P-Werte nur einen Teil des Boden-Phosphats darstellen. Aus diesem Grunde wird die P-Zufuhr durch die Rohphosphat-Applikation nur durch die Veränderung des CAL-P im Boden dargestellt. Gleiches gilt auch für die Bilanz des DL-extrahierbaren Phosphats (Tabelle 60).

⁴ Differenz zwischen CAL-P nach der P-Applikation und CAL-P nach der Ernte

⁵ Faktor 4,2 10³ t Boden/ ha ergibt sich aus einer Lagerungsdichte von 1,4 g/cm³ und einer Tiefe von 0,3 m

Tabelle 60: Bilanz der Entzüge und der durch DL ermittelten P-Aufnahme der Hauptfrüchte

	Sommerweizen	Weißlupine	Ackerbohne	Einheit
P-Applikation	110	110	110	kg P/ha
Gesamtentzüge	15,4	14,9	21,1	kg P/ha
Δ DL-P ⁶	102,5	52,9	39,7	mg P/ kg Boden
* 4,2 10³t Boden/ha⁷	430,6 b	222,3 ab	166,8 a	kg P/ha
Δ DL-P - Entzüge	415,2 b	207,4 ab	145,7 a	kg P/ha

GD(5%) = 223,1

Zunächst wird in dieser Bilanz deutlich, dass die Δ DL-P Menge zum Teil weit über der in Form von Rohphosphat applizierten P-Menge liegt. Dies verdeutlicht noch einmal, dass keine P-Gesamtgehalte bestimmt werden, sondern nur P-Fractionen, die unterschiedlichen Ursprungs sein können.

Weiterhin zeigt sich in dieser Darstellung, dass beim Weizen und der Weißlupine signifikant mehr DL-P im Boden zurückbleibt als nach der Ackerbohne, wobei der Unterschied zwischen Weißlupine und Weizen auch sehr hoch, aber statistisch nicht signifikant zu unterscheiden ist. Diese Darstellung der Bodenanalysen zeigt, dass durch den Anbau der Weißlupine und der Ackerbohne der Entzug von DL-extrahierbaren Phosphat durch die Leguminosen erhöht gegenüber dem Weizen sein muss. Analog zur Bilanz des CAL-extrahierbaren Phosphats liegt die Vermutung nahe, dass das „fehlende“ Phosphat, welches weder in den oberirdischen Pflanzenteilen, noch in der DL-Extraktion des Bodens nach der Ernte der Hauptfrüchte zu finden ist, organisch im Wurzelsystem der Hauptfrüchte gebunden sein könnte. Aus einer verbesserten Verrottung der Leguminosenwurzeln aufgrund des engeren C/N-Verhältnisses könnte eine bessere P-Freisetzung resultieren, was bei einer P-ineffizienten Folgefrucht wie Spinat eine verbesserte P-Aufnahme bewirken kann.

⁶ Differenz zwischen DL-P nach der Düngung und DL-P nach der Ernte

⁷ Faktor 4,2 10³ t Boden/ ha ergibt sich aus einer Lagerungsdichte von 1,4 g/cm³ und einer Tiefe von 0,3 m

Es zeigt sich in beiden Versuchen, dass die angewendeten Methoden der Bodenanalyse nicht die P-Fraktion im Boden erfassen, die durch den Anbau der Weißlupine und der Ackerbohne beeinflusst werden. Dessougi et al. (2003) haben in ihrer Arbeit ebenso keine Veränderung der CAL-P-Konzentration im Boden nachweisen können. Diese Autoren kommen allerdings zu dem Schluss, dass andere Mechanismen als Wurzelexsudate und Wurzelrückstände der Weißlupine die P-Verfügbarkeit in der Rhizosphäre erhöhen, da keine Erhöhung des P-Influsses beim nachgebauten Mais festgestellt werden konnte. Dies kann anhand der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zur P-Aufnahme des Spinats nach der Weißlupine widerlegt werden. Auch die EUF-Methode, die das pflanzenverfügbare Phosphat erfasst, kann in der vorliegenden Arbeit keinen Aufschluss über die unterschiedlichen Phosphatfraktionen im Boden nach den verschiedenen Hauptfrüchten geben. Daher können die durch den Spinat gezeigten Effekte nach der Weißlupine nicht durch Ergebnisse der Bodenanalysen bestätigt werden.

Um eine verlässliche Aussage über den Einfluss der Weißlupine auf die für eine Folgefrucht bedeutende P-Fraktion im Boden treffen zu können, muss die Bodenanalytik entsprechend angepasst werden. Eine Erfassung des Gesamtphosphats im Boden in Verbindung mit fraktionsspezifischen P-Analysemethoden unter anderem auch im Bereich organisch gebundenen Phosphats könnten bei künftigen Bodenanalysen eindeutiger Ergebnisse erbringen. So könnte eine Markierung des applizierten Phosphats mit ^{32}P eine Unterscheidung des aufgenommenen Phosphats aus appliziertem und aus dem im Boden vorher schon vorhandenen Phosphats möglich machen (Hocking und Randall, 2001). Weiterhin ist es möglich, durch eine niedrigere Phosphat-Applikation zu Versuchsbeginn bessere Effekte der Hauptfrüchte zu erzielen. Dies würde nicht allein besser messbare Effekte erbringen, sondern auch das langfristige Ziel der Einsparung von Ressourcen unterstützen.

5 Fazit

Die Ergebnisse im Gefäßversuch haben deutlich gezeigt, dass die Verwendung von leichtlöslichen P-Düngern wie das „Neue Thomasphosphat“ eine bessere Effizienz bezüglich der Ertragswirkung aufweisen als das im Vergleich dazu verwendete Rohphosphat. Auch die Einbindung der Weißlupine in die Fruchtfolge bewirkt keine vergleichbare Effizienzerhöhung des applizierten Rohphosphats im Vergleich zur Düngewirkung des voll aufgeschlossenen CaHPO_4 . Weiterhin ist die Verfügbarkeit leichtlöslicher P-Dünger durch den pH-Wert des Bodens von über 6 nicht eingeschränkt, so dass die Verwendung leichtlöslicher Dünger auf solchen Böden zu bevorzugen wäre. Es stellt sich die Frage, ob es sinnvoll ist, im ökologischen Landbau aus rein ideologischen Gründen voll aufgeschlossenen und damit leichtlöslichen Phosphatdüngern keine Zulassung zu geben. Vor dem Hintergrund, dass die Weltvorkommen fossilen Phosphats, die als Quelle für jeglichen mineralischen Phosphatdünger dienen, begrenzt sind, wäre es sinnvoller, voll aufgeschlossenen P-Dünger zur Düngung zu nutzen, um eine aktive Schonung der Ressourcen zu gewährleisten. Dies käme auch einer echten ökologischen Wirtschaftsweise nahe.

6 Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit, appliziertes Rohphosphat durch die P-aneignungseffiziente Weißblupine biologisch für nachfolgende Früchte aufzuschließen, ist im Gefäßversuch beim Spinat erreicht worden. Es ist gezeigt worden, dass der Spinat einen Ertragszuwachs von 60% aufweist und auch ein erhöhter P-Entzug von 48% gegenüber dem Spinat nach Sommerweizen zu verzeichnen ist. Die Ergebnisse im Gefäßversuch zeigen weiterhin, dass der Raps in der Lage ist, Rohphosphat bzw. schwer verfügbares Phosphat für sich zu mobilisieren. Da Raps und Weißblupine dazu beide Malat und Citrat exsudieren, kann die leichte Ertragsminderung beim Raps nach der Weißblupine auf die bessere Mobilisierungsleistung der Weißblupine zurückgeführt werden, da die P-Quellen im Boden durch die Weißblupine im Vorfeld stärker erschöpft wurden. Dies zeigt sich deutlich im P-Entzug, da hier der Raps nach der Weißblupine ca. 26% weniger Phosphat entziehen konnte als nach Sommerweizen. Die ebenfalls als P-aneignungseffizient geltende Ackerbohne hat dem Raps weder bezüglich des Ertrages noch bezüglich des P-Entzuges Nachteile gegenüber dem Sommerweizen bereitet.

Die im Vergleich zur Rohphosphatvariante angelegte Düngungsvariante mit CaHPO_4 zeigt deutlich den besseren Effekt dieses Düngemittels gegenüber Rohphosphat. CaHPO_4 bewirkt als voll aufgeschlossener Phosphatdünger sowohl bei den Hauptfrüchten als auch bei den Zwischenfrüchten eine Ertragssteigerung gegenüber der Rohphosphatvariante. Spinat nach Sommerweizen zeigt einen Ertragszuwachs gegenüber der Rohphosphatvariante von 94%, nach Weißblupine um 71% und nach Ackerbohne um 76%. Beim Raps fällt der Ertragszuwachs gegenüber Rohphosphat etwas geringer aus, dennoch liegt er bei der Vorfrucht Weizen bei 11%, bei der Vorfrucht Weißblupine 27% und der Vorfrucht Ackerbohne 11%. In der Düngungsvariante mit CaHPO_4 zeigt sich für den Raps nach Weißblupine keine Ertragseinbuße, was im Vergleich zur Rohphosphatvariante die bessere Phosphatverfügbarkeit beweist.

Mit den erzielten Ergebnissen im Gefäßversuch wird gezeigt, dass der Anbau der Weißblupine auf eine nachfolgende P-ineffiziente Pflanze zwar ertragssteigernd

wirkt und eine höhere P-Aufnahme zur Folge hat, dennoch die Applikation des leichtlöslichen CaHPO_4 zu einem besseren Ertrag und einer höheren P-Aufnahme führt.

Die im Gefäßversuch erzielten Ergebnisse lassen sich im Feldversuch nur bedingt reproduzieren. Die Wirkung der Hauptfrüchte Sommerweizen, Weißlupine und Ackerbohne auf die Zwischenfrüchte Raps und Spinat kann anhand der Ergebnisse der Pflanzenanalysen nur unter Vorbehalt diskutiert werden. Der stark ausgewinterte Bestand der Zwischenfrüchte lässt daher nur die Vermutung zu, dass die Weißlupine einen positiven Effekt auf die Phosphataufnahme des Spinats hat, wie es im Gefäßversuch gezeigt werden kann. Auch die Ergebnisse der Bodenanalyse verhelfen im Feldversuch nicht zu eindeutigen Ergebnissen bezüglich der Mobilisierungseffizienz der Weißlupine bzw. der Ackerbohne. Die in der Diskussion erstellten Bilanzen sollen klarmachen, dass gerade die P-Fractionen im Boden, welche einen Effekt der Hauptfrüchte anzeigen könnten, nicht durch die gewählten Bodenanalysen erfasst werden. Im Jahr 2003 zeigten die P-mobilisierten Hauptfrüchte kaum einen Einfluss auf das Wachstum von Mais im Gefäß- und Feldversuch.

7 Literatur

- Appel, T. (1991): Der Stickstoff-Umsatz in Sandböden und seine Bedeutung für die Prognose des pflanzenverfügbaren Stickstoffs sowie des N-Düngerbedarfs von Getreide, untersucht mittels Elektro-Ultrafiltration und CaCl_2 -Extraktion. Giessener Bodenkundliche Abhandlungen Band 9, Institut für Bodenkunde und Bodenerhaltung der Justus-Liebig-Universität Giessen
- Barber, S.A. (1995): Soil Nutrient Bioavailability: A Mechanistic Approach. 2nd Ed., John Wiley, New York, USA, 414p.
- Cress, W. A., G. O. Throneberry, und D. L. Lindsay, (1979): Kinetics of phosphorus absorption by mycorrhizal and nonmycorrhizal tomato roots. *Plant Physiology* **64**, 484-487
- Dessougi, H.E., A. Dreele, N. Claassen (2003): Growth and phosphorus uptake of maize cultivated alone, in mixed culture with other crops or after incorporation of their residues. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **166**, 254-261
- Gahoonia, T. S., N. Claassen und A. Jungk (1992): Mobilization of phosphate in different soils by regrass supplied with ammonium nitrate. *Plant and Soil* **140**, 241-248
- Hamon, R. E. (1995): Identification of Factors Governing Cadmium and Zinc Bioavailability in Polluted Soils. PhD Thesis, University of Nottingham, UK
- Hayman, D.S., (1980): Mycorrhiza and crop production. *Nature* **287**, 487-488
- Hendriks, L., N. Claassen und A. Jungk (1981): Phosphatverarmung des wurzelnahen Bodens und Phosphataufnahme von Mais und Raps. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* **144**, 486-499
- Hinsinger, P. und R. J. Gilkes (1996): Mobilization of phosphate from phosphate rock and alumina-sorbed phosphate by the roots of ryegrass and clover as related to rhizosphere pH. *European Journal of Soil Science* **47**, 533-544

- Hinsinger, P. (1998): How do plant roots acquire mineral nutrients? Chemical processes involved in the rhizosphere. *Advanced Agronomy* **64**, 225-265
- 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. und C. Waschkes (1987): Phosphatverorgung von Sommerweizen (*Triticum aestivum*, L.) in Mischkultur mit Weißer Lupine (*Lupinus albus*, L.). *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* **150**, 1-8
- Hocking, P.J. and P.J. Randall (2001): Better growth and phosphorus nutrition of sorghum and wheat following organic acid secreting crops. *In: Plant Nutrition - Food Security and Sustainability of Agro-Ecosystems*. 548-549, 2001. Kluwer Academic Publishers, Niederlande
- Hoffland, E. (1992): Quantitative evaluation of the role of organic-acid exudation in the mobilization of rock phosphate by rape. *Plant and Soil* **140**, 279-289
- INARO: Informationssystem Nachwachsende Rohstoffe, www.inaro.de, 2003
- Jaillard, B., C. Plassard und P. Hinsinger (2001): Measurement of H⁺ fluxes and concentrations in the rhizosphere. *In: Soil Acidity Handbook*. Hrsg. Z. Rengel. Marcel Dekker Inc., New York, USA
- Johnson, J.F., D.L. Allan, C.P. Vance, and G. Weiblen, (1996): Root carbon dioxide fixation by phosphorus-deficient *Lupinus albus*: Contribution to organic-acid exudation by proteoid root. *Plant Physiology* **112**, 19-30
- Jungk, A. (1996): Dynamics of nutrient movement at the soil-root interface. *In: Plant Roots. The Hidden Half*, 2. Auflage, Hrsg.: Y. Waisel, A. Eshel and U. Kafkaki. Marcel Dekker, New York, USA, 529-556
- Köhler, W., G. Schachtel und P. Voleske (1995): *Biostatistik*, 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin, 95-96; 127-129; 138-140; 155-157;

- Lindsay, W.L., Vlek, P.L.G. and Chien, S.H. (1989): Phosphate minerals. *In*: Minerals in soil environment, 2. Auflage, Hrsg.: J.B. Dixon and S.B. Weed. 1089-1130. Soil Science Society of America, Madison, WI; USA
- Makowski, N. (2000a): Ölfrüchte, *IN*: Lehrbuch des Pflanzenbaus, Band 2: Kulturpflanzen, 513-539, Hrsg.: N. Lüttke-Entrup und J. Oehmichen, Th. Mann, Gelsenkirchen
- Makowski, N. (2000b): Körnerleguminosen, *IN*: Lehrbuch des Pflanzenbaus, Band 2: Kulturpflanzen, 513-539, Hrsg.: N. Lüttke-Entrup und J. Oehmichen, Th. Mann, Gelsenkirchen
- Marschner, H., V. Römheld und I. Cakmak (1987): Root-induced changes of nutrient availability in the rhizosphere. *Journal of Plant Nutrition* **10**, 1175-1184
- McLaughlin M.J., E. Smolders und R. Merckx (1998): Soil-root-interface: physicochemical processes: *In*: Soil Chemistry and Ecosystem Health, Special Publication No. 52. 233-277. Soil Science of Society America, Madison, WI, USA
- Mengel, K. (1994): Einführung in die Biochemie, 4. Aufl., 87-97. Eigenverlag
- Mengel, K. und E. A. Kirkby (2001): Principals of Plant Nutririon. 5. Aufl., 453-479, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Niederlande
- Morel, C. und P. Hinsinger (1999): Root-induced modifications of the exchange of phosphate ion between soil solution and soil solid phase. *Plant and Soil* **211**, 103-110
- Neumann G., V. Römheld (1999): Root excretion of carboxylic acids and protons in phosphorus-deficient plants. *Plant and Soil* **211**, 121-130
- Oehmichen, J. (2000): Bodenkunde. *In*: Lehrbuch des Pflanzenbaues, Band 1: Grundlagen, 144-155 Hrsg.: N. Lüttke-Entrup und J. Oehmichen, Th. Mann, Gelsenkirchen

- Paffrath, A., E. Leisen, M. Puffert und F. Lippert (2002): Anbau von Feldgemüse. *In*: Dokumentation 10 Jahre „Leitbetriebe Ökologischer Landbau NRW“ Wissenschaft - Beratung - Praxis. Hrsg.: Institut für Organischen Landbau, Universität Bonn; LWK Rheinland, Bonn und LWK Westfalen-Lippe, Münster
- Parfitt, R. L. (1979): The availability of P from phosphate-geothite bridging complexes. Desorption and uptake by ryegrass. *Plant and Soil* **53**, 55-65
- Peiter, E., F. Yan und S. Schubert (2000): Are mineral nutrients a critical factor for the lime intolerance of lupins? *Journal of Plant Nutrition* **23(5)**, 617-635.
- Renno, J.M. und D. Steffens (1985): Einfluss von Düngungszeitpunkt und Phosphatform auf Alterung und Verfügbarkeit von Phosphat. VDLUFA-Schriftenreihe **16**, Kongressband 1985, 171-178
- Römheld, V. (1986): pH-Veränderungen in der Rhizosphäre verschiedener Kulturpflanzenarten in Abhängigkeit vom Nährstoffangebot. *Potash Review* **55**, 1-8
- Schlechte, G. (1976): Nährstoffaufnahme von Pflanzen und Mykorrhiza. I Ektotrophe Mykorrhiza. *Kali-Briefe (Bünterhof)*, Fachgebiet 2, 6. Folge
- Schubert, S., E. Schubert und K. Mengel (1990): Effect of low pH of the root medium on proton release, growth, and nutrient uptake of field beans (*Vicia faba*). *Plant and Soil* **124**, 239-244
- Schulte, G. und D. Schröder (1993): Einfluss der Dauer ökologischer Wirtschaftsweise auf die Nährstoffgehalte ausgewählter Ackerstandorte. *In*: Forschungsvorhaben Ökologischer Landbau Rheinland-Pfalz 1990-1993. Vortragsveranstaltung, 3.11.1993 in der SLVA Bad Kreuznach, 61-85
- Smiley, R. W. (1974): Rhizosphere pH as influenced by plants, soils and nitrogen fertilizers. *Soil Science Society of America* **38**, 795-799

- Steffens, D. (1992): Ertragswirksamkeit und Umsatz von apatitischen Phosphatdüngemitteln im Vergleich zu vollaufgeschlossenen Phosphatformen im Boden unter besonderer Berücksichtigung von Standort- und pflanzenphysiologischen Faktoren. Habilitationsschrift FB 17 Agrarwissenschaften und Umweltsicherung der Justus-Liebig-Universität Gießen.
- Tang, C., C. D. A. McLay und L. Barton (1997): A comparison of proton excretion of twelve pasture legumes grown in nutrient solution. Australien Journal of Experimental Agriculture **37**, 563-570
- Yan, F., Y. Zhu, C. Müller, C. Zörb und S. Schubert (2002): Adaption of H⁺-pumping and plasma membrane H⁺ ATPase activity in proteoid roots of white lupin (*Lupinus albus L.*) under phosphate deficiency. Plant Physiology **129**, 60-63

III. Anhang

**Tabelle 56: Trockenmasse-Erträge des Raps-Sprosses im Gefäßversuch
(Gefäßversuchsstation, Frühjahr 2003)**

Düngungs- variante	Vorfrucht	Weizen	Weißlupine [g TM/Gefäß]	Ackerbohne
Rohphosphat		62,3 b	57,2 a	62,6 b
CaHPO ₄		69,2 c	72,4 c	69,4 c
GD(5%) = 4,2		n = 4		

**Tabelle 57: Trockenmasse-Erträge des Spinat-Sprosses im Gefäßversuch
(Gefäßversuchsstation, Frühjahr 2003)**

Düngungs- variante	Vorfrucht	Weizen	Weißlupine [g TM/Gefäß]	Ackerbohne
Rohphosphat		26,0 a	42,3 b	24,1 a
CaHPO ₄		50,6 b	72,4 c	42,4 b
GD(5%) = 9,6		n = 4		

**Tabelle 58: P-Zufuhr im Gefäßversuch auf 1 ha umgerechnet (Lagerungsdichte 1,4 g/cm³ → 280 dt
Stroh/ha)**

Düngungs- variante	Vorfrucht	Weizen	Weißlupine [kg P/ha]	Ackerbohne
Rohphosphat		8,4	19,6	22,4
CaHPO ₄		14,0	53,2	36,4

8.1 Beitrag zur 8. Wissenschaftstagung: Ökologischer Landbau –Ende der Nische, 1. – 4. März, 2005 Witzenhausen

Rohphosphatmobilisierung von Sommerweizen, Weißer Lupine und Ackerbohne in einer Fruchtfolge

Rock phosphate mobilization by summer wheat, white lupin, and faba bean in a crop rotation

D. Steffens¹, R. Stamm¹, F. Yan², G. Leithold³ und S. Schubert¹

Key words: rock phosphate, phosphorus, nutrition, white lupin, faba bean

Schlüsselwörter: Rohphosphat, Phosphat, Ernährung, Weiße Lupine, Ackerbohne.

Abstract:

In organic farming rock phosphate is used as a mineral P fertilizer, although the agronomic efficiency is limited. The objective of this study was to investigate in field and pot experiments the mobilization of rock phosphate by P-efficient plants (white lupin and faba bean) and the P availability for P-inefficient plants (spinach and maize) during a crop rotation in 2002/2003 and 2003/2004. The P uptake of spinach was higher in a crop rotation with white lupin and faba bean than in a crop rotation with summer wheat. In pot experiments the application of new basic slag phosphate (CaHPO₄) resulted to a higher P uptake of the plants than rock phosphate.

Einleitung und Zielsetzung:

Seit geraumer Zeit ist die P-Verfügbarkeit im Organischen Landbau, insbesondere auf Standorten mit einem pH-Wert von über 6,5 und bei viehloser Bewirtschaftung kritisch zu beurteilen, da durch die geringe Protonenaktivität und die hohe Ca²⁺ Konzentration die Löslichkeit von weicherdigem Rohphosphat stark eingeschränkt ist. Untersuchungen von STEFFENS (1987) zeigen, dass weicherdige Rohphosphate auch nach zehnjährigem Umsatz im Boden nur in geringem Umfang in CAL extrahierbares Phosphat umgewandelt werden. Ferner ist zu berücksichtigen, dass in Europa nur noch P-arme Eisenerze verhüttet werden, so dass kein Thomasphosphat aus der Stahlindustrie für die P-Düngung mehr zur Verfügung steht. Das neue Thomasphosphat (CaHPO₄) ist im Organischen Landbau nicht zugelassen. Ziel unserer Gefäß- und Feldversuche ist es, die Rohphosphataneignung von P-effizienten Pflanzen (Weiße Lupine und Ackerbohne) zu ermitteln, und ob diese P-effizienten Pflanzen Phosphat für P-ineffiziente Pflanzen (Spinat und Mais) mobilisieren können.

Methoden:

Die Gefäßversuche, angesetzt in kleinen Mitscherlich-Gefäßen (6 kg Boden) unter natürlichen Lichtbedingungen auf der Gefäßversuchsstation des Instituts für Pflanzenernährung, wurden mit den Böden der Feldversuchsstandorte durchgeführt. Bei den Böden handelt es sich um Löß-Parabraunerden. Die P-Versorgung der Böden lag mit 4,3 mg P/100 g Boden in der Gehaltsstufe B des VDLUFA.

Die Anlage des Feldversuches erfolgte für die Fruchtfolge 2002/2003 (Boden-pH 6,7) sowie 2003/2004 (Boden-pH 6,3) auf dem Gladerbacherhof, Versuchsbetrieb der Professur für Organischen Landbau. Im Feldversuch wurden 2002 zur Aussaat von Sommerweizen (*Triticum aestivum* L., cv. Triso), Weiße Lupine (*Lupinus albus* L., cv. Amiga) sowie Ackerbohne (*Vicia faba* L., cv. Condor) 110 kg P ha⁻¹ als Gafsa-Phosphat, ein weicherdiges Rohphosphat (12% Gesamt-P), sowie Patentkali zur Sicherung der K- (360 kg K ha⁻¹, S- (260 kg S ha⁻¹) und Mg- (86 kg Mg ha⁻¹) Ernährung gedüngt. Für die Rotation 2003/2004 wurde die P- sowie die Patentkali-Düngung

auf die Hälfte reduziert. Die Versuchspartellen, angeordnet in einer Spaltanlage, waren 3 x 10 m groß.

In den Gefäßversuchen, angelegt für die Fruchtfolge 2003/2004, wurde neben dem Gafsa-Phosphat das neue Thomasphosphat (19% Gesamt-P) geprüft (100 mg P kg⁻¹ Boden). In einer weiteren Variante wurde kein Phosphat gedüngt. Nach der Ernte von Sommerweizen, Weißlupine und Ackerbohne in den Gefäß- und Feldversuchen erfolgte die Einarbeitung der Vorfruchtreste und die Aussaat von Spinat (*Spinacia oleracea* cv., Falcon) nach jeder der genannten Hauptfrüchte, um die N-Auswaschung zu reduzieren. Ferner wurde eine Variante ohne Bewuchs eingerichtet. Zur Aussaat von Mais (*Zea mays* L., cv. Agadir) wurden die Winterzwischenfrucht eingearbeitet. In den Feldversuchen wurde kein mineralischer Stickstoff verabreicht. Im Gefäßversuch wurden mit Ausnahme von Weißer Lupine und Ackerbohne die Pflanzen ausreichend mit Stickstoff in Form von NH₄NO₃ sowie mit K (K₂SO₄) und Mg (MgSO₄) gedüngt. Die bei 105°C getrockneten Pflanzenproben wurden gemahlen, bei 550°C im Porzellantiegel verbrannt und die Asche in 5 M HNO₃ gelöst. In dieser Aschelösung wurde die P-Konzentration mit der Ammoniumvanadat-molybdat Gelbmethode von GERICKE und KURMIES (1952) analysiert. Die Versuchsergebnisse wurden mit dem Statistikprogramm Statgrafics plus Version 3 verrechnet (zwei-faktorielle Varianzanalyse).

Ergebnisse und Diskussion:

Gefäßversuche:

Tab. 1: Einfluss einer Düngung mit Rohphosphat (RP) und neuem Thomasphosphat (CaHPO₄) auf den Kornertrag von Sommerweizen, Weißer Lupine und Ackerbohne im Gefäßversuch 2003. P0: Variante ohne P-Düngung

	Weizen	Weißer Lupine g TM Gefäß ⁻¹	Ackerbohne
P0	58,4 ^a	50,2 ^a	56,4 ^a
RP	59,6 ^a	49,1 ^a	59,6 ^a
CaHPO ₄	63,0 ^b	50,5 ^a	64,6 ^a

Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikanten Unterschied

Infolge der P-Düngung stieg der Kornertrag beim Sommerweizen an, wobei das neue Thomasphosphat besser auf den Kornertrag wirkte als das Rohphosphat. Bei der Ackerbohne und Weißer Lupine zeigte die P-Düngung keinen statistisch signifikanten Einfluss auf den Kornertrag (Tab. 1). Dieser Befund bestätigt das gute Vermögen der Ackerbohne sich Boden-P und apatitisches Dünger-P anzueignen. Die P-Aneignung der Ackerbohne beruht auf einer Nettoprotonenabgabe der Wurzeln (SCHUBERT et al., 1990), die der Weißer Lupine auf einer Nettoprotonenabgabe und Ausscheidung von organischen Anionen (YAN et al., 2002). Die in der Tab. 2 dargestellte P-Aufnahme der Pflanzen spiegelt die Löslichkeit der P-Düngemittel wider. Die höchste P-Aufnahme wurde bei allen Pflanzen in der Variante mit dem neuen Thomasphosphat ermittelt.

Tab. 2: Einfluss einer Rohphosphatdüngung (RP) und einer Thomasphosphatdüngung (CaHPO₄) auf die P-Aufnahme von Sommerweizen, Weißer Lupine und Ackerbohne im Gefäßversuch 2003. P0: Variante ohne P-Düngung. Angaben in mg P Gefäß⁻¹

	Weizen Samen	Stroh	Weißer Samen	Lupine Stroh	Ackerbohne Samen	Stroh
P0	121 ^a	14 ^a	169 ^a	25 ^a	167 ^a	25 ^a
RP	125 ^a	18 ^a	174 ^a	28 ^a	186 ^a	28 ^a
CaHPO ₄	191 ^b	30 ^b	221 ^b	61 ^b	225 ^b	61 ^b

Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikanten Unterschied

Nach dem Einarbeiten der Vorfruchtreste erfolgte der Anbau von Spinat. Nach Anbau von Weißer Lupine und Ackerbohne war die P-Aufnahme von Spinat in der P0- und Rohphosphatvariante höher als nach Anbau von Sommerweizen. Aufgrund der hohen Löslichkeit von CaHPO_4 ist die P-Aufnahme von Spinat in der Variante mit neuem Thomasphosphat höher als in der P0- und Rohphosphatvariante. Die Vorfrüchte haben in dieser Düngungsvariante einen geringen Einfluß auf die P-Aufnahme von Spinat (Tab. 3).

EL DESSOUGI et al. (2003) beobachteten, dass Mais nach Einarbeitung von Ernterückständen der Weißen Lupine weniger P aufgenommen hat als nach Inkorporation von Raps- oder Zuckerrübenenernterückständen. Die eigenen und die Ergebnisse von EL DESSOUGI et al. (2003) weisen daraufhin, dass eine P-Mobilisierung durch P-effiziente Pflanzen in einer Fruchtfolge auf Stroh- und Rhizosphäreneffekten beruhen kann.

Tab. 3: Einfluss von verschiedenen Vorfrüchten und Düngung mit Rohphosphat (RP) sowie Thomasphosphat (CaHPO_4) auf die P-Aufnahme von Spinat im Gefäßversuch 2003/2004. P0: Variante ohne P-Düngung.

Vorfrucht	Weizen	Weißlupine	Ackerbohne
Düngung		mg P Gefäß ⁻¹	
P0	34 ^a	47 ^b	37 ^a
RP	57 ^a	73 ^b	61 ^a
CaHPO_4	80 ^a	77 ^a	67 ^b

Unterschiedliche Buchstaben zwischen den Vorfruchtvarianten kennzeichnen signifikante Unterschiede

Feldversuche:

Unter Feldbedingungen limitiert die N-Verfügbarkeit den Kornertrag von Sommerweizen. Der relativ geringe Ackerbohnenenertrag ist mit einem starken Pilzbefall zu erklären. Der Ertrag von Weißer Lupine ist im Vergleich zu 2002 im Jahr 2003 relativ hoch. Im Jahr 2003 hat die Weiße Lupine mehr P aufgenommen als Sommerweizen und Ackerbohne, wobei zu erwähnen ist, dass dieses aufgenommene P mit den Körnern vom Feld exportiert wird. Mit dem Stroh verbleibt nur eine geringe P-Menge auf dem Feld (Tab. 4).

Tab. 4: Kornertrag und P-Aufnahme von Sommerweizen, Weißer Lupine und Ackerbohne im Feldversuch 2003

	Weizen		Weiße Lupine		Ackerbohne	
	2002	2003	2002	2003	2002	2003
Kornertrag (dt ha ⁻¹)	33,6	36,2	29,5	46,9	26,3	37,9
P-Aufnahme Korn + Stroh (kg P ha ⁻¹)	15,4	16,3	14,9	21,8	20,6	18,5
P-Aufnahme Stroh (kg P ha ⁻¹)	3,1	2,0	2,5	3,1	3,7	2,1

Tab. 5: Einfluss verschiedener Vorfrüchte auf die Sprossmasse und die P-Aufnahme von Spinat im Feldversuch

	Weizen		Weiße Lupine		Ackerbohne	
	2003	2004	2003	2004	2003	2004
Sprossmasse (dt ha ⁻¹)	1,35	15,6	1,69	21,2	2,43	32,5
P-Aufnahme (kg P ha ⁻¹)	0,56	7,6 ^a	0,74	11,0 ^b	1,00	15,4 ^c

Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede.

Im Jahr 2004 wird nach Weißer Lupine und Ackerbohne mehr Spinatsprossmasse geerntet als nach Sommerweizen. Die P-Aufnahme von Spinat ist signifikant höher nach Weißer Lupine und Ackerbohne als nach Sommerweizen im Jahr 2004 (Tab. 5). Dieses Ergebnis weist daraufhin, dass Weiße Lupine und Ackerbohne mehr P für Spinat mobilisierten als Sommerweizen. Da der Spinat in der Vegetation 2002/2003 stark auswinterterte, sind die Einflüsse der Vorfrüchte auf die Spinatsprossmasse sowie die P-Aufnahme kaum zu erkennen (Tab. 5).

Die Ergebnisse der Maisernten im Jahr 2004 sind noch nicht fertig analysiert, so dass die Ergebnisse nachgetragen werden.

Schlussfolgerungen:

Die Ergebnisse zeigen, dass Weiße Lupine und Ackerbohne schwerfügbares Phosphat in einer Fruchtfolge für Spinat mobilieren können. Unter Feldbedingungen ist die Rückfuhr an P durch Stroh der Vorfrüchte relativ gering, so dass eine verbesserte P-Aufnahme von Spinat mit Mobilisierungseffekten von Weißer Lupine und Ackerbohne erklärt werden kann. Im Vergleich zum Gefäßversuch beruht das bessere Spinatwachstum im Feld, neben der P-Mobilisierung der Vorfrüchte, auch auf einer erhöhten N-Verfügbarkeit nach dem Anbau von Weißer Lupine und Ackerbohne.

Unter dem Aspekt der begrenzten Phosphatlagerstätten ist auf Böden mit pH-Werten > 6 eine Düngung mit einem aufgeschlossenen P-Düngemittel langfristig effizienter als eine Rohphosphatdüngung.

Literatur:

- El Dessougi, H, zu Dreele, A und Claassen, N (2003) Growth and phosphorus uptake of maize cultivated alone, in mixed culture with other crops or after incorporation of their residues. *J. Plant Nutri. Soil Sci.* 166: 254-261.
- Gericke, S und Kurnies, B (1952) Die colorimetrische Phosphorsäurebestimmung mit Ammonium-Vanadat-Molybdat und ihre Anwendung in der Pflanzenanalyse. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 104: 235-247.
- Schubert, E, Mengel, K und Schubert, S (1990) Soil pH and calcium effect on nitrogen fixation and growth of broad bean. *Agron. J.* 82: 969-972.
- Steffens, D (1987) Einfluß einer langjährigen Düngung mit verschiedenen Phosphatdüngerformen auf die Phosphatverfügbarkeit in der Rhizosphäre von Raps. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 150: 75-80.
- Yan, F, Zhu, Y, Müller, C, Zörb, C und Schubert, S (2002) Mechanisms responsible for the release of organic acids by highly phosphorus-efficient white lupin (*Lupinus albus* L.). VII Congress of the European Society for Agronomy. 15.-18. Juli 2002, Cordoba, Spanien, Tagungsband, 427-428.

Danksagung: Wir danken dem Bundesprogramm Ökologischer Landbau für die Förderung unseres Projektes "Phosphat-Mobilisierung durch Haupt- und Zwischenfrüchte nach Düngung von weicherdigem Rohphosphat im Ökologischen Landbau"-02OE424.

8.2 Vortrag auf dem 8. Kongress der European Society of Agronomy in
Kopenhagen, 11. – 15.7.2004

ROCK PHOSPHATE MOBILIZATION BY WHITE LUPIN, FABA BEAN AND WHEAT IN A CROP ROTATION

D. Steffens¹, R. Stamm¹, F. Yan², G. Leithold³ and S. Schubert¹

¹Institute of Plant Nutrition, Justus Liebig University, Heinrich-Buff-Ring 26-32,
D-35392 Giessen, Germany

²Institute of Plant Production and Plant Breeding I, Justus Liebig University, Ludwigstr. 23,
D-35390 Giessen, Germany

³Institute of Plant Production and Plant Breeding II, Justus Liebig University, Karl-Glöcknerstr. 21
C, D-35394 Gießen

E-mail: Diedrich.Steffens@ernaehrung.uni-giessen.de

Introduction

According to the rules of organic farming application of water-soluble P fertilizers such as superphosphate or ammonium phosphate and P fertilization with CaHPO₄ is not allowed. Rock phosphate is used as a mineral P fertilizer, although the agronomic efficiency is limited. The solubility of rock phosphate is poor on soils with a pH above 6.5 and a high Ca²⁺ concentration. However, plants such as white lupin can mobilize P from apatite due to organic acid release from the proteoid roots. Release of organic anions and protons solubilizes rock phosphate. The objective of our investigations was to determine the acquisition of rock phosphate by P-efficient plants (white lupin and faba bean) and P availability for P inefficient plants (spinach and maize) in field and pot experiments during a crop rotation in 2002-2003 and 2003-2004.

Materials and methods

In the pot experiments we applied rock phosphate and new basic slag phosphate to white lupin, faba bean and summer wheat. New basic slag phosphate is a mixture of CaHPO₄ and basic slag. In a further treatment, P was not supplied. After harvesting these plants and incorporation of the plant residues we cultivated spinach and rape and then maize.

Results

In pot experiments, P uptake of spinach was significantly increased in both fertilizer treatments if white lupin was the preceding crop compared to faba bean or summer wheat (Table 1). This P-mobilizing effect of white lupin was not detectable by CAL or DL soil extraction (not shown).

After the harvest of spinach and rape we incorporated the plant residues of spinach and rape in the soil. Then we cultivated maize. The effect of the P mobilization by a crop rotation on the P uptake of maize is presented in Table 2. The P uptake of maize was less in the crop rotation wheat-spinach than in white lupin-spinach and faba bean-spinach in the rock phosphate treatment (Table 2).

Table 1: P uptake of spinach as related to preceding crop and P fertilizers (2002/2003).

P fertilizer	Preceding crop 2002		
	Wheat	White lupin	Faba bean
	[mg P pot ⁻¹]		
Rock phosphate	99	146	97
CaHPO ₄	226	308	198

LSD (5%) = 22.2 n = 4

In the crop rotation white lupin-rape and faba bean-rape an effect of rock phosphate mobilization on the P uptake of maize was observed relative to wheat-rape (Tab. 2). P uptake of all crops was significantly higher in the treatment with new basic slag fertilizer than in the rock phosphate treatment.

Table 2: P uptake of maize shoot as related to preceding crop and P fertilizers.

Preceding crop 2003	P fertilizer	Preceding crop 2002		
		Wheat	White lupin	Faba bean
		[mg P pot ⁻¹]		
Spinach	Rock phosphate	101	107	117
Rape		81	98	99
Spinach	CaHPO ₄	183	188	192
Rape		170	187	179

LSD (5%) = 14.0 n = 4

In the field experiment (2002/2003) we could not observe a mobilization effect of the preceding white lupin and faba bean on the P uptake of spinach and maize.

Quelle:

VIII ESA Congress, 11.-15. Juli 2004, Kopenhagen, Dänemark, Book of Proceedings, Seite 453-454.

8.3 Flyer für den Workshop



Workshop
Prof. Dr. Günter Leithold
Professur für Organischen Landbau
Karl-Glöckner-Straße 21c
35394 Gießen

Workshopadresse:

Lehr- und Versuchsbetrieb für
Organischen Landbau, Gladbacherhof
65606 Villmar
Tel.: 06474/71001-0
Fax: 06474/71001-19



Institut für Pflanzenernährung und
Professur für Organischen Landbau



Bundesprogramm Ökologischer Landbau

Workshop

Aspekte der Phosphaternährung
und Phosphatdüngung im
Ökologischen Landbau



11. Juli 2003
auf dem Gladbacherhof

Lehr- und Versuchsbetrieb für
Organischen Landbau der
Justus-Liebig-Universität Gießen

Anmeldeschluss:

1. Juli 2003

Teilnahmegebühr:

10,00 Euro

Kontaktadresse:

Prof. Dr. Günter Leithold
Professur für Organischen Landbau
Institut für Pflanzenbau und
Pflanzenzüchtung II
Karl-Glöckner-Straße 21c
35394 Gießen
Telefon: 0641/99 37730
Fax: 0641/ 99 37739
e-mail:
organ.landbau@agrar.uni-giessen.de
Internet:
<http://www.uni-giessen.de/orglandbau/>

Workshop:

Aspekte der Phosphatnahrung und Phosphatdüngung im ologischen Landbau

Die Sicherung der Phosphatnahrung der Pflanzen kann auf manchen ologisch bewirtschafteten Standorten problematisch sein, da die physikochemische Löslichkeit von weicherdigen Rohphosphaten bei Böden mit pH-Werten > 6,0 stark eingeschränkt ist. Wasserlösliche Phosphatdungemittel sind nicht zugelassen, so dass nach Alternativen gesucht wird.

Im Workshop sollen insbesondere die Wirkungen von verschiedenen P-mobilisierenden Pflanzen zur Verbesserung der Phosphatverfügbarkeit diskutiert und in unserem Feldversuch auf dem Gladbacherhof gezeigt werden.

Programm:

- 9.00 Uhr Begrüßung und Einführung
Prof. Dr. G. Leithold
Justus-Liebig-Universität, Gießen
- 9.15 Uhr Mechanism of soil phosphorus mobilization of different plants
Dr. P. Hinsinger
Charge de Recherche INRA-HDR
Montpellier, Frankreich

10.00 Uhr Aspekte der Phosphatversorgung ologisch bewirtschafteter Böden
Dr. Emmerling
Universität Trier

10.30 Uhr Pause

11.00 Uhr Phosphordungsberatung im ologischen Landbau
Dr. Kolbe
Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Dresden

11.30 Uhr Phosphat-Mobilisierung durch Haupt- und Zwischenfrüchte nach Düngung von weicherdigem Rohphosphat, Projektvorstellung
Prof. Dr. Steffens
Justus-Liebig-Universität, Gießen

12.00 Uhr Mittagessen

13.00 Uhr Vorstellung des Lehr- und Versuchsbetriebes Gladbacherhof
Dipl.-Ing. agr. A. Schmid-Eisert
Justus-Liebig-Universität, Gießen

13.30 Uhr Beginn der Exkursion in zwei Gruppen

15.30 Uhr Offizielles Ende des Workshops
Anschließend weitere Versuchs- und Betriebsbesichtigungen nach Wunsch möglich:
-Biogasversuche
-Fruchtfolge u. Bodenbearbeitung
-Weite Reihe

Anmeldeformular

Familienname:.....

Vorname:.....

Titel (Prof./Dr./Frau/Herr).....

Institut:.....

Adresse:.....

.....

.....

Telefon:.....

Fax:.....

e-mail:.....

Benötigen Sie einen Transfer von Gießen zum Gladbacherhof:

ja nein