

9. **Bewertung von Sekundärphosphaten aus Abwasser, Klärschlamm und Klärschlammasche hinsichtlich Wirkung auf Bodenparameter und technische Produktqualität**

Karlheinz Weinfurtner, Schmallenberg

1 **Einleitung**

Phosphor ist, zusammen mit Stickstoff und Kalium, ein essentieller Nährstoff und ein begrenzender Faktor für das Pflanzenwachstum. In Deutschland beträgt der Bedarf an Phosphordüngemittel derzeit ca. 120.000 Tonnen jährlich (IVA, 2008), weltweit liegt der Verbrauch bei ca. 150 t Mio. Tonnen Rohphosphat (Cordell et al., 2009) mit steigender Tendenz. Die weltweiten Reserven an Phosphaterzen sind jedoch begrenzt und in beträchtlichem Ausmaß bereits abgebaut. Aktuelle Schätzungen gehen davon aus, dass die Reserven für einen Zeitraum von 100 bis 400 Jahren ausreichen (z.B. Pradt, 2003).

Ein weiteres Problem ist die Qualität der Phosphaterze. Der Anteil schadstoffarmer Erze an der weltweiten Produktion nimmt ab, da die schadstoffarmen Lagerstätten bereits weitgehend erschöpft sind und zunehmend Erze mit erhöhten Schwermetallgehalten, v. a. Cadmium und z. T. auch Uran für die Produktion von Phosphordüngern verwendet werden.

Phosphor kann in seiner Funktion als Pflanzennährstoff nicht substituiert werden, daher wird nach Möglichkeiten gesucht, weitere Phosphorquellen zu erschließen. Eine Möglichkeit dabei ist die Nutzung von Phosphor aus sekundären Rohstoffquellen wie Klärschlamm, Fleisch- und Knochenmehlen und anderen organischen Reststoffen. Da Deutschland nicht über eigene Phosphaterzlagerstätten verfügt, besteht eine hohe Importabhängigkeit. Dem bereits aufgeführten Bedarf von 120.000 Tonnen pro Jahr stehen mögliche Quellen aus Sekundärrohstoffen von ebenfalls ca. 130.000 Tonnen gegenüber, hauptsächlich in Form von Klärschlamm (ca. 60.000 Tonnen) sowie Aschen aus Fleisch- und Knochenmehlen (ca. 30.000 Tonnen). Zur Zeit wird etwa ein Drittel des Klärschlammes als Dünger in der Landwirtschaft verwendet. Dieser Anteil nimmt jedoch seit Jahren kontinuierlich ab, da die Verwendung von Klärschlamm als Düngemittel aufgrund der vorhandenen Schadstoffproblematik zunehmend kritisch gesehen wird und einige Bundesländer komplett aus der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung ausgestiegen sind.

Im Jahr 2004 wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) die gemeinsame Förderinitiative „Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe – insbesondere Phosphor“ ins Leben gerufen. Durch das BMBF werden Forschungs- und Entwicklungsprojekte vom Laboratoriumsmaßstab bis zum Pilotmaßstab gefördert. Diese haben die Erprobung neuartiger, bisher nicht angewandter Techniken und Verfahren zum Recycling von Phosphor und ggf. anderen Pflanzennährstoffen aus

Abfallstoffen - insbesondere aus kommunalen Abwässern und Klärschlämmen sowie anderen geeigneten Sekundärrohstoffen - zum Gegenstand. Ergänzend wird ein Begleitprojekt gefördert, das die ökologische und wirtschaftliche Bewertung verschiedener Verfahren vornimmt und ein strategisches Verwertungskonzept für Deutschland entwickelt.

2 Projektziele

Grundlegendes Ziel des Begleitprojektes, das gemeinsam vom Institut für Landschaftsökologie und Ressourcenmanagement der Universität Giessen und dem Fraunhoferinstitut für Molekularbiologie und Angewandte Oekologie durchgeführt wurde, war die vergleichende Bewertung der in der Förderinitiative „Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor“ geförderten Verfahren und Produkte nach Düngemittelverordnung und Bundesbodenschutzverordnung. Wesentliches Ziel der Düngemittelverordnung ist, dass die verwendeten Dünger einen pflanzenbaulichen, produktions- oder anwendungstechnischen Nutzen haben oder sie dem Bodenschutz sowie der Erhaltung und Förderung der Fruchtbarkeit des Bodens dienen (§ 3, Absatz 2b). Weiterhin darf bei sachgerechter Anwendung die Fruchtbarkeit des Bodens, die Gesundheit von Menschen, Haustieren und Nutzpflanzen nicht geschädigt und der Naturhaushalt nicht gefährdet werden. Auch das Bundesbodenschutzgesetz und die Bodenschutzverordnung greifen diese Begriffe auf, in dem im Wortlaut des Gesetzes darauf hingewiesen wird, dass es Zweck des Gesetzes ist, nachhaltig die Funktionen des Bodens zu sichern und somit Vorsorge gegen nachteilige Einwirkungen auf den Boden zu treffen. Hinsichtlich der landwirtschaftlichen Nutzung der Böden wird auf die gute fachliche Praxis in der Landwirtschaft verwiesen. Im Sinne des Gesetzes soll eine Anreicherung schädlicher Stoffe im Boden grundsätzlich vermieden werden. Für wichtige Kontaminanten sind Vorsorgewerte festgelegt.

Im Rahmen des Vorhabens wurden deshalb folgende Ziele verfolgt:

- Analyse der Düngewirkung durch Untersuchung der Löslichkeiten der getesteten Produkte sowie ihre Wirkung auf Boden und Pflanzen in Gefäßversuchen
- Analyse von möglichen schädlichen Wirkungen durch Untersuchung der Schadstoffgehalte, der Schadstoffverfügbarkeit und der Aufnahme in die Pflanze
- Betrachtung der technischen Produktqualität

Im folgenden werden Ergebnisse der am Fraunhoferinstitut für Molekularbiologie und Angewandte Oekologie durchgeführten Untersuchungen vorgestellt.

3 Material und Methoden

In den Untersuchungen wurden 15 Produkte aus unterschiedlichen Ausgangsmaterialien und verschiedenen Herstellungsverfahren analysiert. Eine Beschreibung der Produkte ist bei Waida und Gäth in diesem Tagungsband zu finden. Zusätzlich wurden noch eine 0-Kontrolle sowie zwei Mineraldünger zum Vergleich getestet. Untersucht wurden drei Klärschlammrecyclate in Form von Magnesiumammoniumphosphat (MAP) sowie ein Calciumphosphat (SESAL-Phos) und ein Calcium-Silikat-Hydrat Produkt (FIX-Phos). Desweiteren wurden zwei Abwasserrecyclate (P-RoC) getestet, bei denen P durch Kristallisation aus dem Abwasserstrom gewonnen wurde. Die Produktpalette wurde durch sieben unterschiedlich behandelte Klärschlammaschen sowie eine Knochenmehlasche abgerundet.

Die Untersuchungen zum Einfluss der Produkte auf Parameter der P-Versorgung im Boden wurden in zwei Ansätzen als Inkubationsexperiment ohne Pflanzen durchgeführt. Die Versuchsansätze begannen im Abstand von ca. einem Jahr, da zu Beginn des Projektes noch nicht alle Produkte verfügbar waren. Alle Produkte wurden in zwei Böden getestet, die sich in ihrer Korngrößenverteilung, dem pH-Wert, den Fe- und Al-Gehalten sowie dem pflanzenverfügbaren P-Vorrat unterscheiden (Tabelle 1), wobei im ersten Ansatz Lehm Boden I im zweiten Ansatz Lehm Boden II verwendet wurde.

Tabelle 1: Bodeneigenschaften der beiden Testböden (alle Angaben bezogen auf TS)

	Einheit	Sandboden	Lehm Boden I	Lehm Boden II
Sand	g/kg	890	440	280
Schluff	g/kg	100	270	550
Ton	g/kg	10	290	170
pH (CaCl ₂)		4,86	6,32	5,44
C _{gesamt}	g/kg	26,8	16,8	13,8
N _{gesamt}	mg/kg	1389	2123	1485
P _{gesamt}	mg/kg	330	580	380
P _{CAL}	mg/kg	71	37	33
KAK _{eff}	mmol _c /kg	56,1	188,7	93,2

Die Untersuchungen wurden mit jeweils 6 kg Boden in vierfacher Wiederholung angelegt. Jedes Gefäß, mit Ausnahme der 0-Kontrolle, wurde mit 360 mg P in Form der unterschiedlichen Produkte gedüngt. Nach der Düngung wurde ein Wassergehalt von ca. 50% – 70% der maximalen Wasserhaltekapazität eingestellt.

Der pflanzenverfügbare Phosphor-Gehalt in den Ausgangsböden und den verschiedenen Testsubstraten wurde mittels der Calcium-Acetat-Lactat-Methode (CAL) nach VDLUFA (1991) bestimmt.

Die Untersuchungen zur Löslichkeit des in den Produkten enthaltenen P wurde entsprechend der Vorgaben nach VDLUFA, Methodenbuch II, Untersuchung von Düngemitteln durchgeführt (VDLUFA, 1995).

Die P-Sorptionskurven wurden nach SCHEINOST (1994) erstellt. Dazu wurden je achtmal 5 g Boden mit Lösungen unterschiedlicher P-Gehalte für 24 Stunden geschüttelt und anschließend das verbleibende P in der überstehenden Lösung bestimmt. Damit lässt sich neben der aktuellen P-Konzentration in der Lösung auch die Menge an sorbiertem bzw. desorbiertem P ermitteln. Die berechnete Menge an sorbiertem bzw. desorbiertem P wird gegen die Konzentration in der Lösung aufgetragen. Zur Kurvenanpassung wurde die Freundlich-Gleichung verwendet. Aus ihr lassen sich P_{10} , d. h. die Konzentration bei der die Sorption und Desorption gleich sind (entspricht Gleichgewichtskonzentration in der Bodenlösung), und das P-Sorptionsmaximum ableiten.

4. Ergebnisse und Diskussion

4.1 Löslichkeit von P in unterschiedlichen Extraktionsmitteln

Die Phosphor-Löslichkeit der Produkte unterscheidet sich stark zwischen den Produkten und zwischen den verwendeten Extraktionsmitteln. Die Löslichkeit in Mineralsäure ist für die beiden P-RoC Produkte und FIX-Phos vergleichbar mit TSP, einem leicht löslichen Phosphatdünger (Abb. 1 und 2). Die Löslichkeit der übrigen Produkte liegt zwischen der Löslichkeit von TSP und Rohphosphat (RP). Nur die Produkte MAP Gifhorn und Stuttgart weisen eine Löslichkeit unterhalb der von RP auf. In Citronensäure zeigen die Produkte FIX-Phos und P-RoC 2009 ebenfalls eine Löslichkeit vergleichbar mit TSP, bei den übrigen Produkten liegt die Löslichkeit zwischen der von TSP und RP, wobei P-RoC 2008 und die PASCH-Produkte am besten abschneiden. In Ameisensäure ist die Löslichkeit von FIX-Phos, den P-RoC Produkten und PASCH I vergleichbar der Löslichkeit von TSP. Die übrigen Produkte mit Ausnahme von Seaborne und MAP Gifhorn sowie von Ulophos liegen im Bereich zwischen den beiden Mineraldüngern. Die Löslichkeit für die alkalisch-ammonicitrat Extraktion schwankt stark. Während PASCH III eine Löslichkeit vergleichbar von TSP erreicht und PASCH II sowie Seaborne und MAP Gifhorn noch Nahe an der Löslichkeit von TSP sind, schneiden die Produkte SESAL-Phos und FIX-Phos mit Werten zwischen 20 und 30 % deutlich schlechter ab. Sie liegen jedoch immer noch weit über der Löslichkeit von RP.

Deutlich schlechter als TSP schneiden alle Produkte beim wasserlöslichen P ab. Dort liegen die Löslichkeiten aller Produkte im Bereich von 1-5 % und entsprechen damit der Löslichkeit von Rohphosphat.

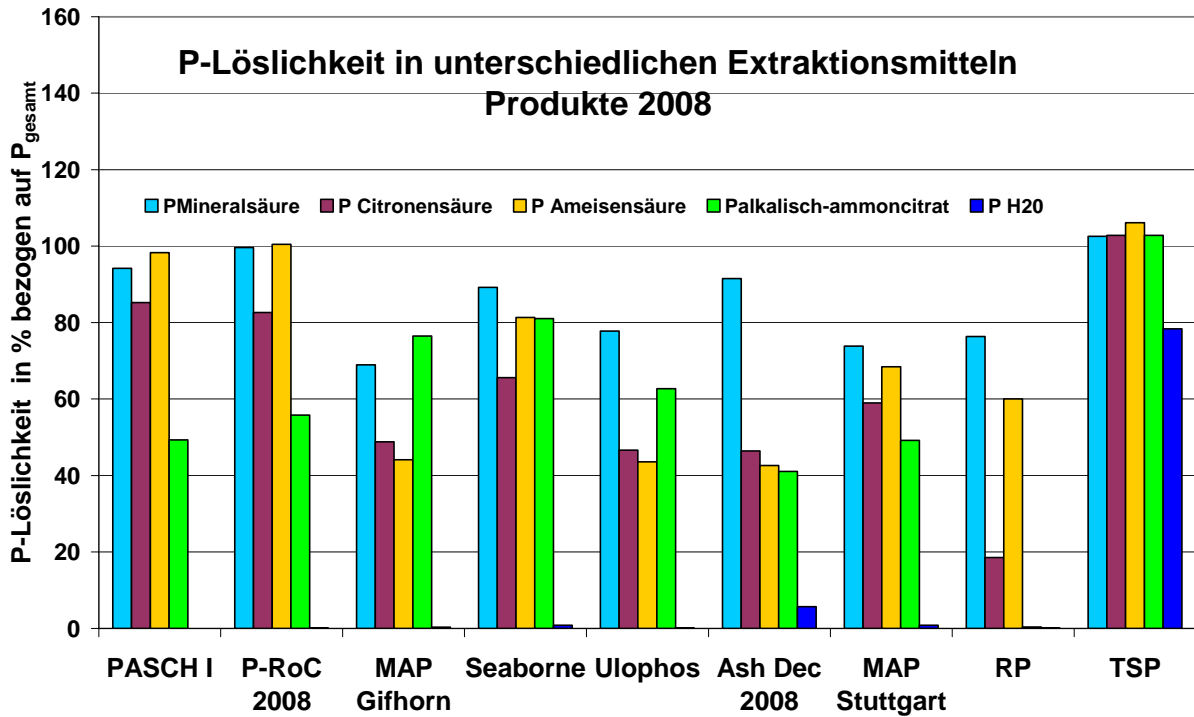


Abb. 1: P-Löslichkeit in unterschiedlichen Extraktionsmitteln der Produkte 2008

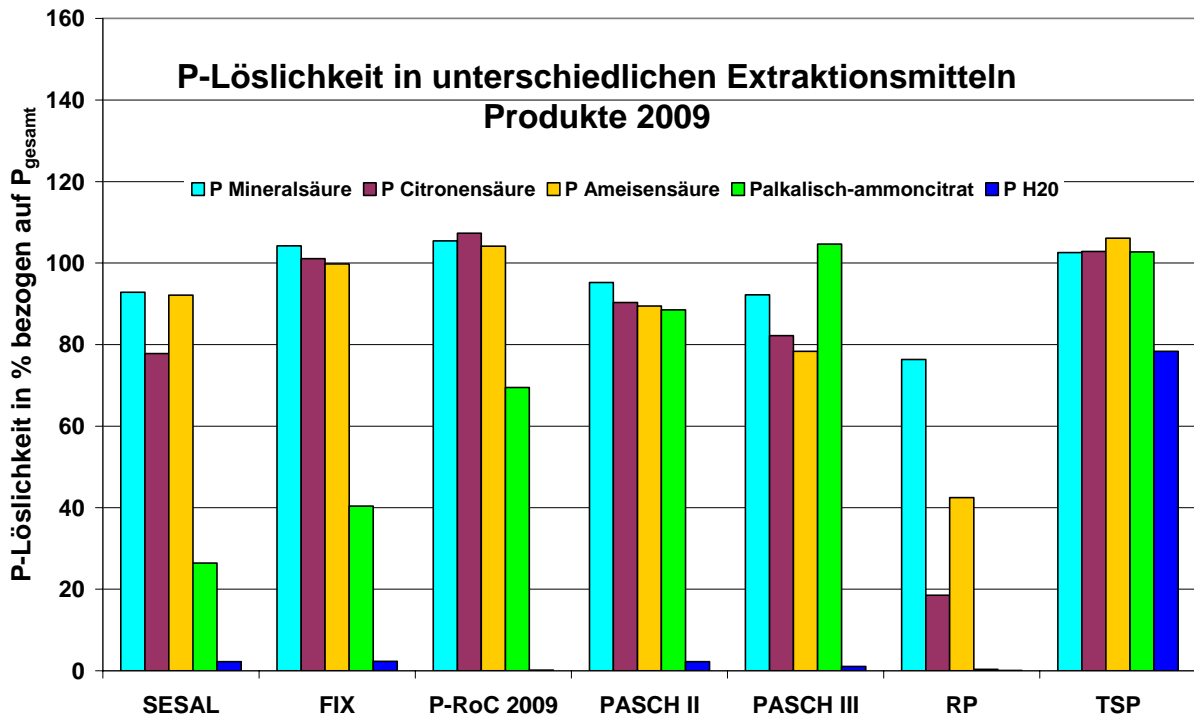


Abb. 2: P-Löslichkeit in unterschiedlichen Extraktionsmitteln der Produkte 2009

Entsprechend den Vorgaben der DüMV (2009) sind die untersuchten Produkte als Rohphosphate bzw. als weicherdeige Rohphosphate mit Magnesiumanteil einzustufen. Aufgrund der geringen Wasserlöslichkeit muss bei den getesteten Produkten nur von einer langsamen P-Freisetzung ausgegangen werden. Daher sind die Produkte eher als Grunddünger geeignet und nicht zur kurzfristigen Behebung einer P-Mangelsituation.

4.2 Calciumacetat-lactat lösliches P (P_{CAL})

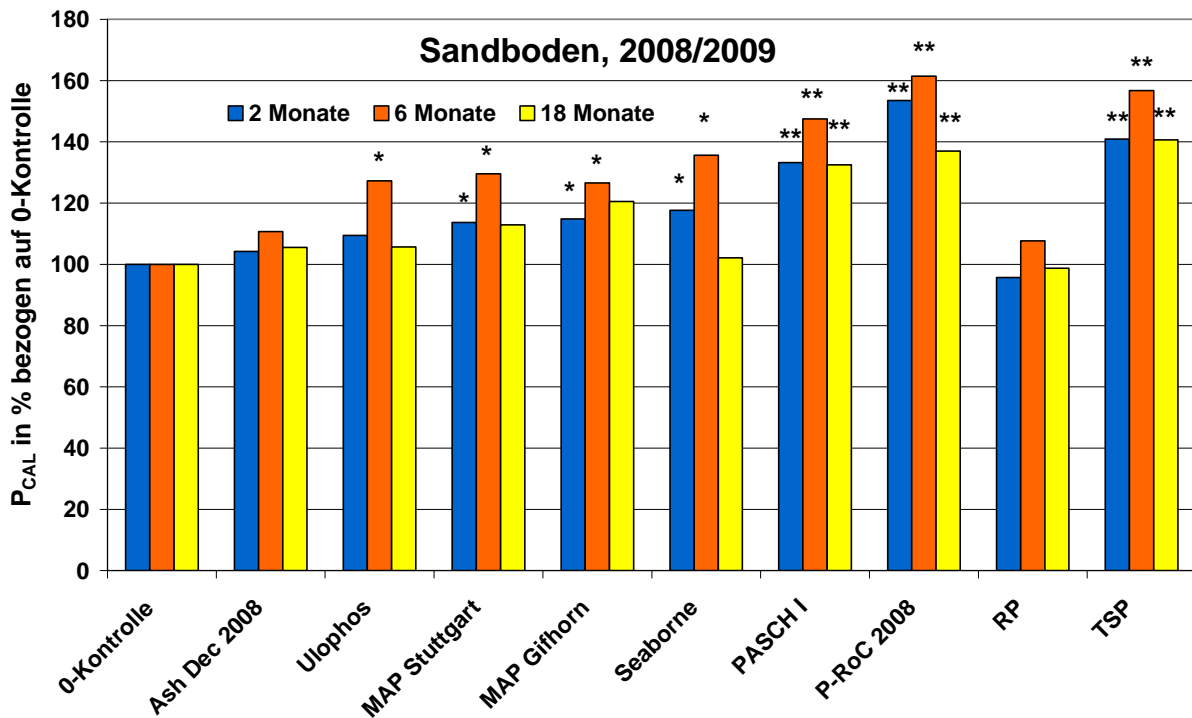


Abb. 3: Veränderung von P_{CAL} auf dem Sandboden in Bezug auf die 0-Kontrolle des Versuchsansatzes 2008/2009

P_{CAL} wird in der Landwirtschaft als Parameter für den pflanzenverfügbaren Phosphor verwendet. In den Abbildungen 3 bis 6 wird die prozentuale Veränderung von P_{CAL} durch die getesteten Produkte in Bezug zur 0-Kontrolle (ohne P-Düngung) angegeben. Mit „*“ markierte Säulen kennzeichnen einen signifikanten Unterschied gegenüber der 0-Kontrolle, mit „**“ markierte Säulen entsprechen in ihrer Wirkung der TSP Vergleichsvariante.

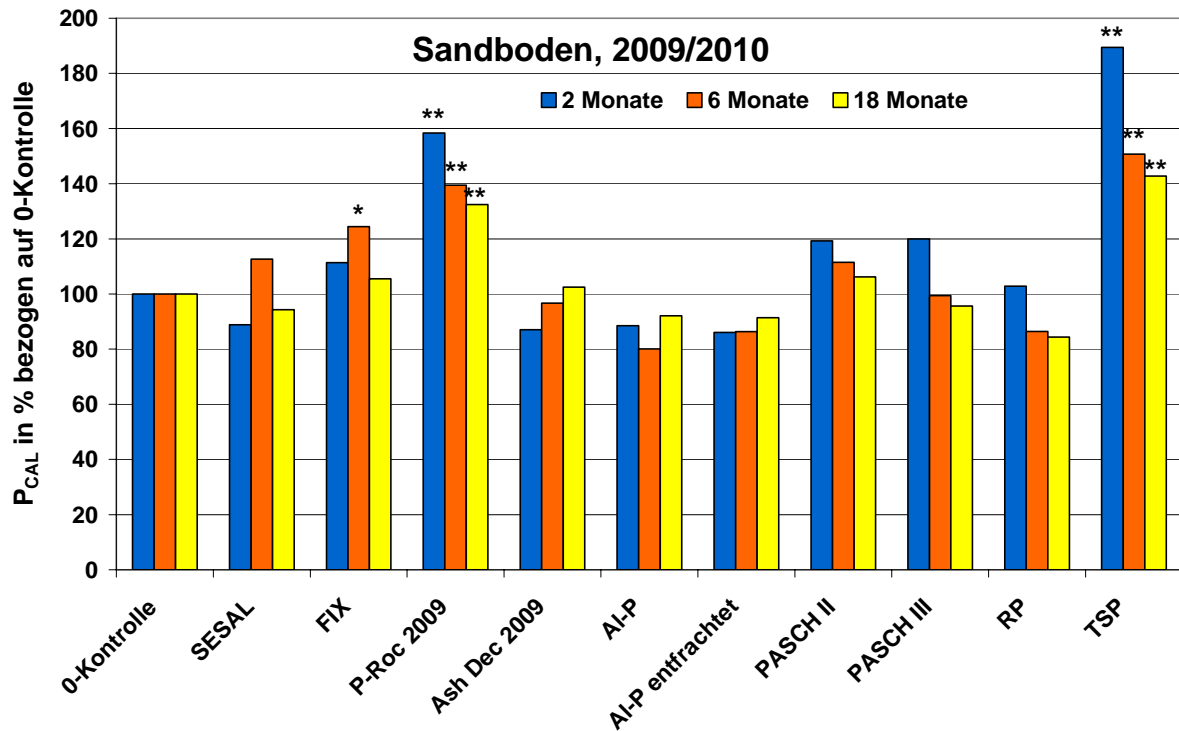


Abb. 4: Veränderung von P_{CAL} auf dem Sandboden in Bezug auf die 0-Kontrolle des Versuchsansatzes 2009/2010

Eine dem TSP vergleichbare Wirkung auf P_{CAL} zeigen auf dem Sandboden die Produkte P-RoC 2008 und 2009 sowie PASCH I (Abb. 3 und 4). Eine signifikante Erhöhung gegenüber der 0-Kontrolle wird auch bei den drei MAP-Produkten (Gifhorn, Stuttgart und Seaborne) zu den beiden ersten Probenahmeterminen beobachtet. Die Produkte FIX-Phos und Ulophos zeigen nur beim mittleren Probenahmetermin nach sechs Monaten eine signifikante Erhöhung von P_{CAL} . Eine, wenn auch nicht signifikante Abnahme ist bei den beiden Al-P Produkten zu beobachten, sowie teilweise für SESAL-Phos und Ash Dec 2009.

Im Gegensatz zum Sandboden bewirken auf den Lehm Böden fast alle Produkte eine signifikante Erhöhung von P_{CAL} zu allen Probenahmeterminen. Dabei sind alle PASCH Produkte, die beiden P-RoC Produkte, Al-P_{entfrachtet} und FIX-PHOS in ihrer Wirkung vergleichbar mit TSP, die übrigen Produkte erhöhen P_{CAL} signifikant gegenüber der 0-Kontrolle (Abb. 5 und 6). Ausnahme ist das Ash Dec 2008, bei dem nur bei der mittleren Probenahme eine signifikante Erhöhung von P_{CAL} zu beobachten ist.

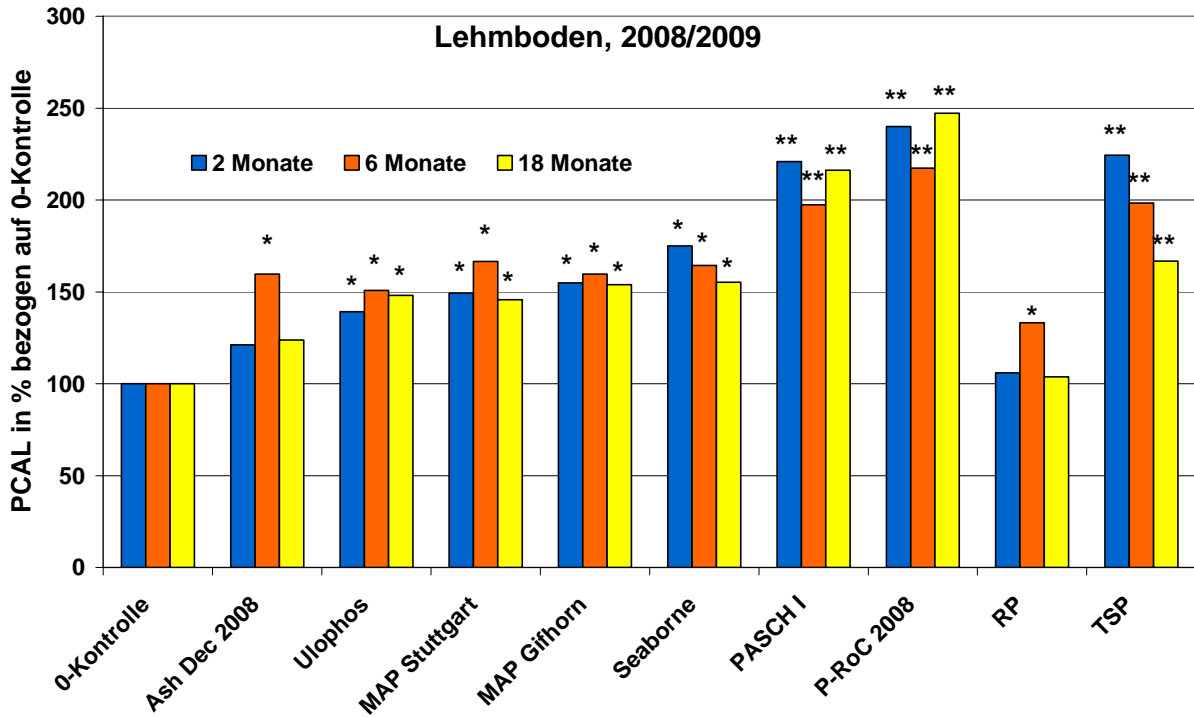


Abb. 5: Veränderung von P_{CAL} auf dem Lehmboden in Bezug auf die 0-Kontrolle des Versuchsansatzes 2008/2009

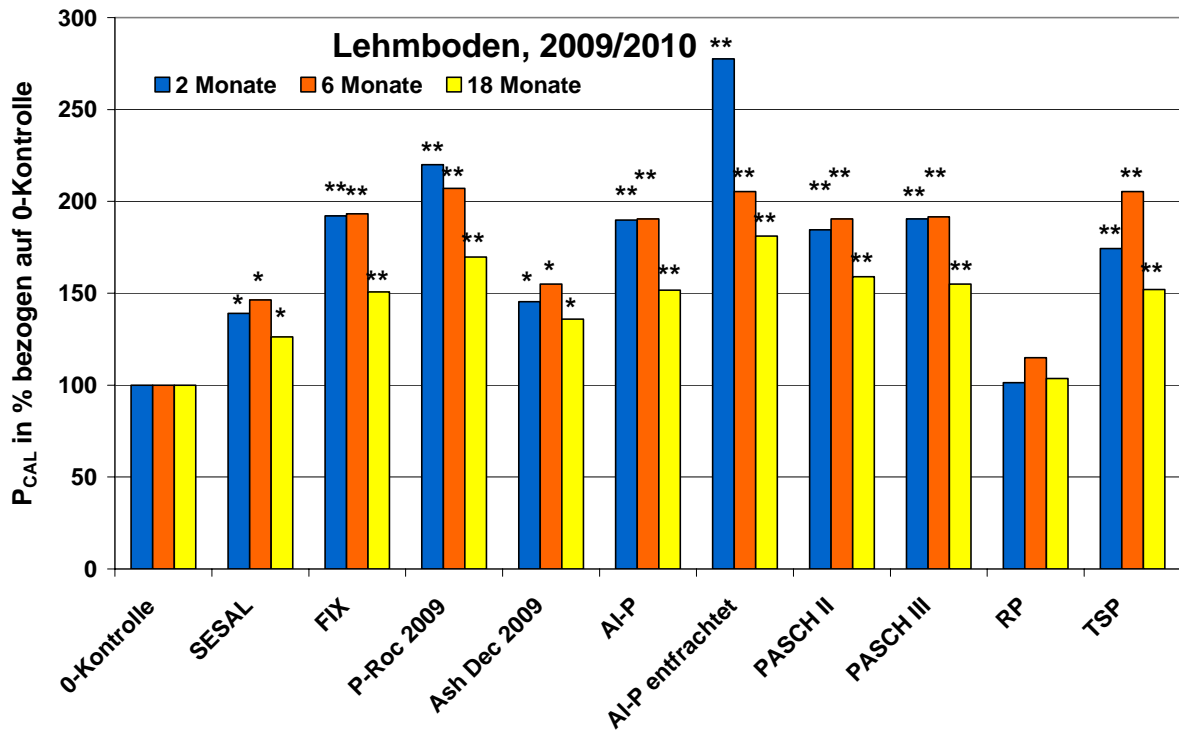


Abb. 6: Veränderung von P_{CAL} auf dem Lehmboden in Bezug auf die 0-Kontrolle des Versuchsansatzes 2009/2010

Die bessere Wirkung auf den Lehmböden zeigt sich auch in der absoluten Erhöhung von P_{CAL} . Auf dem Sandboden wird ein maximaler Anstieg von ca. 90 % gegenüber der 0-Kontrolle erreicht, bei den Lehmböden bis zu 180 %. Dies ist in erster Linie mit dem geringeren P_{CAL} -Gehalt der Lehmböden zu erklären (49 bzw. 33 mg/kg) gegenüber 57 mg/kg beim Sandboden.

4.3 P in Bodenlösung (P_{10})

P_{CAL} stellt eine Vorratsform für P dar, die mehr oder weniger schnell pflanzenverfügbar ist. Da P von den Pflanzen jedoch nur in gelöster Form als Orthophosphat aufgenommen werden kann, ist die Konzentration von P in der Bodenlösung eine wichtige Größe zur Beurteilung der Versorgungssituation. Sie ist allerdings nur aufwändig festzustellen. Eine Möglichkeit ist die Gewinnung der Bodenlösung und die anschließende Bestimmung des darin gelösten P. Da dafür aber meist relative große Mengen an Bodenmaterial benötigt werden (> 100 g), wurde in diesem Fall darauf verzichtet und die P-Konzentration in der Bodenlösung aus Sorptionskurven ermittelt.

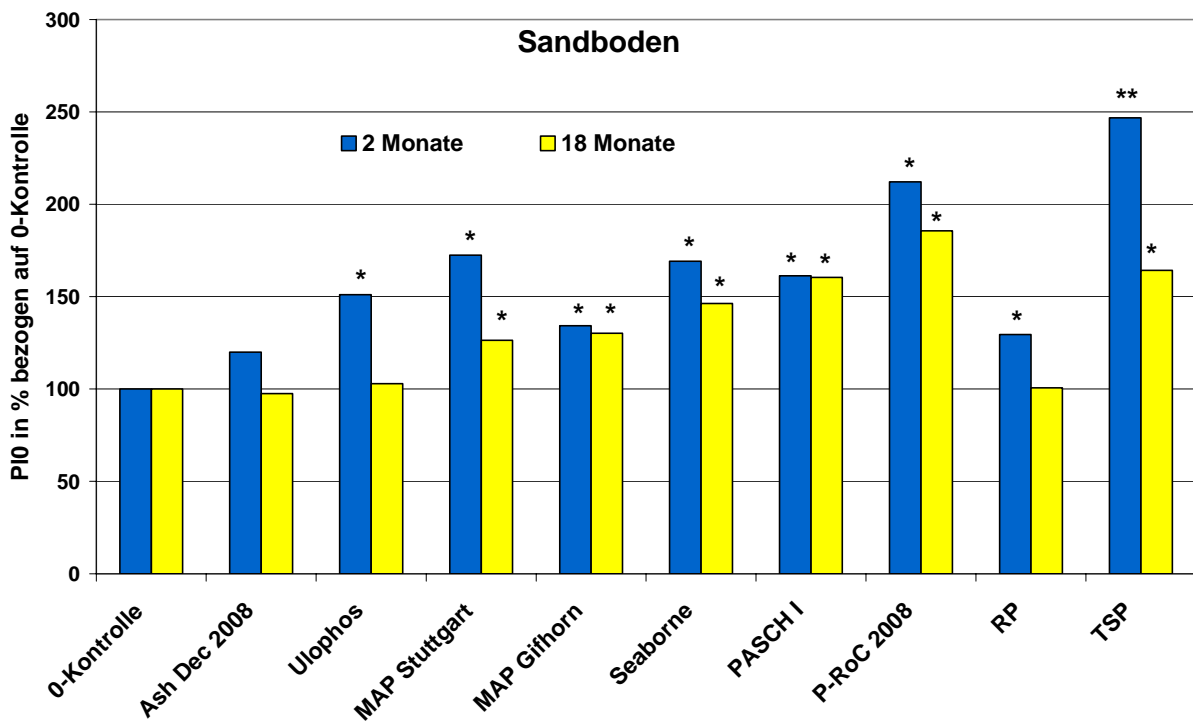


Abb. 7: Veränderung von P_{10} auf dem Sandbodenboden in Bezug auf die 0-Kontrolle des Versuchsansatzes 2008/2009

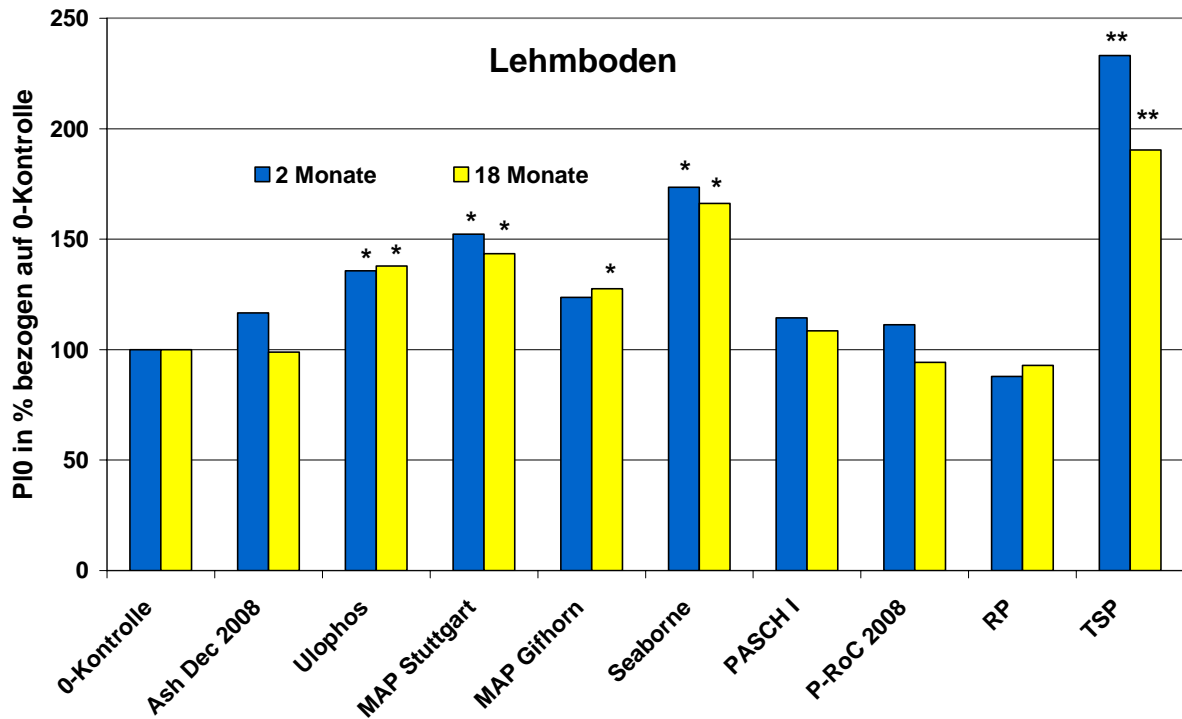


Abb. 8: Veränderung von P_{10} auf dem Lehmboden in Bezug auf die 0-Kontrolle des Versuchsansatzes 2008/2009

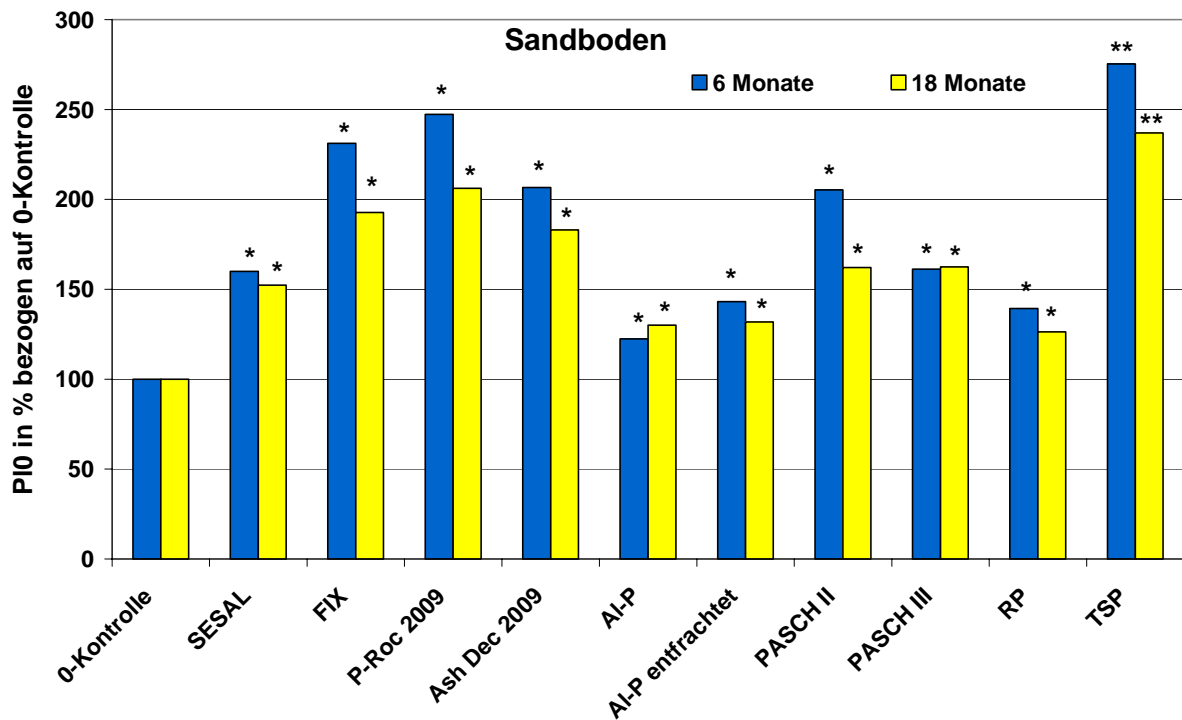


Abb. 9: Veränderung von P_{10} auf dem Sandboden in Bezug auf die 0-Kontrolle des Versuchsansatzes 2009/2010

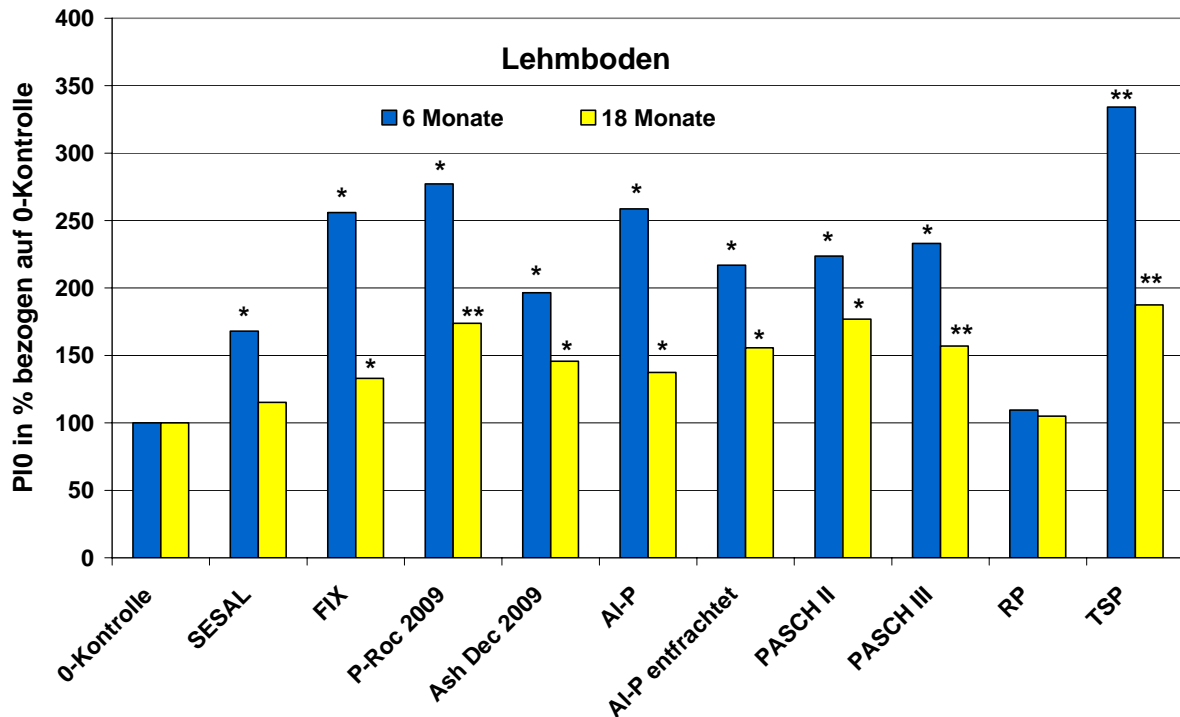


Abb. 10: Veränderung von P_{10} auf dem Lehmboden in Bezug auf die 0-Kontrolle des Versuchsansatzes 2009/2010

Die getesteten Produkte wirken auf die Konzentration in der Bodenlösung (P_{10}) sehr unterschiedlich. Die Materialien des ersten Versuchsansatzes (2008/2009) zeigen auf dem Sandboden mit Ausnahme von Ash Dec 2008 und zeitweise auch Ulophos keine signifikante Steigerung von P_{10} . (Abb. 7) Die übrigen Produkte erhöhen P_{10} zwar signifikant gegenüber der 0-Kontrolle, erreichen jedoch mit Ausnahme von P-RoC 2008 nicht die Wirksamkeit von TSP. Auf dem Lehmboden ist die Wirkung schlechter, dort zeigen nur Ulophos, und die drei MAP-Produkte einen signifikanten Anstieg von P_{10} ohne die Wirkung von TSP zu erreichen (Abb. 8). Die im zweiten Versuchsansatz untersuchten Produkte zeigen auf dem Sandboden zu beiden Probenahmeterminen einen signifikanten Mehrertrag im Vergleich zur 0-Kontrolle (Abb. 9), auf dem Lehmboden (Abb. 10) führt nur SESAL-PHOS bei der zweiten Probenahme nicht zu einer signifikanten Steigerung von P_{10} . Allerdings wird auch von diesen Produkten nicht die Wirkung von TSP erreicht. Dieses Ergebnis überrascht jedoch nicht, da TSP eine hohe Wasserlöslichkeit aufweist und somit sehr schnell als gelöstes Orthophosphat in der Bodenlösung vorliegt. Positiv zu vermerken ist, dass kein Produkt zu einer Abnahme von P_{10} führt, wie es z. B. von Römer & Samie (2002) bei Klärschlämmen beobachtet werden konnte.

Bei allen Varianten, besonders beim TSP, ist eine relative Abnahme von P_{10} bei späteren Probenahmeterminen zu beobachten. Dies ist auf die zunehmende Sorption von P zurückzuführen, die zu einer festeren Bindung an z. B. Eisenoxiden führt.

4.4 Technische Produktqualität

Neben der Düngewirkung und einer möglichen Schadstoffbelastung ist für die Verwendung als Dünger auch die technische Produktqualität von Bedeutung. Dabei spielt vor allem das Partikelspektrum sowie die Hygroskopie eine Rolle.

Tabelle 2: Siebdurchgang der untersuchten Produkte bei 0,63 mm und 0,063 mm in % der Gesamtmasse

Probenbez.	Frakt. <0,63mm	Frakt. <0,063mm
	[%]	[g]
Pasch I	90,8	20,10
P-RoC 2008	99,15	37,90
MAP Gifhorn	88	42,35
Seaborne	71,05	52,80
Ulophos	98,25	26,40
Ash Dec 2008	99,75	31,55
MAP Stuttgart	98,85	54,10
SESAL-PHOS	92,45	28,55
P-RoC 2009	98,95	1,00
Pasch II	64,15	15,90
Pasch III	37,8	9,05

Das Partikelspektrum ist für die Ausbringung mit dem Düngerstreuer von Bedeutung. Für die im Projekt untersuchten Düngemittel wurde der Siebdurchgang bei 0,63 mm und 0,063 mm bestimmt. Da die meisten untersuchten Produkte in den Bereich der weicherdigen Rohphosphate fallen, sollte dort der Siebdurchgang bei 0,063 mm 90 % betragen (DüMV, 2008). Wie in Tabelle 2 aufgeführt erreicht keines der getesteten Produkte diese Vorgabe und kann damit nach Düngemittelverordnung nicht als Dünger verwendet werden. Allerdings ist eine weitere Aufbereitung der Produkte, z.B. feinere Vermahlung, technisch ohne größere Probleme machbar, so dass bei einer Produktion im industriellen Maßstab die Vorgaben eingehalten werden können.

Ein weiterer wichtiger Punkt für die technische Handhabung ist die Lagerfähigkeit der Produkte. Bei der Lagerfähigkeit ist in erster Linie die Hygroskopie von Bedeutung, d.h. die Fähigkeit der Produkte Wasser aus der Umgebung, v.a. aus der Umgebungsluft aufzunehmen.

Wie Tab. 3 zeigt, tritt nach vierwöchiger Lagerung (25 °C, 70% Luftfeuchtigkeit) nur eine geringe Gewichtszunahme und damit eine geringe Hygroskopie auf. Nur das Produkt Pasch II weist mit ca. 7 % eine etwas höhere Wasseraufnahme auf. Eine Verklumpung des Materials trat jedoch nicht auf. Die beiden Al-P-Produkte konnten aufgrund zu wenig gelieferten Materials nicht untersucht werden, allerdings wies das bei den Inkubations- und Pflanzenversuche verwendete Al-P_{entfrachtet} ein nahezu pastöse Konsistenz auf, die eine Einarbeitung erschwerte.

Mit Ausnahme von Al-P_{entfrachtet} sind damit von Seite der technischen Handhabung grundsätzlich alle Produkte für eine Verwendung mit herkömmlichen Düngerstreuern geeignet.

Tabelle 3: Gewichtszunahme der Produkte bei vierwöchiger Lagerung

Produkt	Veränderung in %
Ulophos	0,03
Ash Dec 2008	0,27
TSP	0,11
Pasch 1	1,71
Seaborne	0,00
Pasch 2	6,61
P-Roc 2008	0,77
RP	0,00
SESAL-Phos	3,07
Pasch 3	1,18
MAP Stuttgart	0,04
FIX-Phos	0,00
P-RoC 2009	1,86
Ash Dec 2009	2,51
MAP Gifhorn	0,09

5. Zusammenfassung

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die betrachteten Produkte hinsichtlich der Löslichkeit mit Rohphosphaten bzw. mit weicherdigen Rohphosphaten verglichen werden können, da sie nur eine geringe Wasserlöslichkeit aufweisen. Ihre Wirkung auf Parameter der P-Versorgung im Boden liegt zwischen der von Rohphosphat und TSP, wobei die Wirkung auf den Vorrat (P_{CAL}) besser ist als die Wirkung auf das in der Bodenlösung sofort verfügbare P (P_{10}). Aus Sicht der technischen Produktqualität zeigen mit einer Ausnahme alle Produkte eine geringe Hygroskopie und damit eine gute Lagerfähigkeit. Das Korngrößenspektrum ist durch technische Maßnahmen leicht an die Anforderungen von Düngerstreuern anzupassen, so dass die Produkte durchaus aus Sicht der betrachteten Parameter als geeignete P-Dünger anzusehen sind. Aufgrund der geringen Wasserlöslichkeit sollten sie jedoch nur zur Grunddüngung verwendet werden und nicht beim Vorliegen eines akuten P-Mangels.

Literatur

- Cordell, D., Drangert, J.-O. & White, S. (2009): The story of Phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, 19, 2, S. 292-305
- DÜMV, (2009): Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln
- IVA (2008): Jahresbericht 2007/2008. Report Industrieverband Agrar, Frankfurt, Germany
- Pradt, D. (2003): Verfügbarkeit und Vermarktung von Roh- und Recyclingmaterial aus Sicht der Düngemittelindustrie. Tagungsband Rückgewinnung von Phosphor in der Landwirtschaft und aus Abwasser und Abfall, S. 2/1 – 2/5
- Römer, W. & Samie, I. F. (2002): Phosphordüngewirkung eisenhaltiger Klärschlämme. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 165, 83-91.
- Scheinost (1994): Pedotransferfunktionen zum Wasser- und Stoffhaushalt einer Bodenlandschaft. Dissertation TU-München, Shaker-Verlag, 176 S.
- VDLUFA (1991): Bestimmung von Phosphor und Kalium im Calcium-Acetat-Lactat-Auszug. Methodenbuch Band I. Die Untersuchung von Böden. VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- VDLUFA (1995): Methodenbuch II, Untersuchung von Düngemitteln

Anschrift des Verfassers:

Dipl.-Ing. Karlheinz Weinfurtner
Fraunhofer-Institut für Molekularbiologie und Angewandte Oekologie IME-AE
Auf dem Aberg 1
57392 Schmallenberg
E-Mail: karlheinz.weinfurtner@ime.fraunhofer.de