LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE

Freistaat
SACHSEN

Verbesserung der P-Effizienz im Pflanzenbau

Schriftenreihe, Heft 9/2013

Strategie zur Verbesserung der P-Effizienz im Pflanzenbau

Franziska Heinitz, Katharina Farack, Dr. habil. Erhard Albert

Inhalt

1 Einleitung ... 8
1.1 Motivation ... 8
1.2 Vorkommen und Bedeutung von Phosphor ... 9
1.3 Phosphordüngung ... 9
1.4 Entwicklung der P-Bilanzen und Gehaltsklassen ... 11
1.5 Phosphorbelastung der Gewässer ... 13
2 Versuche zur Steigerung der P-Effizienz ... 14
2.1 Hinweise zur Versuchsdurchführung und -auswertung ... 14
2.2 Versuche zu P-Dünge-Applikationsverfahren ... 14
2.2.1 P-Unterfußdüngung ... 15
2.2.2 P- Injektion ... 29
2.3 P-Dünger aus Klärschlamm nach Hochtemperaturschmelzbehandlung (Mephrec®-Verfahren) ... 35
3 Zusammenfassung ... 42
Quellen ... 44

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Weltproduktion an Rohphosphat (U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2011) 9
Abbildung 2: Entwicklung der jährlichen und kumulativen P-Bilanz [kg/ha] für Sachsen 1961 bis 2011 11
Abbildung 3: Preisentwicklung und Entwicklung des Inlandsabsatzes an Phosphatdüngern Deutschland 1993 bis 2011 11
Abbildung 4: Entwicklung der P-Gehaltsklassen in Sachsen (Grundlage BEFU; ALBERT & SUNTHEIM 2004) 12
Abbildung 5: Mineralische P-Düngung in Abhängigkeit von den verfügbaren P-Gehalten des Bodens 12
Abbildung 6: Karte zur P-Belastung sächsischer Fließgewässer auf Grundlage gewässertypspezifischer Orientierungswerte 13
Abbildung 7: Mittlerer Kornertrag (TM) von Winterweizen in Abhängigkeit von der P-Düngung 16
Abbildung 8: Mittlerer Kornertrag (TM) von Winterweizen und von Sommergerste im Nachbau in Abhängigkeit von der P-Düngung 16
Abbildung 9: Mittlerer P-Entzug (Korn+Stroh) von Winterweizen in Abhängigkeit von der P-Düngung 18
Abbildung 10: Mittlerer P-Entzug (Korn+Stroh) von Winterweizen und von Sommergerste im Nachbau in Abhängigkeit von der P-Düngung 18
Abbildung 11: Beziehung zw. P-Saldo und TM-Ertrag der Fruchtfolge WW-SG in Abhängigkeit von der P-Düngung 19
Abbildung 12: Beziehung zw. P-Saldo und P_{CAL}-Gehalt im Boden nach der Fruchtfolge WW-SG in Abhängigkeit von der P-Düngung 19
Abbildung 13: Beziehung zw. P_{CAL}-Gehalt im Boden nach Ernte der SG und TM-Ertrag der Fruchtfolge WW-SG in Abhängigkeit von der P-Düngung 19
Abbildung 14: Mittlerer Kornertrag (TM) von Sommergerste in Abhängigkeit von der P-Düngung 21
Abbildung 15: Mittlerer TM-Ertrag von Sommergerste und von Silomais im Nachbau in Abhängigkeit von der P-Düngung 21
Abbildung 16: Mittlerer P-Entzug (Korn) von Sommergerste in Abhängigkeit von der P-Düngung 22
Abbildung 17: Mittlerer P-Entzug von Sommergerste (Korn +Stroh) und von Silomais im Nachbau in Abhängigkeit von der P-Düngung 22
Abbildung 18: Beziehung zw. P-Saldo und TM-Ertrag der Fruchtfolge SG-SM in Abhängigkeit von der P-Düngung 22
Abbildung 19: Beziehung zw. P-Saldo und P_{CAL}-Gehalt im Boden nach der Fruchtfolge SG-SM in Abhängigkeit von der P-Düngung 22
Abbildung 20: Beziehung zw. P_{CAL}-Gehalt im Boden nach Ernte von SM und TM-Ertrag der Fruchtfolge SG-SM in Abhängigkeit von der P-Düngung 23
Abbildung 21: Mittlerer TM-Ertrag von Silomais in Abhängigkeit von der P-Düngung 24
Abbildung 22: Mittlerer P-Entzug von Silomais in Abhängigkeit von der P-Düngung 24
Abbildung 23: Cross-Slotgerät der HTW Dresden 26
Abbildung 24: Schema Saatgut- und Düngerablage mit Cross-Slot-Technik (ALBERT 2012) 26
Abbildung 25: Temperaturverlauf und Niederschlagsverteilung Forchheim in den Versuchsjahren 2010/2011 und 2011/2012 im Vergleich zum langjährigen Mittel (langjähriges Mittel seit 1999) 27
Abbildung 26: Mittlere sowie minimale und maximale Sommergerstenerträge [dt/ha, 86 % TS] in Abhängigkeit von der P-Düngung 28
Abbildung 27: Mittlere sowie minimale und maximale Winterrapserträge [dt/ha, 91 % TS] in Abhängigkeit von der P-Düngung 28
Abbildung 28: Temperaturverlauf und Niederschlagsverteilung Pommritz in den Versuchsjahren 2010/2011 und 2011/2012 im Vergleich zum langjährigen Mittel (langjähriges Mittel seit 1994) 30
Abbildung 29: Mittlere sowie minimale und maximale Wintergerstenerträge [dt/ha, 86 % TS] in Abhängigkeit von der P-Düngung 31
Abbildung 30: Mittlere sowie minimale und maximale Winterrapserträge [dt/ha, 91 % TS] in Abhängigkeit von der P-Düngung 31
Abbildung 31: Temperaturverlauf und Niederschlagsverteilung Kitzscher im Versuchsjahr 2011 im Vergleich zum langjährigen Mittel 33
Abbildung 32: P-Gehalte [kg/ha] im Blatt in Abhängigkeit von der P-Düngung, Praxisversuch P-Injektionsdüngung (Juni 2011) 34

Abbildung 33: Änderung der P_{CAL}-Gehalte im Boden in Abhängigkeit der Düngung, Praxisversuch P-Injektionsdüngung (Einteilung der Gehaltsklassen nach DüV Sachsen) 34
Abbildung 34: Kartoffelertrag in Abhängigkeit von der P-Applikation, Kitzscher 35
Abbildung 35: Anzahl Knollen je Pflanze und Größensortierung in Abhängigkeit der P-Applikation, Kitzscher 35
Abbildung 36: P-Gehalte der verwendeten Schlacken im Gefäßversuch alternativer P-Dünger (Mephrec®-Verfahren) 38
Abbildung 37: Gefäßversuch alternative P-Dünger aus dem Mephrec®-Verfahren – relativer und absoluter Kornertrag 40
Abbildung 38: Gefäßversuch alternative P-Dünger aus dem Mephrec®-Verfahren - Relative agronomische Effizienz der eingesetzten Schlacken (GD_{Tukey}, 5 % = 11,1) 40
Abbildung 39: Gefäßversuch alternative P-Dünger aus dem Mephrec®-Verfahren – N-Entzug (Korn+Stroh) in Abhängigkeit vom Düngemittel (GD_{Tukey}, 5 % = 0,46) 40
Abbildung 40: Gefäßversuch alternative P-Dünger aus dem Mephrec®-Verfahren – relativer und absoluter P-Entzug (Korn+Stroh) 41
Abbildung 41: Gefäßversuch alternative P-Dünger aus dem Mephrec®-Verfahren – P_{CAL}-Gehalte im Boden nach Ernte der Sommergerste in Abhängigkeit von der P-Düngung 41

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: P-Einträge von Ackerflächen in Oberflächengewässer sächsischer Naturraumregionen (HALBFASS et al. 2005) 13
Tabelle 2: Prüfglieder Gefäßversuch zur P-Applikation 15
Tabelle 3: Bodenparameter Gefäßversuch P-Applikation 15
Tabelle 4: N- und K-Düngung Gefäßversuch P-Applikation 15
Tabelle 5: Ertragsparameter Gefäßversuch P-Düngung Winterweizen 16
Tabelle 6: Wirkung verschiedener P-Applikationsverfahren zu Winterweizen auf den Nachbau mit Sommergerste 17
Tabelle 7: P- und N-Entzüge Gefäßversuch P-Düngung Winterweizen 17
Tabelle 8: Ertragsparameter Gefäßversuch P-Düngung Sommergerste 20
Tabelle 9: Wirkung verschiedener P-Applikationsverfahren zu Sommergerste auf den Nachbau mit Silomais 20
Tabelle 10: P- und N-Entzüge Gefäßversuch P-Düngung Sommergerste 21
Tabelle 11: Ertrag sowie P-und N-Entzug Gefäßversuch P-Düngung Silomais 23
Tabelle 12: Charakterisierung Versuchsstandort Forchheim (V, sL) vor Anlage des Versuches 25
Tabelle 13: Feldversuch zur Unterfußdüngung Forchheim - geprüfte Varianten 25
Tabelle 14: Ertrag, Rohproteingehalt und P-Entzug von Sommergerste in Abhängigkeit von der P-Düngung (Forchheim, 2011) 28
Tabelle 15: Ertrag, Ölgehalt und P-Entzug von Winterraps in Abhängigkeit von der P-Düngung (Forchheim, 2012) 29
Tabelle 16: Feldversuch zur P-Unterfußdüngung Forchheim - P_{CAL}- und pH-Werte unterschiedlicher Bodentiefen 29
Tabelle 17: Feldversuch zur P-Injektion Pommritz - geprüfte Varianten 30
Tabelle 18: Ertrag, Rohproteingehalt und P-Entzug von Wintergerste in Abhängigkeit von der P-Düngung (Pommritz, 2011) 31
Tabelle 19: Ertrag, Ölgehalt und P-Entzug von Winterraps in Abhängigkeit von der P-Düngung (Pommritz, 2012) 32
Tabelle 20: Feldversuch zur P-Injektion Pommritz - P_{CAL}- und pH-Werte unterschiedlicher Bodentiefen 32
Tabelle 21: Prüfglieder Praxisversuch P-Injektionsdüngung Kitzscher 32
Tabelle 22: Kartoffelertrag, P- und Stärkegehalt in Abhängigkeit von der P-Applikation, Praxisversuch P-Injektionsdüngung Kitzscher 34
Tabelle 23: Anzahl Knollen je Pflanze und Größensortierung in Abhängigkeit der P-Applikation, Praxisversuch P-Injektionsdüngung Kitzscher 35
Tabelle 24: Phosphormengen verschiedener Abfälle und Reststoffe (LAGA 2012; PINNEKAMP 2011) 35
Tabelle 25: Inhaltstoffe und Zusammensetzung der verwendeten Schlacken im Gefäßversuch alternativer P-Dünger (Mephrec®-Verfahren) 37
Tabelle 26: Phosphorgehalte der verwendeten Schlacken im Gefäßversuch alternativer P-Dünger (Mephrec®-Verfahren) 37
Tabelle 27: Ertragsparameter Gefäßversuch alternativer P-Dünger (Mephrec®-Verfahren) 39
Tabelle 28: P- und N-Entzüge Gefäßversuch alternativer P-Dünger (Mephrec®-Verfahren) 39

BEFU	Programm zur Düngebedarfsermittlung in Sachsen
DAP	Diammonphosphat
DüV	Düngeverordnung
GK	Gehaltsklasse
K	Kalium
KAS	Kalkammonsalpeter
MAP	Monoammoniumphosphat
MW	Mittelwert
N	Stickstoff
n. b.	nicht bestimmt
Nmin	mineralischer Stickstoff
n. s.	nicht signifikant
P	Phosphor
P_{CAL}	Calcium-Acetat-Lactat-löslicher Phosphor (pflanzenverfügbarer Phosphor)
PG	Prüfglied
P_t	Gesamtphosphor
P_w	wasserlöslicher P
SG	Sommergerste
SM	Silomais
SP	Superphosphat
TM	Trockenmasse
TSP	Triplesuperphosphat
VB	Vegetationsbeginn
WRa	Winterraps
WW	Winterweizen

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Versorgung mit Phosphor (P) als essentiellem Pflanzennährstoff spielt im Pflanzenbau zur Sicherung von hohen Erträgen und guten Qualitäten eine entscheidende Rolle. Das gilt insbesondere unter den zu erwartenden Klimaveränderungen, die für Sachsen häufiger auftretende und länger anhaltende Trockenperioden prognostizieren. Unter derartigen Bedingungen ist eine ausreichende P-Versorgung für die Ertragshöhe und -stabilität sowie für die Verwertung des gedüngten Stickstoffs von ausschlaggebender Bedeutung. Weil die abbaubaren, natürlichen Phosphorvorkommen aber endlich sind, ist ein effizienter und Ressourcen schonender Phosphoreinsatz in der Landwirtschaft notwendig.

Der Preisanstieg bei den mineralischen P-Düngern der letzten Jahre sorgt bereits dafür, dass bei keinem anderen Nährstoff der Kostenfaktor so im Mittelpunkt steht wie beim Phosphor. Die Folge ist ein starker Rückgang in der Höhe der mineralischen P-Düngung. Die pflanzenverfügbaren P-Gehalte im Boden nehmen ab, was sich früher oder später auch auf Ertrag und Qualität der Ernteprodukte auswirken wird.

Auf der anderen Seite zählt Phosphor vor allem infolge von Erosionsprozessen zu einer der Hauptbelastungsgrößen von Gewässern. Ein sparsamer und zugleich aber auch wirkungssicherer und kostengünstiger P-Düngereinsatz bei optimaler Pflanzenernährung dient damit auch dem Ziel, umweltbelastende Nährstoffeinträge in die Gewässer zu minimieren und somit einen Beitrag zur Umsetzung der europäischen Wasserrahmenrichtlinie zu leisten.

Im Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie wurden verschiedene Strategien zur Verbesserung der P-Düngeeffizienz im Pflanzenbau untersucht und bewertet. Inhaltliche Schwerpunkte waren:

- Untersuchungen zu Auswirkungen unterschiedlicher Düngungsverfahren auf die verfügbaren P-Gehalte und die P-Festlegung im Boden vor allem auf P-verarmten Standorten
- Erprobung neuer technischer Lösungen zur wurzelnahen P-Applikation in Hinblick auf Ertragsbildung und -stabilität sowie P-Verwertung bei verschiedenen Fruchtarten
- Untersuchung zum Einsatz alternativer P-Quellen im Vergleich zum mineralischen P-Dünger (Produkte aus neuen Verfahren des P-Recyclings)

1.2 Vorkommen und Bedeutung von Phosphor

Phosphor wird zum überwiegenden Anteil aus phosphorhaltigen Gesteinen (Rohphosphat) gewonnen. Die größten Vorkommen an mineralischem Phosphat findet man in Afrika (Marokko, Westsahara), in China und den USA (Florida). Im Jahr 2005 ging man noch davon aus, dass die abbauwürdigen Reserven an marktfähigem Rohphosphat etwa 18 Milliarden Tonnen weltweit betragen (Schätzungen des U.S. Geological Survey). Bei einem angenommenen jährlichen Abbau von 160 Millionen Tonnen Rohphosphat (Mittelwert 2005-2010) reicht die Reserve etwa 110 Jahre. Neuesten Erkenntnissen zufolge liegt der abbaubare Vorrat bei 65 Milliarden Tonnen und reicht damit für etwa 400 Jahre (PRADT, BGR 2012). Bedeutsam ist, dass der Abbau von Phosphor immer stärker mit Umweltbeeinträchtigungen verbunden ist und die Produkte zunehmend mit Schwermetallen belastet sind. Gleichzeitig steigt durch das weltweite Bevölkerungswachstum die Nachfrage nach Phosphor an. Daher ist zukünftig mit steigenden Preisen und Lieferengpässen zu rechnen.

Die weltweite jährliche Rohphosphatproduktion, die in etwa auch dem Verbrauch an Rohphosphat entspricht, ist seit 1900 von drei Millionen auf über 180 Millionen Tonnen im Jahr 2010 angestiegen (Abbildung 1). Von dem gesamten geförderten Rohphosphat werden 90 % in der Landwirtschaft in Form von anorganischen Phosphatdüngern und Futterphosphaten eingesetzt.

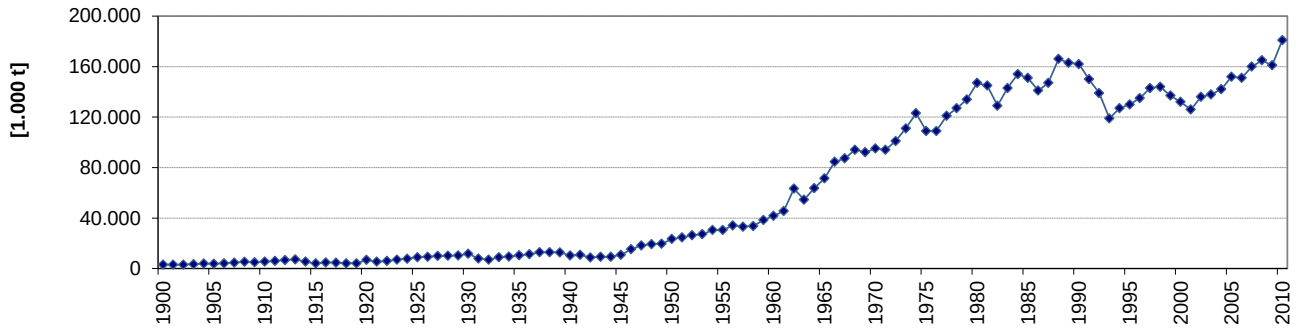

Abbildung 1: Weltproduktion an Rohphosphat (U.S. GEOLOGICAL SURVEY 2011)

Als lebenswichtiger Nährstoff steuert Phosphor viele physiologische und biochemische Prozesse in den Pflanzen. In Form von Phosphoproteiden oder Phospholipoiden fungiert er als Zellbaustein der Aufrechterhaltung der Zellstruktur. Als Bestandteil in Nukleinsäuren (DNS und RNS) sowie in Enzymen dient er der Übertragung von Erbinformationen und der Steuerung von Zellfunktionen. Des Weiteren spielt Phosphor eine entscheidende Rolle als Bestandteil von Energieträgern (ADP, ATP, NADP) in allen Stoffwechselvorgängen wie Kohlenhydrat,- Fettstoff- und Eiweißstoffwechsel.

1.3 Phosphordüngung

Im Boden unterliegt Phosphor vielfältigen Umsetzungsvorgängen. Von Pflanzen wird Phosphor in Form von Orthophosphat ($H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-}) über die Wurzeln aufgenommen. Allerdings liegt nur 0,1 % des Gesamt-P in der Bodenlösung vor und ist damit direkt für die Pflanzen aufnehmbar. Der überwiegende Anteil kommt im Boden in fester Form vor: anorganisch als primäre Phosphormineralien (Apatit), in sekundären Phosphormineralien (Fe-, Al- oder Ca-Mineralien) oder adsorbiert an Fe- und Al-Hydroxiden bzw. in organischen Verbindungen. Der P-Gesamtgehalt im Boden schwankt zwischen 200 und 800 mg/kg und kann sich durch Düngung deutlich verändern (BLUME et al. 2010).

Die Fe-, Al- oder Ca-Phosphate und die organischen Phytate zählen zu den „stabilen P-Formen“, d. h. sie sind nur schwer mobilisierbar und können nicht zur kurz- und mittelfristigen P-Ernährung der Pflanzen beitragen. Zu den leicht löslichen P-Verbindungen („labiler P-Pool“) sind amorphe Al- und Fe-Oxide oder an Tonminerale sorbiertes Phosphor zu zuordnen, des Weiteren leicht mineralisierbare organisch gebundene Phosphate sowie Ca-, Mg-, Na- und NH_4-Phosphate. Zwischen den verschiedenen P-Formen im Boden besteht ein dynamisches Gleichgewicht. Steigt die P-Konzentration in der Bodenlösung (z. B. durch Düngung) an, wird das gelöste Phosphat relativ schnell in zunächst labile und mit der Zeit in stabile Formen

überführt. Sinken dagegen die Gehalte durch die P-Aufnahme der Pflanze, wird Phosphor aus dem labilen Pool nachgeliefert und somit die Bodenlösung wieder aufgefüllt. Einen entscheidenden Einfluss auf die Löslichkeit der P-Verbindungen im Boden übt der pH-Wert aus. Am höchsten ist sie in einem Bereich zwischen 5,5 und 7,0. Während in sauren Böden Al-Fe-gebundenes Phosphor vorherrscht, werden mit zunehmenden pH-Werten vermehrt Ca-Phosphate gebildet.

Die P-Aufnahme durch die Pflanzen wird beeinflusst durch die räumliche und die chemische Verfügbarkeit des Phosphors im Boden. Im Vergleich zum Bedarf der Pflanzen an Phosphor ist die Konzentration an pflanzenaufnehmbaren P in der Bodenlösung gering. Das heißt, es muss ständig P aus der labilen Phase in die Bodenlösung nachgeliefert werden. Die chemische Verfügbarkeit an Phosphor wird durch die P-Konzentration in der Bodenlösung, den P-Vorrat (bestehend aus labilen und stabilen P-Formen) sowie der P-Dynamik im Boden (Desorptions- und Sorptionsprozesse) bestimmt. Von entscheidender Bedeutung für die räumliche Verfügbarkeit sind das P-Aneignungsvermögen der Pflanze und die vorherrschenden Bodeneigenschaften (Bodenstruktur, -dichte, Wassergehalt, Temperatur). Die Zufuhr an mineralischem Phosphor und eine regelmäßige Kalkung des Bodens zur Erhaltung des standortspezifischen optimalen pH-Wertes können die chemische Verfügbarkeit verbessern. Auch die Zufuhr von P in organischer Form über die Wirtschaftsdünger und die Beachtung einer guten Humusversorgung des Bodens wirken sich positiv aus (Humateffekt). Hierdurch werden die biologische Aktivität und damit die Mineralisierung organischer Phosphate gefördert sowie gleichzeitig die Bildung von schwerlöslichen P-Verbindungen vermindert, was insgesamt die P-Verfügbarkeit erhöht. Das P-Aneignungsvermögen der Pflanzen wird bestimmt durch die Wurzelmorphologie (Wurzelgröße, Wurzelhaare, Rhizosphären-pH, Mycorrhiza) und ist durch genotypische Unterschiede gekennzeichnet. So erfordern Kulturen mit einer geringen Durchwurzelungsintensität (z. B. Zuckerrübe, Kartoffel, Mais) ein höheres P-Angebot als stark durchwurzelndes Getreide.

Grundlage für die P-Düngerbedarfsprognose ist der aktuelle Versorgungszustand des Bodens, das Ertragsniveau und der Nährstoffrückfluss über organische Dünger und Nebenprodukte. Besonders wirksam ist die P-Düngung auf niedrig versorgten Böden der Gehaltsklassen A und B. Eine P-Düngung über dem Entzug führt hier i. d. R. zu deutlichen Mehrerträgen. Für die Gehaltsklasse C der optimalen P-Versorgung von Ackerland mit 4,9…7,2 mg P/100 g Boden (ALBERT et al. 2007) wird eine Erhaltungsdüngung empfohlen, die der Abfuhr mit den Ernteprodukten entspricht. Bei Böden der Gehaltsklasse D und E sollte es langfristig das Ziel sein, Überschüsse abzubauen. Eine P-Düngung ist hier nicht nur ökonomisch nicht sinnvoll, sondern ist auch vor dem Hintergrund des Gewässerschutzes kritisch zu beurteilen.

Neben der optimalen Bemessung der Düngungshöhe spielt auch der Zeitpunkt der Ausbringung eine Rolle. Auf sorptionsstarken, nicht verarmten Böden kann die P-Düngung als zweijährige Vorratsdüngung erfolgen. Niedrig versorgte Standorte sollten dagegen jährlich mit einem P-Dünger mit einer hohen Wasserlöslichkeit (vollaufgeschlossene P-Dünger) gedüngt werden. Teilaufgeschlossene P-Dünger sind aufgrund ihrer langsamen Wirksamkeit und auch aufgrund ihrer pH-Abhängigkeit nur sehr eingeschränkt zu empfehlen. Auf Verwitterungsböden aus Gneis, Granit, Keuper und Muschelkalk sollte jährlich im Frühjahr gedüngt werden. Diese Standorte sind durch ein starkes P-Festlegungsvermögen und schnell ablaufende Alterungsprozesse (Bildung stabiler P-Formen) gekennzeichnet. Durch die Frühjahrsdüngung steht den Pflanzen ausreichend P zur Deckung des hohen P-Bedarfes während der Jugendentwicklung zur Verfügung.

1.4 Entwicklung der P-Bilanzen und Gehaltsklassen

Die Versorgung landwirtschaftlicher Nutzflächen mit Phosphat ist in Sachsen rückläufig. Einsparungen bei der Grunddüngung sorgen inzwischen für eine Unterversorgung der Böden, die zunehmend auch die Ertragsfähigkeit der Standorte begrenzt. In der Vergangenheit führten der steigende Einsatz von Mineraldünger und anwachsende Tierbestände dazu, dass die Nährstoffzufuhr die Abfuhr deutlich übertraf. Bilanzüberschüsse traten auf und somit kam es zu einer Anreicherung der Böden mit Phosphor. Seit 1990 liegen die P-Salden für Sachsen dagegen im negativen Bereich (Abbildung 2). Ursachen hierfür sind zum einen die stark reduzierten Tierbestände und zum anderen der verminderte Einsatz an mineralischen P-Düngern. Dieses ist u. a. auf die steigenden Düngerkosten (Abbildung 3) zurückzuführen.

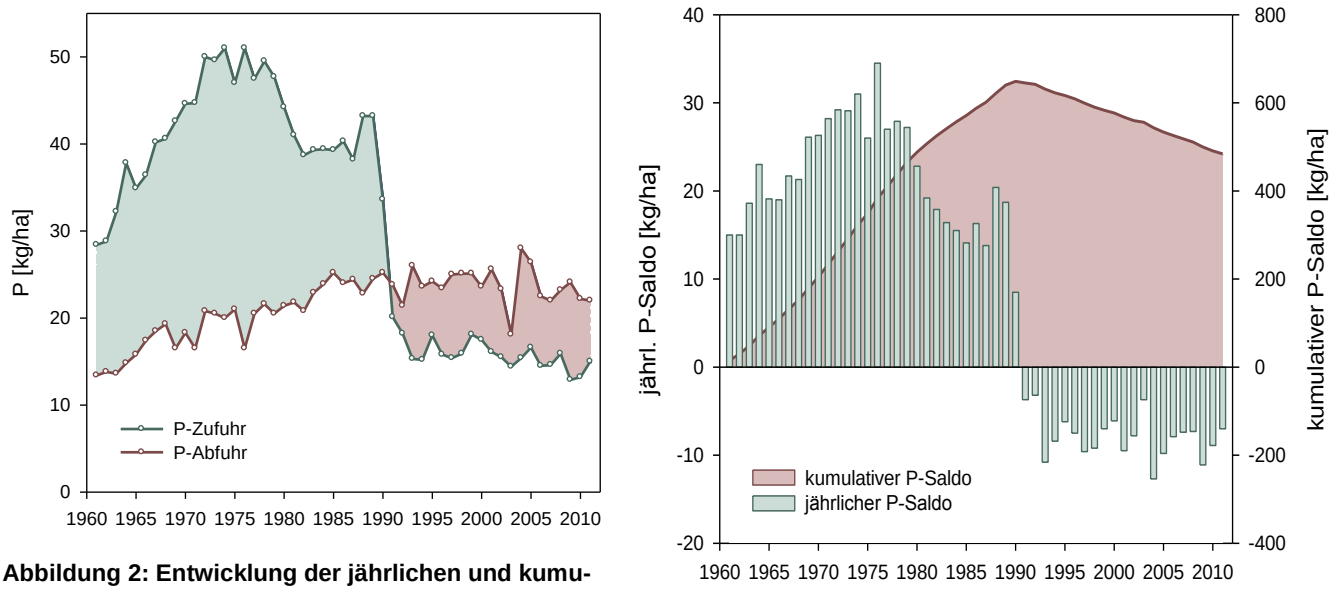

Abbildung 2: Entwicklung der jährlichen und kumulativen P-Bilanz [kg/ha] für Sachsen 1961 bis 2011
(Datengrundlage: Statistisches Landesamt Sachsen)

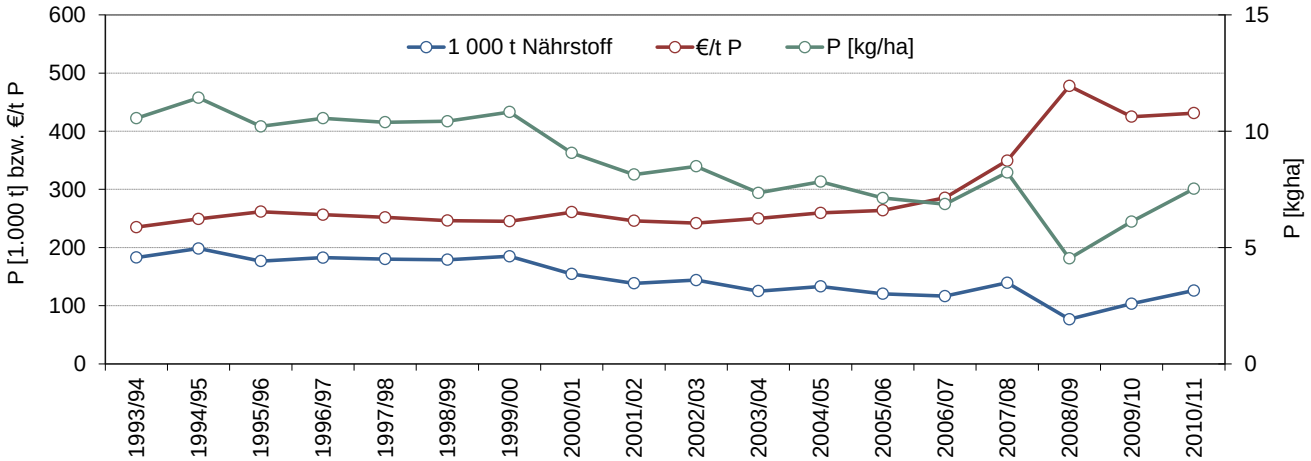

Abbildung 3: Preisentwicklung und Entwicklung des Inlandsabsatzes an Phosphatdüngern Deutschland 1993 bis 2011
[in 1.000 t und kg je landwirtschaftliche genutzter Fläche – ohne Brache] (Quelle: BMELV, 2011; DESTATIS, 1993 bis 2011)

Die Folgen des sparsamen Einsatzes an mineralischem P-Dünger schlagen sich inzwischen auch verstärkt in sinkenden Gehalten an pflanzenverfügbaren Phosphor im Boden nieder. Die Entwicklung der P-Gehaltsklassen (ALBERT et al. 2007) zeigt, dass der Anteil der niedrig versorgten Böden (GK A und B) im Laufe der letzten Jahre zunimmt, währenddessen die überversorgten Böden abnehmen (Abbildung 4).

Abbildung 4: Entwicklung der P-Gehaltsklassen in Sachsen (Grundlage BEFU; nach ALBERT & SUNTHEIM 2004)

Dabei existieren regional große Unterschiede. Während es in Regionen mit intensiver Tierhaltung zu Nährstoffüberschüssen kommt, dominieren in Ackerbaugebieten oft negative P-Bilanzsalden mit sinkenden Bodengehalten. Auch innerhalb großer Betriebe und heterogener Schläge können erhebliche Unterschiede in der Nährstoffversorgung auftreten. Ein Grund hierfür ist, dass die Ausbringung der Wirtschaftsdünger noch immer oftmals ohne Berücksichtigung des aktuellen P-Versorgungszustandes des Bodens erfolgt. Umfangreiche Untersuchungen auf Basis sächsischer Schlagdaten belegen diese Aussage (Abbildung 5). Der gezieltere Einsatz von organischen Düngern bietet, gerade angesichts hoher Preise für mineralischen P-Dünger, eine gute Möglichkeit für einen effizienteren und damit umweltschonenderen P-Einsatz.

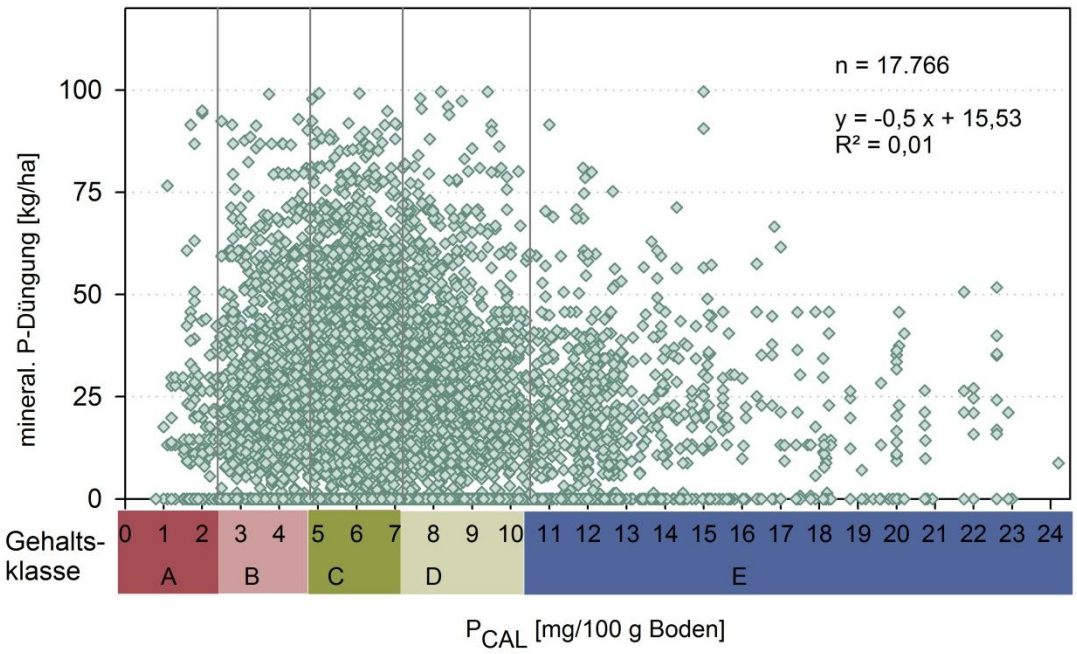

Abbildung 5: Mineralische P-Düngung in Abhängigkeit von den verfügbaren P-Gehalten des Bodens
(Auswertung von 17.766 sächsischen Schlagdaten 1995 bis 2005)

1.5 Phosphorbelastung der Gewässer

Im Hinblick auf die Eutrophierung der Gewässer spielt Phosphor eine zentrale Rolle. Die höchsten P-Einträge in Gewässer erfolgen als diffuse Einträge durch Erosion nährstoffreichen Bodenmaterials. Außerdem kann eine P-Zufuhr in löslicher Form mit dem Oberflächenabfluss, dem Zwischenabfluss (Hangzugwasser), dem Drainabfluss und dem lateral abfließenden Grundwasser eintreten. Des Weiteren existieren punktuelle P-Einträge durch kommunale und industrielle Kläranlagen und Abwassereinleitungen.

Nach Modellberechnungen (HALBFASS et al. 2005) betragen die P-Gesamtemissionen in Oberflächengewässer für Sachsen 1.117 t/a (Bezugsjahr 2005), wobei 61 % aus diffusen Quellen stammen. Nach den Siedlungsgebieten[1] stammen die meisten diffusen P-Einträge von Ackerflächen (40 %). Die höchsten P-Einträge (163 t/a) treten im Sächsischen Lössgebiet infolge von Erosionsprozessen und Drainagen auf (Tabelle 1).

Tabelle 1: P-Einträge von Ackerflächen in Oberflächengewässer sächsischer Naturraumregionen (HALBFASS et al. 2005)

	partikulär gebundene P-Einträge		gelöste P-Einträge		Summe
	[t/a]	[%]	[t/a]	[%]	[t/a]
Sächsische Heide- und Teichlandschaft	4	21	13	79	17
Sächsisches Lössgebiet	79	48	84	52	163
Sächsisches Mittelgebirge und Vorland	52	56	40	44	92
Gesamt	134	49	138	51	272

Die Folge ist, dass 70 % der sächsischen Fließgewässer zu hohe P-Konzentrationen[2] aufweisen (Abbildung 6) und damit die Gefahr der Eutrophierung steigt.

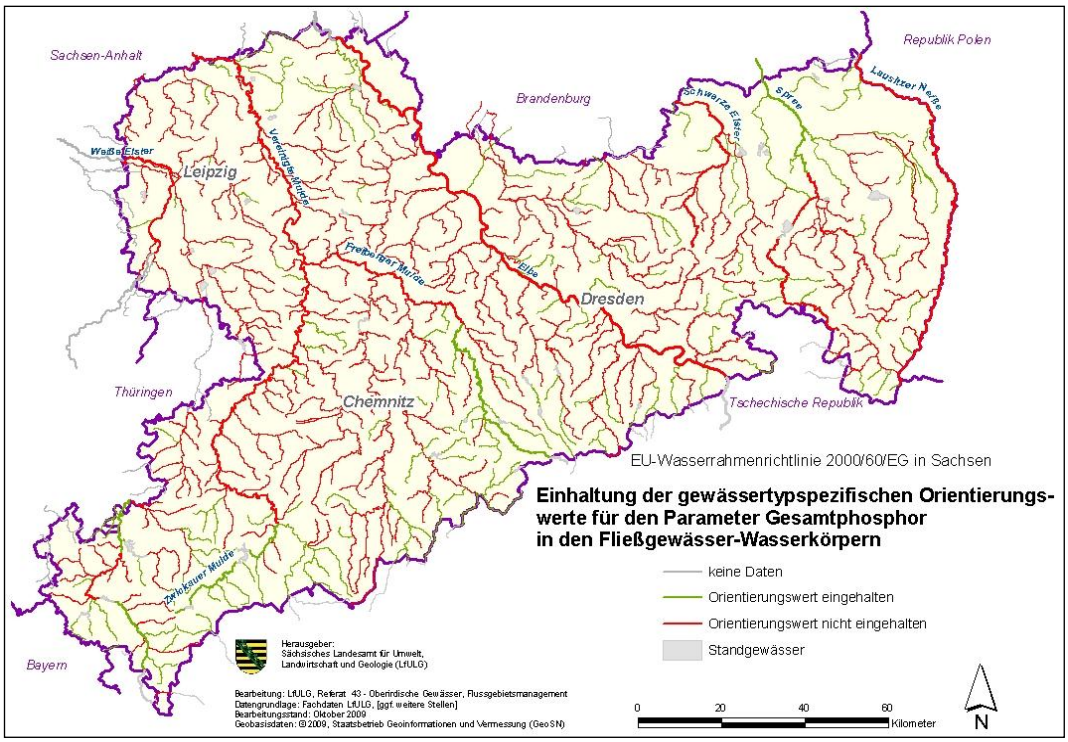

Abbildung 6: Karte zur P-Belastung sächsischer Fließgewässer auf Grundlage gewässertypspezifischer Orientierungswerte

1 diffuse P-Einträge v. a. durch Haushalte ohne Kanalanschluss oder fehlende Abwasserbehandlung

[2] Überschreitung der von der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) festgelegten typspezifischen Orientierungswerte für Fließgewässer [0,10 bzw. 0,15 mg P/l]

Die Höhe des P-Austrages, welcher durch Erosion verursacht wird, ist abhängig vom Gesamtbodenabtrag und dem P-Gehalt des Oberbodens. Ziel sollte es daher sein, den Bodenabtrag durch eine Bewirtschaftung nach guter fachlicher Praxis mit Hilfe geeigneter Maßnahmen so gering wie möglich zu halten. Des Weiteren sollten Düngungsmaßnahmen auf das Erreichen bzw. Erhalten eines für die landwirtschaftliche Produktion optimalen Versorgungszustandes (Versorgungsstufe C) ausgerichtet sein. Eine Über- oder Luxusversorgung der Böden in den Gehaltsklassen D und E ist abzubauen. Nicht zuletzt kann die Wahl einer geeigneten Applikationsform sowie eines -termins der mineralischen als auch organischen P-Düngung dazu beitragen, P-Verluste zu minimieren und gleichzeitig die Effizienz des eingesetzten P-Düngers zu verbessern.

2 Versuche zur Steigerung der P-Effizienz

2.1 Hinweise zur Versuchsdurchführung und -auswertung

Die Boden- und Pflanzenproben wurden durch die Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft (BfUL) untersucht.

Die Versuchsergebnisse wurden mit dem Programm SPSS statistisch ausgewertet. Bei signifikantem Einfluss des Prüffaktors erfolgte der Vergleich der Mittelwerte mit dem Tukey-Test ($p = 0,05$). Signifikante Unterschiede sind in den Tabellen durch unterschiedliche Buchstaben gekennzeichnet, Grundlage für diese Kennzeichnung sind die ungerundeten und nicht die in den Tabellen dargestellten gerundeten Werte. Die Grenzdifferenzen (GD) sind ebenfalls gerundet in den Tabellen angegeben.

2.2 Versuche zu P-Dünge-Applikationsverfahren

Eine Möglichkeit zur effizienten P-Düngung bietet die platzierte, konzentrierte Ausbringung des P-Düngers. Im Unterschied zum Nitrat wird Phosphat nicht mit dem Massenfluss zur Wurzel transportiert, sondern hauptsächlich über Diffusionsprozesse. Dabei ist die Geschwindigkeit und Reichweite der Diffusion gering und wird durch hohe Konzentrationen an zweiwertigen Kationen infolge der Bildung wasserunlöslicher Verbindungen noch zusätzlich verringert. Den Dünger in konzentrierter Form im wurzelnahen Bereich auszubringen, ist als Unterfußdüngung von Diammonphosphat (DAP) zu Mais bereits gängige Praxis. Dadurch wird vor allem die Jugendentwicklung des Maises gefördert, der in dieser Phase nur ein geringes P-Aneignungsvermögen aufweist. Besonders wirksam zeigt sich die Maßnahme bei ungünstiger Frühjahrswitterung (kühl und trocken), weil unter diesen Bedingungen das Wurzelwachstum gehemmt und die notwendige Diffusion zur Wurzeloberfläche reduziert ist. Im Gegensatz zur reinen P-Düngung erweist sich die Kombination aus Ammoniumstickstoff und Phosphor als besonders ertragswirksam, weil durch den platzierten Ammoniumstickstoff das Wurzelwachstum angeregt und damit die räumliche P-Verfügbarkeit verbessert wird (WERNER & TRIMBORN 2008).

In Australien und Kanada sind Verfahren der Unterfuß- bzw. Injektionsdüngung für Flüssig- oder Festdünger vor allem bei konservierender Bodenbearbeitung weit verbreitet und haben sich dort als kostengünstige und effiziente Düngeverfahren bewährt. In Deutschland findet dagegen die Unterfußdüngung außer beim Mais kaum Anwendung bei anderen Kulturarten und ist zudem auch bisher nur wenig erforscht. Gleiches gilt auch für die Möglichkeiten, welche sich über die CULTAN-Düngung hinsichtlich einer effizienteren P-Düngung ergeben könnten – insbesondere durch die Kombination von NH_4^+-N mit löslichen P-Düngern. Beim CULTAN-Verfahren (Controlled Uptake Long Term Ammonium Nutrition) werden ammoniumdominierte N-Dünger in Wurzelnähe injiziert. Die Injektionsdüngung umfasst alle Verfahren, bei denen flüssige Dünger platziert in den Boden eingebracht werden.

Auch in Hinblick auf den Gewässerschutz sind von den angesprochenen Verfahren Vorteile zu erwarten, weil nur in einem relativ geringen Bodenbereich Dünger ausgebracht wird und die Ablage zudem unterirdisch erfolgt. Auftretende Erosionsereignisse dürften somit mit einem geringeren P-Austrag verbunden sein.

2.2.1 P-Unterfußdüngung

Die Wirkung der Unterfußdüngung von Phosphor auf Ertrag und die P-Aufnahme verschiedener Kulturarten wurde anhand von Gefäßversuchen (A) sowie auf Grundlage eines Feldversuches (B) untersucht.

(A) Gefäßversuche zur P-Unterfußdüngung

Material und Methoden

Bei diesem Gefäßversuch wurde die Wirkung unterschiedlicher P-Düngungsverfahren auf das Wachstum von Winterweizen (WW), Sommergerste (SG) und Mais untersucht**.** Die P-Düngung mit Calciumdihydrogenphosphat ($Ca(H_2PO_4)_2$) erfolgte in fünf Stufen (0,1; 0,2; 0,4; 0,8; 1,6 g P/Gefäß) „eingemischt“, als „Depot" sowie als Kombination aus „Einmischen“ und „Depotdüngung“ (Tabelle 2). Bei den Prüfgliedern mit einer Depot-Düngung wurde ein Depot (mittig) je Gefäß angelegt. Dafür wurde zuerst mit einem Glasstäbchen ein etwa 5-8 cm tiefes kleines Loch gestochen und in dieses das $Ca(H_2PO_4)_2$ (pulverförmig; kleiner Glastrichter + feiner Pinsel) eingefüllt. Dann wurde mit der Pipette etwas Wasser (5 ml) zum „Einspülen“ darauf gegeben und das Loch wieder zugedrückt. Die Versuche wurden mit vier Wiederholungen angelegt (64 Gefäße pro Fruchtart). Je Gefäß wurden 5 kg Boden (Tabelle 3) und 1,5 kg Quarzsand gemischt.

Die Versuche wurden zwei Jahre durchgeführt: 2011 standen die Gefäße im Rollgewächshaus in Leipzig, 2012 im Gewächshaus Nossen. Mit den Gefäßen des ersten Versuchsjahres erfolgte 2012 ein Nachbau (WW →SG; SG → SM), um die Nachwirkung der P-Düngung im zweiten Anbaujahr zu prüfen. Vor der Aussaat des Nachbaus wurde der Boden nicht bearbeitet, um die Depots nicht zu zerstören. Nach dem Nachbau wurden prüfgliedweise Bodenproben entnommen und auf ihren Nährstoffgehalt untersucht. Die N- und K-Düngung ist in Tabelle 4 dargestellt. Pflanzenschutzmaßnahmen wurden nach Bedarf je Fruchtart für alle Gefäße gleich durchgeführt. Die Bewässerung erfolgte optimal mit deionisiertem Wasser.

Tabelle 2: Prüfglieder Gefäßversuch zur P-Applikation

	P-Düngung	
PG	Faktor A: P-Menge	Faktor B: P-Applikation
	g P/Gefäß	Applikation
1	0	-
2	0,1	eingemischt
3	0,2	
4	0,4	
5	0,8	
6	1,6	
7	0,1	Depot
8	0,2	
9	0,4	
10	0,8	
11	1,6	
12	0,1	50 % P eingemischt + 50 % P Depot
13	0,2	
14	0,4	
15	0,8	
16	1,6	

Tabelle 3: Bodenparameter Gefäßversuch P-Applikation

	2011			2012
Fruchtart	WW	SG	Mais	WW / SG / Mais
Herkunft	Hochkirch	Oberschöna 2001	Langenhennersdorf	Oberschöna 2011
	V	V	V	V
pH	5,3	5,9	5,9	5,8
$P_{CAL\ [mg/100g]}$	1,7 (A)	2,1 (A)	3,1 (B)	1,7 (A)
$K_{CAL\ [mg/100g]}$	13,5	7,5	7,1	8
Mg (Ca_2Cl) $_{[mg/100g]}$	18,7	16	17,1	17,1

Tabelle 4: N- und K-Düngung Gefäßversuch P-Applikation

Fruchtart	g N bzw. K/Gefäß	Termin/Dünger
WW	1	zum Ansatz mit NH_4NO_3
	1,5	zum Ansatz mit K_2SO_4
	0,5	zu EC 31 als KAS
	0,5	zu EC 53 als KAS
SG	1	zum Ansatz mit NH_4NO_3
	1,5	zum Ansatz mit K_2SO_4
	0,5	zu EC 25 als KAS
Mais	2	zum Ansatz mit NH_4NO_3
	2	zum Ansatz mit K_2SO_4
	0,5	zu EC 25 als KAS

Ergebnisse

Winterweizen

In beiden Versuchsjahren führten steigende P-Gaben zu signifikanten Mehrerträgen aufgrund der niedrigen Ausgangsgehalte an pflanzenverfügbarem Phosphor im Boden. Im ersten Versuchsjahr konnte kein signifikanter Einfluss der Applikationsart auf den Kornertrag nachgewiesen werden. Im zweiten Untersuchungsjahr lagen die Kornerträge bei der Depotdüngung am niedrigsten und bei den eingemischten Varianten am höchsten (Tabelle 5, Abbildung 7). Die zweifaktorielle Auswertung (Faktor A:

Düngermenge; Faktor B: Düngerapplikation) der orthogonalen Prüfgliedstruktur (PG 2 bis 16) bestätigte signifikante Unterschiede. Demnach lag der mittlere Kornertrag bei der Depotdüngung (45,7 g TM/ Gefäß) signifikant niedriger im Vergleich zu den anderen Applikationsarten „eingemischt“ (50,5 g TM/ Gefäß) und „eingemischt+Depot“ (49,3 g TM/ Gefäß). Die P-Düngermenge übte in beiden Versuchsjahren einen signifikanten Einfluss auf den Winterweizenertrag aus. Zwischen Düngermenge und Applikationsart trat in beiden Jahren keine signifikante Wechselbeziehung auf.

Beim erfolgten Nachbau mit Sommergerste zeigte sich in den beiden höchsten Düngungsstufen (0,8 und 1,6 g P/Gefäß) ein Ertragsvorteil bei der Ausbringung des P-Düngers als Depot (Tabelle 6, Abbildung 8). Bei der Vorfrucht Winterweizen waren hier die eingemischten Varianten ertragswirksamer. Betrachtet man die Wirkung der P-Düngung auf den Gesamtertrag von Winterweizen und Sommergerste, zeigte sich in den niedrig versorgten Bereichen (0,1 und 0,2 g P/ Gefäß) ein leichter Vorteil der eingemischten Variante. Im mittleren Bereich (0,4 g P/ Gefäß) lag der Ertrag bei der Depotdüngung am höchsten. In den höheren Varianten glichen sich die Erträge an (Tabelle 6).

Tabelle 5: Ertragsparameter Gefäßversuch P-Düngung Winterweizen

PG	P-Menge [g P/Gefäß]	P-Applikation	Kornertrag [TM g/Gefäß]		Rohproteingehalt [%]		TKM [g]		KZ/Ä [n]	
			2011	2012	2011	2012	2011	2012	2011	2012
1	0	-	20,0 a	24,7 a	20,6 d	18,5	39,7 b	39,0 a	31,3 a	37,8 ab
2	0,1	eingemischt	28,3 ab	36,8 bc	19,3 bcd	17,4	39,1 ab	42,4 ab	37,0 ab	35,0 a
3	0,2		35,2 bcdef	42,8 cd	17,8 abc	16,3	39,1 ab	43,6 ab	42,8 bc	37,5 ab
4	0,4		34,2 bcde	51,7 efg	18,8 abc	15,8	38,9 ab	45,3 b	42,5 abc	37,0 ab
5	0,8		44,9 fgh	56,2 g	18,0 abc	15,2	37,7 ab	38,6 a	51,3 c	43,8 bcd
6	1,6		51,2 h	65,0 h	18,0 abc	14,4	40,4 b	40,8 ab	50,5 c	45,5 cd
7	0,1	Depot	29,4 ab	34,2 b	19,4 cd	16,9	38,4 ab	43,2 ab	40,5 abc	37,8 ab
8	0,2		32,9 bcd	40,1 bcd	18,9 abc	16,8	39,1 ab	44,3 b	44,0 bc	38,5 abc
9	0,4		40,3 cdefg	44,4 cde	17,7 ab	15,5	39,6 b	43,5 ab	45,3 bc	41,5 abcd
10	0,8		41,3 defg	51,6 efg	17,6 a	16,1	39,2 b	43,1 ab	49,0 c	44,3 bcd
11	1,6		45,7 gh	58,1 gh	18,1 abc	16,0	40,0 b	42,3 ab	51,3 c	46,0 d
12	0,1	50 % P eingemischt + 50 % P Depot	27,4 ab	39,5 bc	19,2 abcd	17,0	36,3 ab	43,7 ab	44,5 bc	38,3 abc
13	0,2		30,6 bc	40,6 bcd	18,9 abc	18,2	37,7 ab	43,3 ab	47,3 bc	38,0 ab
14	0,4		34,4 bcde	47,5 def	17,9 abc	17,6	35,0 a	43,3 ab	42,3 abc	38,3 abc
15	0,8		43,6 efgh	54,9 fg	17,8 ab	18,3	37,5 ab	41,9 ab	48,3 bc	41,5 abcd
16	1,6		46,2 gh	64,1 h	18,1 abc	17,5	37,5 ab	41,6 ab	49,0 c	44,0 bcd
		GD Tukey, 5 %	*9,9*	*7,7*	*0,8*	*n. b.*	*4,2*	*5,2*	*11,4*	*7,4*

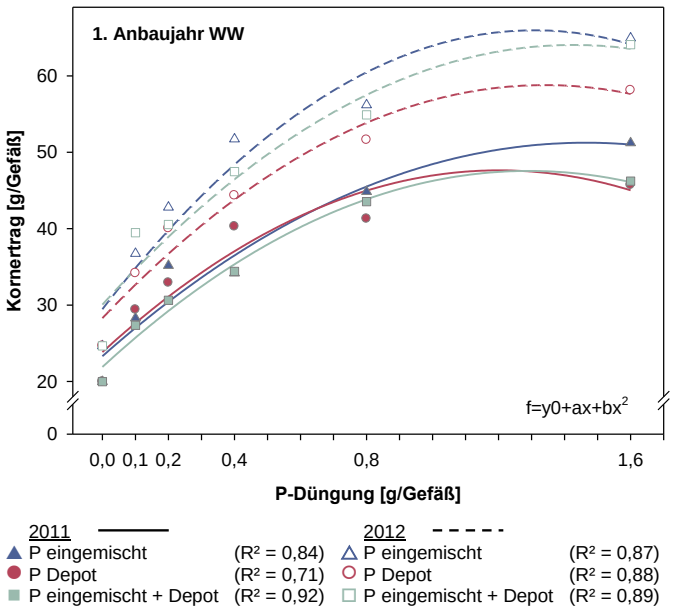

Abbildung 7: Mittlerer Kornertrag (TM) von Winterweizen in Abhängigkeit von der P-Düngung

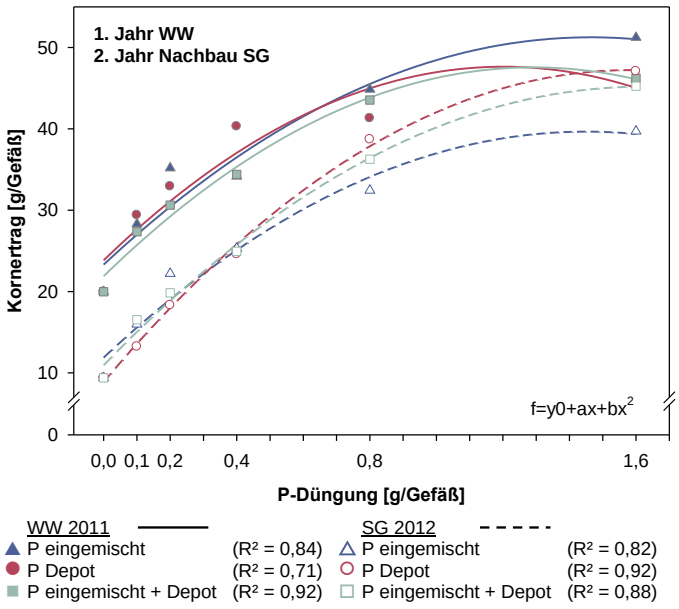

Abbildung 8: Mittlerer Kornertrag (TM) von Winterweizen und von Sommergerste im Nachbau in Abhängigkeit von der P-Düngung

Tabelle 6: Wirkung verschiedener P-Applikationsverfahren zu Winterweizen auf den Nachbau mit Sommergerste

			Nachbau Sommergerste			Fruchtfolge Winterweizen-Sommergerste	
PG	P-Menge	P-Applikation	Kornertrag	Rohprotein	Gesamt-P-Entzug	Gesamtertrag	P-Saldo
	g P/Gefäß	zu WW	[TM g /Gefäß]	[%]	[g/Gefäß]	[TM g /Gefäß]	[g/Gefäß]
1	0	-	9,4 a	19,3	0,02 a	62 a	-0,07 a
2	0,1		16,0 abc	17,5	0,04 abc	89 abc	0,00 b
3	0,2		22,2 bc	17,1	0,05 bcd	112 bcd	0,07 c
4	0,4	eingemischt	25,3 cd	16,1	0,05 bcd	115 bcde	0,27 d
5	0,8		32,4 de	15,4	0,07 d	143 efg	0,62 e
6	1,6		39,7 efg	14,9	0,11 ef	165 g	1,29 f
7	0,1		13,2 ab	18,4	0,03 ab	86 ab	0,00 b
8	0,2		18,3 abc	17,3	0,04 abcd	99 bcd	0,08 c
9	0,4	Depot	24,6 cd	16,1	0,05 bcd	122 def	0,26 d
10	0,8		38,7 efg	15,9	0,11 ef	150 fg	0,59 e
11	1,6		47,1 g	15,2	0,14 g	165 g	1,30 f
12	0,1		16,5 abc	18,1	0,04 abcd	86 ab	0,00 b
13	0,2	50 % P	19,8 bc	17,4	0,04 abcd	98 bcd	0,09 c
14	0,4	eingemischt + 50	24,9 cd	16,2	0,06 cd	117 cde	0,26 d
15	0,8	% P Depot	36,3 ef	16,1	0,09 e	148 fg	0,59 e
16	1,6		45,3 fg	15,3	0,13 fg	168 g	1,31 f
		GD Tukey, 5 %	*10,1*		*0,03*	*29*	*0,04*

Die zweifaktorielle Auswertung zeigt, dass der P-Gesamtentzug (Korn und Stroh) sowohl von der P-Menge als auch der P-Applikation beeinflusst wurde. Zwischen den Faktoren Düngerapplikation und Düngermenge traten dabei signifikante Wechselwirkungen auf, das heißt, dass die Wirkung des einen Faktors von der Ausprägung des anderen Faktors abhängt. Das gilt sowohl für die Hauptfrucht Winterweizen als auch für den Nachbau mit Sommergerste.

Bei Winterweizen führte die Form der Düngerapplikation nur in der höchsten Düngermenge zu größeren unterschiedlichen P-Entzügen (bezogen auf Korn als auch auf Korn und Stroh) (Tabelle 7, Abbildung 9). Bei der Düngung mit 1,6 g P/ Gefäß wurden in beiden Versuchsjahren die höchsten Entzüge bei der eingemischten Variante erzielt. Die Entzüge der Depotdüngung und der Kombination aus Depot und Einmischen lagen eng beieinander und deutlich niedriger. Allerdings ist nur der Unterschied zwischen der Depot- und der eingemischten Variante als signifikant zu bezeichnen. Beim Nachbau mit Sommergerste ist der Einfluss der Applikationsart bereits ab der Düngungsstufe 0,8 g P/ Gefäß zu erkennen (Tabelle 6, Abbildung 10). Im Unterschied zur Vorfrucht Winterweizen führte hier die Depotdüngung und auch die Mischvariante zu höheren P-Entzügen.

Tabelle 7: P- und N-Entzüge Gefäßversuch P-Düngung Winterweizen

	P-Menge	P-Applikation	P-Entzug [g/Gefäß]				N-Entzug [g/Gefäß]			
PG			Korn		Gesamt		Korn		Gesamt	
	g P/Gefäß		2011	2012	2011	2012	2011	2012	2011	2012
1	0	-	0,04 a	0,06 a	0,05 a	0,06 a	0,72 a	0,80 a	1,01 a	0,99 a
2	0,1		0,06 ab	0,09 b	0,07 ab	0,09 b	0,96 abc	1,12 bc	1,23 abc	1,36 bc
3	0,2		0,07 abc	0,10 bc	0,08 abc	0,11 b	1,09 bcde	1,23 bcd	1,39 bcde	1,49 bcd
4	0,4	eingemischt	0,07 ab	0,14 de	0,08 abc	0,14 c	1,13 bcde	1,43 def	1,40 bcdef	1,72 def
5	0,8		0,11 d	0,16 f	0,12 e	0,18 d	1,41 fg	1,50 ef	1,69 efg	1,83 fg
6	1,6		0,17 f	0,24 h	0,20 g	0,29 f	1,61 g	1,64 fg	1,92 g	2,01 gh
7	0,1		0,06 ab	0,08 b	0,07 ab	0,09 ab	1,00 bc	1,02 ab	1,31 abcd	1,22 ab
8	0,2		0,07 ab	0,10 bc	0,07 abc	0,11 b	1,09 bcde	1,18 bc	1,39 bcde	1,42 bc
9	0,4	Depot	0,08 bcd	0,13 d	0,09 bcde	0,13 c	1,25 cdef	1,21 bc	1,50 cdef	1,46 bcd
10	0,8		0,10 cd	0,16 ef	0,11 cde	0,17 d	1,28 def	1,46 ef	1,52 cdef	1,83 fg
11	1,6		0,14 e	0,21 g	0,16 f	0,22 e	1,45 fg	1,63 fg	1,71 efg	1,93 fgh
12	0,1		0,06 ab	0,09 b	0,06 ab	0,10 b	0,92 ab	1,18 bc	1,16 ab	1,43 bc
13	0,2	50 % P eingemischt +	0,06 ab	0,10 bc	0,06 ab	0,10 b	1,02 bcd	1,30 cde	1,26 abcd	1,56 cde
14	0,4	50 % P Depot	0,07 abc	0,12 cd	0,08 abcd	0,13 c	1,08 bcd	1,46 ef	1,37 bcde	1,77 efg
15	0,8		0,10 d	0,16 f	0,11 de	0,17 d	1,36 efg	1,77 gh	1,61 defg	2,12 hi
16	1,6		0,14 ef	0,22 gh	0,16 f	0,25 e	1,47 fg	1,97 h	1,74 fg	2,36 i
		GD Tukey, 5 %	*0,03*	*0,02*	*0,03*	*0,02*	*0,27*	*0,22*	*0,34*	*0,26*

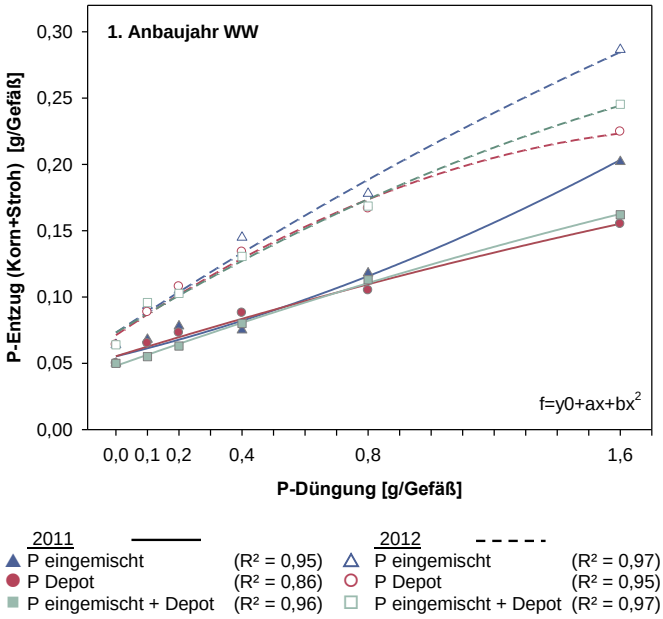

Abbildung 9: Mittlerer P-Entzug (Korn+Stroh) von Winterweizen in Abhängigkeit von der P-Düngung

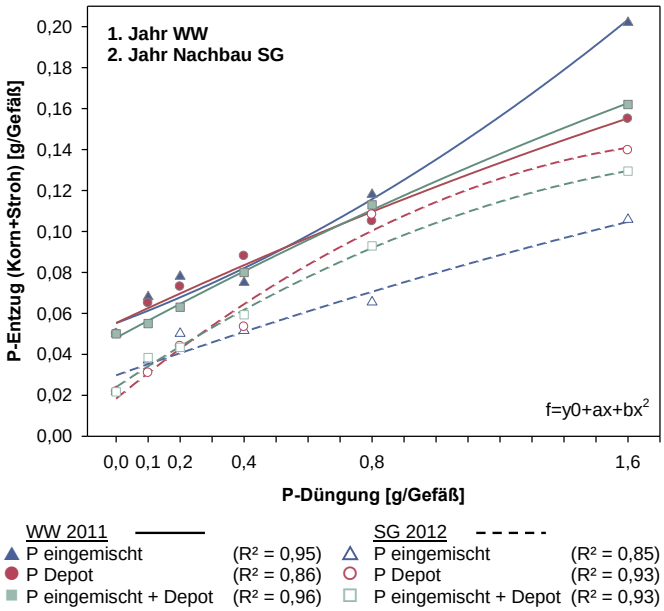

Abbildung 10: Mittlerer P-Entzug (Korn+Stroh) von Winterweizen und von Sommergerste im Nachbau in Abhängigkeit von der P-Düngung

Durch Abzug der Entzüge von Winterweizen und Sommergerste von der erfolgten P-Düngung lässt sich eine Gesamtbilanz für die Fruchtfolge Winterweizen - Sommergerste errechnen (Tabelle 6). Signifikant beeinflusst wurde der P-Bilanzsaldo nur von der Höhe der Düngung. Ein ausgeglichener P-Saldo führte bei den niedrigen Ausgangsgehalten nicht zu optimalen Erträgen. Eine Düngung über den P-Entzug (P-Saldo > 0) führte zu einer deutlichen Ertragssteigerung (Abbildung 11).

Die Applikationsart übte keinen signifikanten Einfluss auf den P-Saldo aus, auch traten keine Wechselwirkungen zwischen Applikation und Düngungshöhe auf. Tendenziell führte bei einer höheren P-Versorgung ein gleich hoher P-Bilanzüberschuss zu geringfügig höheren TM-Erträgen, wenn der P-Dünger als Depot appliziert wurde bzw. in Kombination aus „eingemischt+Depot“ ausgebracht wurde (Abbildung 11). Diese Arten der Ausbringung führten also zu einer effizienteren Nährstoffverwertung des eingesetzten P-Düngers. Bei einer niedrigen P-Versorgung war dagegen die eingemischte Variante effizienter.

Mit zunehmendem P-Saldo stiegen die Gehalte an pflanzenverfügbaren Phosphor (P_{CAL}) im Boden nach Ernte der Sommergerste an (Abbildung 12). Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Formen der Düngerapplikation waren nur gering. Tendenziell führte ein gleich hoher P-Saldo (oder auch Düngermenge) bei der Depot-Variante zu geringeren P_{CAL}-Gehalten im Boden. Eine P-Düngung auf Höhe des Pflanzenentzuges war nicht ausreichend, um den schon niedrigen Ausgangsgehalt an pflanzenverfügbarem Phosphor zu erhalten.

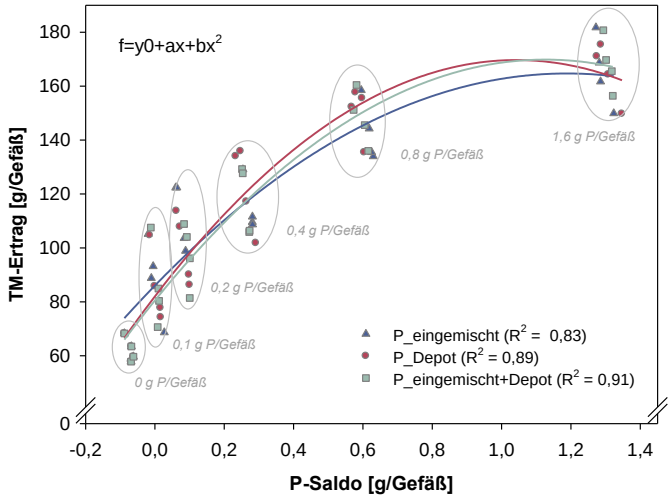

Abbildung 11: Beziehung zw. P-Saldo und TM-Ertrag der Fruchtfolge WW-SG in Abhängigkeit von der P-Düngung

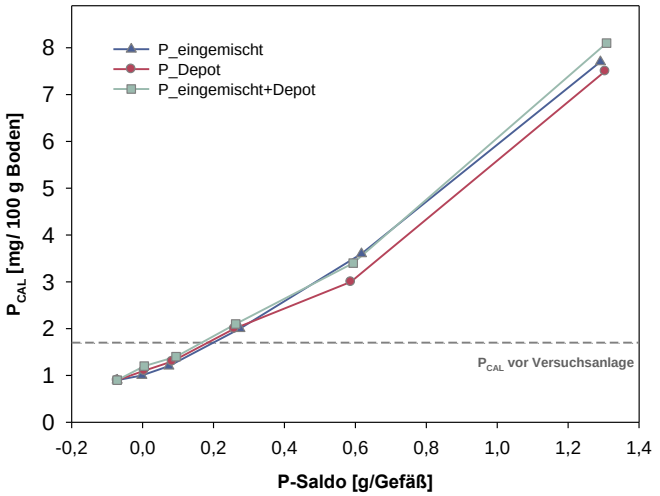

Abbildung 12: Beziehung zw. P-Saldo und P_{CAL}-Gehalt im Boden nach der Fruchtfolge WW-SG in Abhängigkeit von der P-Düngung

Aus der Gegenüberstellung der erzielten TM-Erträge zu den pflanzenverfügbaren P-Gehalten nach Ernte der SG zeigt sich, dass mindestens die Gehaltsklasse B erreicht werden musste, um hohe Erträge zu erreichen (Abbildung 13). Die niedrigen P-Düngermengen reichten nicht aus, um einen dauerhaften Anstieg des Versorgungszustandes des Bodens zu bewirken.

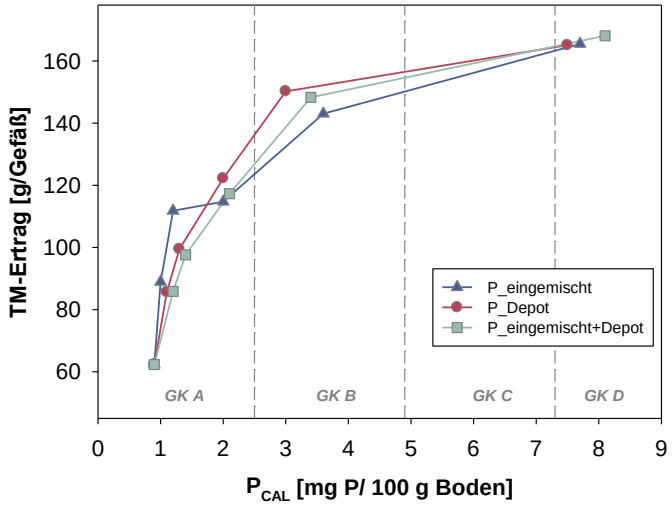

Abbildung 13: Beziehung zw. P_{CAL}-Gehalt im Boden nach Ernte der SG und TM-Ertrag der Fruchtfolge WW-SG in Abhängigkeit von der P-Düngung

Sommergerste

Auch bei der Sommergerste führten in beiden Versuchsjahren steigende P-Gaben zu signifikanten Mehrerträgen. Die höchsten Kornerträge wurden in beiden Untersuchungsjahren in der Variante des eingemischt applizierten P-Düngers erzielt, gefolgt von der Kombination „eingemischt+Depot“. Die Depotdüngung führte fast ausnahmslos zu den niedrigsten Kornerträgen (Tabelle 8, Abbildung 14).

Im Jahr 2011 traten signifikante Wechselwirkungen zwischen den Faktoren Applikation und Düngermenge auf. In der höchsten Düngestufe (1,6 g P/ Gefäß) waren die Unterschiede zwischen der Variante „eingemischt“ mit dem höchsten Ertrag (41,2 g/ Gefäß), der Kombination aus „eingemischt und Depot“ (35,2 g/ Gefäß) sowie der Depotdüngung mit dem niedrigsten Kornertrag (29,6 g/ Gefäß) signifikant. Für die Wiederholung im Jahr 2012 konnten keine signifikanten Wechselwirkungen zwischen den Faktoren Applikation und Düngermenge festgestellt werden. Es ist daher möglich, die Wirkung des einen Faktors gemittelt über die Stufen des zweiten Faktors zu betrachten. Es ergaben sich signifikante Unterschiede sowohl bei der Betrachtung der Applikation als auch bei der Düngermenge. Der mittlere Kornertrag bei der Depotdüngung (34,6 g TM/ Gefäß) war

signifikant niedriger im Vergleich zu den anderen Applikationsarten „eingemischt“ (41,6 g TM/ Gefäß) und „eingemischt+Depot“ (39,6 g TM/ Gefäß).

Bei dem erfolgten Nachbau mit Silomais konnte dagegen in den niedrigen Düngestufen ein höherer Ertrag mit der Düngeablage als Depot festgestellt werden (Tabelle 9, Abbildung 15). Mit den höheren P-Mengen waren wiederum die eingemischte sowie die Mischvariante aus „eingemischt und Depot“ leistungsstärker. Die beschriebenen Unterschiede waren jedoch nicht signifikant. Diese Wirkung überträgt sich auch auf den Gesamtertrag von Sommergerste und Silomais. Bei einer P-Düngung mit 0,1 und 0,2 g P/ Gefäß wurden mit der Depotdüngung die höheren Gesamterträge erreicht, bei 0,8 und 1,6 g P/ Gefäß mit der eingemischten Variante bzw. der Kombination aus Einmischen und Depot.

Tabelle 8: Ertragsparameter Gefäßversuch P-Düngung Sommergerste

PG	P-Menge	P-Applikation	Korn [g/Gefäß]		Rohprotein [%]		TKM [g]		KZ/Ä [n]	
	g P/Gefäß		2011	2012	2011	2012	2011	2012	2011	2012
1	0	-	22,7 ab	15,4 a	15,4 ab	15,5	35,0 a	41,0 a	21,3	19,5
2	0,1		21,4 a	26,6 bc	16,3 ab	13,7	36,1 ab	42,7 ab	18,3	18,8
3	0,2		27,1 bcde	33,7 cde	16,0 ab	13,3	34,5 a	43,1 abc	19,5	18,5
4	0,4	eingemischt	32,4 fg	38,6 def	16,7 ab	12,9	37,3 abc	44,3 abcd	19,0	19,3
5	0,8		33,7 fg	51,6 hi	17,9 ab	11,3	38,8 abc	45,2 bcd	18,3	18,5
6	1,6		41,2 h	57,6 i	18,0 ab	10,7	42,0 c	46,5 d	17,5	18,3
7	0,1		22,8 ab	22,8 ab	15,8 ab	14,1	34,4 a	42,9 ab	18,3	18,8
8	0,2		23,3 ab	28,0 bc	15,9 ab	13,7	34,3 a	43,2 abcd	18,0	18,5
9	0,4	Depot	25,1 abcd	32,1 bcde	16,1 ab	13,9	34,5 a	44,7 bcd	20,5	19,3
10	0,8		28,8 cdef	41,4 efg	16,6 ab	12,9	38,7 abc	45,1 bcd	18,0	19,3
11	1,6		29,6 def	48,4 ghi	18,6 ab	12,1	37,8 abc	44,7 bcd	17,8	18,8
12	0,1		24,4 abc	27,5 bc	16,5 ab	14,2	35,8 ab	42,2 ab	19,5	19,8
13	0,2	50 % P eingemischt +	26,6 bcde	31,8 bcd	17,0 ab	7,5	35,9 ab	42,1 ab	20,5	19,5
14	0,4	50 % P Depot	27,0 bcde	37,9 def	13,7 a	13,3	35,7 ab	43,5 abcd	18,5	18,5
15	0,8		31,3 efg	46,5 fgh	18,9 ab	12,4	39,0 abc	45,0 bcd	17,8	18,3
16	1,6		35,2 g	54,3 hi	19,4 b	11,3	40,7 bc	46,4 cd	17,3	18,5
		GD Tukey, 5 %	*5,0*	*9,6*	*5,3*	*n. b.*	*5,2*	*3,4*	*n. s.*	*n. s.*

Tabelle 9: Wirkung verschiedener P-Applikationsverfahren zu Sommergerste auf den Nachbau mit Silomais

PG	P-Menge	P-Applikation zu SG	Nachbau Silomais			Fruchtfolge Sommergerste - Silomais	
			FM-Ertrag	TM-Ertrag	P-Entzug	Gesamt-Ertrag	P-Saldo
	[g P/Gefäß]		[g/Gefäß]	[g/Gefäß]	[g/Gefäß]	[g TM/Gefäß]	[g/Gefäß]
1	0	-	373 a	62 ab	0,04 ab	116 ab	-0,09 a
2	0,1		358 a	58 a	0,03 a	110 a	0,02 b
3	0,2		432 ab	73 ab	0,04 abc	135 ab	0,09 c
4	0,4	eingemischt	655 bcde	133 cdefg	0,06 abcdef	202 cde	0,25 d
5	0,8		703 cde	151 efg	0,08 efg	222 de	0,57 e
6	1,6		733 de	163 fg	0,11 g	245 e	1,24 g
7	0,1		512 abcd	90 abcd	0,05 abcde	146 abc	0,00 b
8	0,2		584 abcde	108 abcdef	0,05 abcd	164 abcd	0,10 c
9	0,4	Depot	607 abcde	117 bcdefg	0,05 abcde	173 bcd	0,29 d
10	0,8		698 cde	142 defg	0,06 bcdef	209 de	0,64 f
11	1,6		681 bcde	145 defg	0,08 defg	214 de	1,39 j
12	0,1		395 a	68 ab	0,04 ab	126 ab	0,01 b
13	0,2	50 % P	475 abc	79 abc	0,04 abcd	140 ab	0,09 c
14	0,4	eingemischt +	547 abcde	98 abcde	0,05 bcde	163 abcd	0,27 d
15	0,8	50 % P Depot	780 e	166 g	0,07 cdefg	236 e	0,61 ef
16	1,6		772 e	167 g	0,09 fg	243 e	1,33 h
		GD Tukey, 5 %	*254*	*56*	*0,03*	*60*	*0,04*

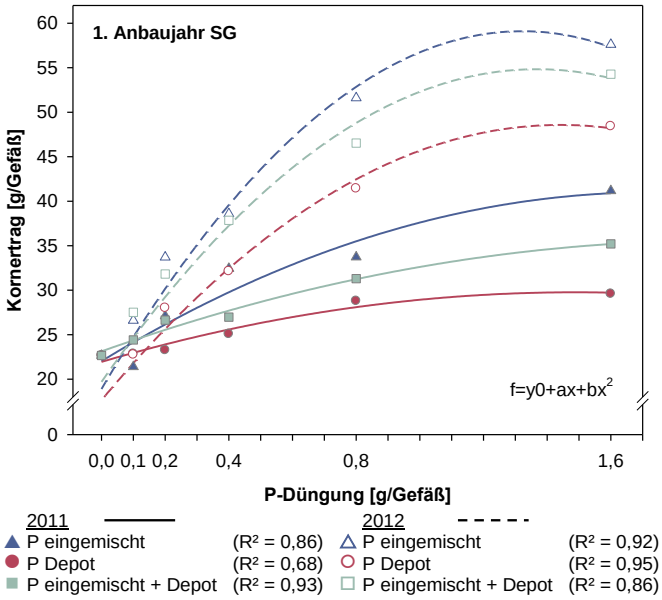

Abbildung 14: Mittlerer Kornertrag (TM) von Sommergerste in Abhängigkeit von der P-Düngung

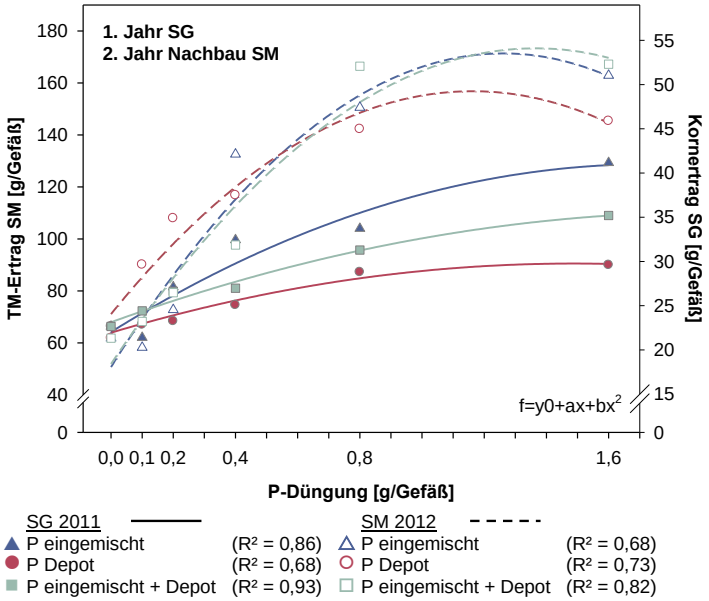

Abbildung 15: Mittlerer TM-Ertrag von Sommergerste und von Silomais im Nachbau in Abhängigkeit von der P-Düngung

Die P-Entzüge der Sommergerste korrelierten mit den Kornerträgen: die niedrigsten Entzüge traten in den Prüfgliedern mit der Depotablage auf, die höchsten, in denen der Dünger eingemischt wurde. Im Jahr 2011 konnten statistisch gesicherte Interaktionen zwischen Düngermenge und der Art der Düngerablage festgestellt werden. Bei einer Düngergabe in Höhe von 1,6 g P/ Gefäß unterschieden sich die verschiedenen Applikationen signifikant voneinander (Tabelle 10, Abbildung 16). 2012 wurden signifikante Unterschiede bei der Applikation und der Düngermenge festgestellt, es traten keine signifikanten Wechselbeziehungen zwischen den beiden Faktoren auf. Der mittlere Korn- sowie Gesamt-(Korn und Stroh) P-Entzug lag bei den Depotvarianten signifikant niedriger als bei den anderen beiden Varianten der Düngerablage.

Auch bei dem nach der Sommergerste angebauten Mais waren die P-Entzüge in den eingemischten Varianten am höchsten, gefolgt von den Varianten „eingemischt + Depot“ (Tabelle 11, Abbildung 17). Dagegen lagen bei einer geringen P-Versorgung mit 0,1 bzw. 0,2 g P/ Gefäß die P-Aufnahmen bei der Depotdüngung höher.

Tabelle 10: P- und N-Entzüge Gefäßversuch P-Düngung Sommergerste

PG	P-Menge	P-Applikation	P-Entzug [g/Gefäß]				N-Entzug [g/Gefäß]			
			Korn		Gesamt		Korn		Gesamt	
	g P/Gefäß		2011	2012	2011	2012	2011	2012	2011	2012
1	0	-	0,04 a	0,05 a	0,05 a	0,06 a	0,56 a	0,43 a	1,25 ab	0,79 a
2	0,1		0,04 a	0,06 abc	0,05 a	0,07 ab	0,55 a	0,65 bc	1,19 a	0,98 abc
3	0,2		0,06 abc	0,09 bcd	0,07 ab	0,10 bc	0,69 bc	0,80 cde	1,29 abc	1,13 bcde
4	0,4	eingemischt	0,09 def	0,11 de	0,10 c	0,12 cd	0,87 de	0,89 def	1,46 cde	1,24 cdef
5	0,8		0,12 gh	0,16 fg	0,15 e	0,17 ef	0,97 e	1,04 f	1,52 de	1,36 ef
6	1,6		0,21 i	0,23 i	0,26 h	0,25 h	1,18 f	1,10 f	1,75 fgh	1,42 f
7	0,1		0,05 ab	0,06 ab	0,05 a	0,07 ab	0,58 ab	0,58 ab	1,30 abc	0,88 ab
8	0,2		0,05 ab	0,07 abc	0,05 a	0,08 ab	0,59 ab	0,69 bcd	1,30 abc	1,01 abc
9	0,4	Depot	0,05 ab	0,09 cd	0,06 ab	0,10 bc	0,64 abc	0,80 cde	1,27 ab	1,12 bcde
10	0,8		0,08 cde	0,14 ef	0,10 c	0,15 de	0,77 cd	0,96 ef	1,38 bcd	1,30 def
11	1,6		0,10 efg	0,18 gh	0,13 de	0,20 fg	0,88 de	1,05 f	1,81 gh	1,35 ef
12	0,1		0,04 ab	0,08 abcd	0,05 a	0,08 ab	0,64 abc	0,69 bcd	1,56 de	1,03 abcd
13	0,2		0,05 ab	0,08 bcd	0,07 ab	0,09 bc	0,73 c	0,42 a	1,64 efg	0,76 a
14	0,4	50 % P eingemischt + 50 % P Depot	0,07 bcd	0,11 de	0,08 bc	0,11 c	0,76 cd	0,90 def	1,63 ef	1,25 cdef
15	0,8		0,10 fg	0,14 f	0,12 d	0,15 e	0,95 e	1,03 f	1,81 fgh	1,40 ef
16	1,6		0,14 h	0,21 hi	0,18 g	0,22 gh	1,10 f	1,09 f	1,87 h	1,42 f
		GD Tukey, 5 %	*0,02*	*0,03*	*0,02*	*0,03*	*0,13*	*0,21*	*0,18*	*0,29*

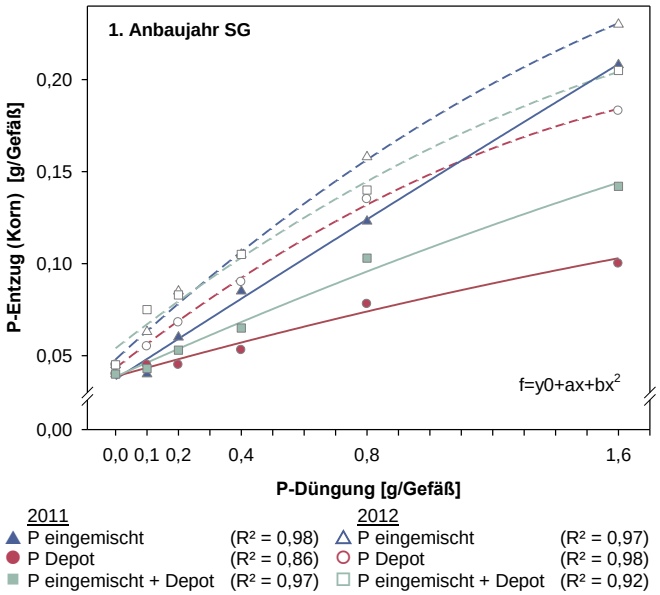

Abbildung 16: Mittlerer P-Entzug (Korn) von Sommergerste in Abhängigkeit von der P-Düngung

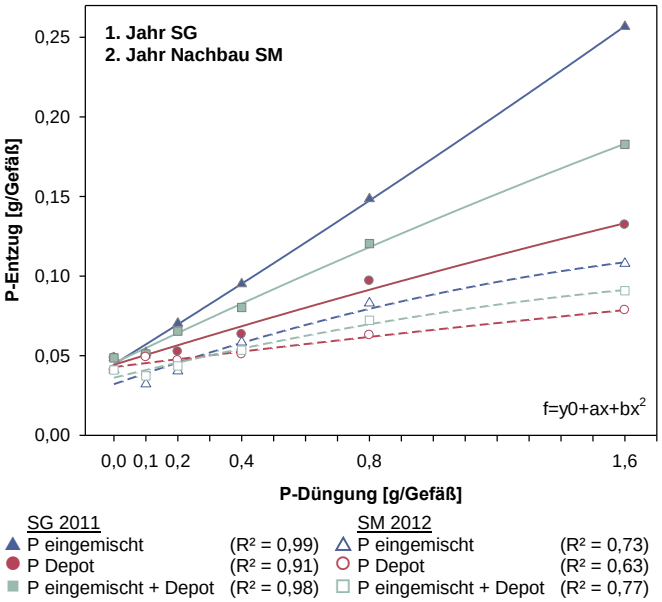

Abbildung 17: Mittlerer P-Entzug von Sommergerste (Korn+Stroh) und von Silomais im Nachbau in Abhängigkeit von der P-Düngung

Der P-Saldo für die Fruchtfolge Sommergerste - Silomais weist signifikante Wechselwirkungen zwischen den beiden Einflussfaktoren Düngung und Applikation auf. Signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen Ausbringungsarten konnten nur für die höchste ausgebrachte P-Menge (1,6 g P/Gefäß) in der Reihenfolge „eingemischt“ > „eingemischt + Depot“ > „Depot“ festgestellt werden (Tabelle 9). Bei dem mit Phosphor niedrig versorgten Boden war für die P-Düngung mit geringen Mengen die Depotdüngung die effizientere Methode der Düngeapplikation. Wurden dagegen höhere P-Mengen ausgebracht, brachte die Depotdüngung keine Vorteile mehr. Hier führte das Einmischen des P-Düngers in den Boden oder auch die Kombination aus Einmischen und Depotablage zu höheren Erträgen und zu einer effizienteren P-Ausnutzung (Abbildung 18).

Mit zunehmendem P-Bilanzüberschuss stiegen die P_{CAL}-Gehalte im Boden nach Ernte des Silomaises an (Abbildung 19). Eine P-Düngung auf Höhe des Entzuges war nicht ausreichend um den Ausgangsgehalt an P_{CAL} im Boden zu erhalten. Im Vergleich zu den beiden anderen Applikationsformen führten höhere P-Düngemengen bei der Depotdüngung zu höheren P_{CAL}-Gehalten im Boden. Um optimale Erträge zu erzielen waren in der Fruchtfolge mit Mais höhere P_{CAL}-Gehalte erforderlich. Die Düngung mit geringen P-Mengen und die Depotdüngung konnten den Pflanzenbedarf an Phosphor nur unzureichend decken und führten zu geringen Erträgen (Abbildung 20).

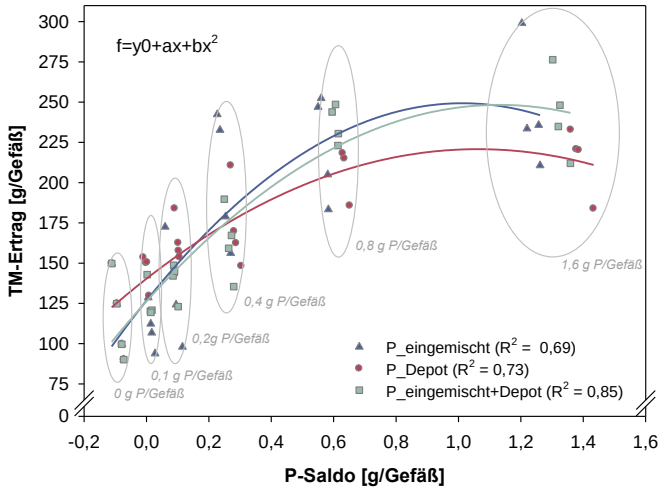

Abbildung 18: Beziehung zw. P-Saldo und TM-Ertrag der Fruchtfolge SG-SM in Abhängigkeit von der P-Düngung

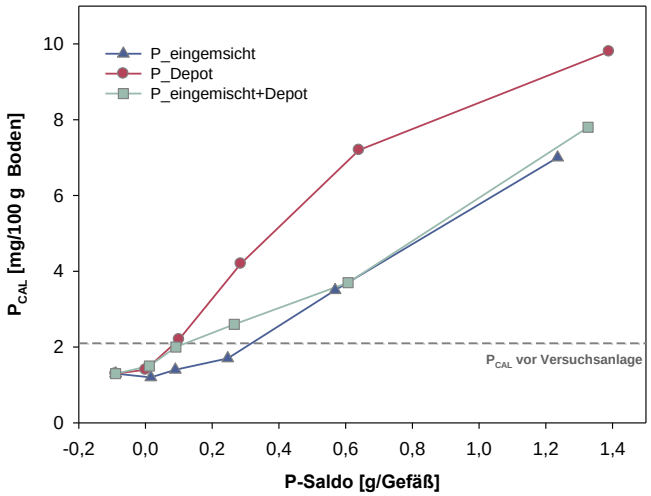

Abbildung 19: Beziehung zw. P-Saldo und P_{CAL}-Gehalt im Boden nach der Fruchtfolge SG-SM in Abhängigkeit von der P-Düngung

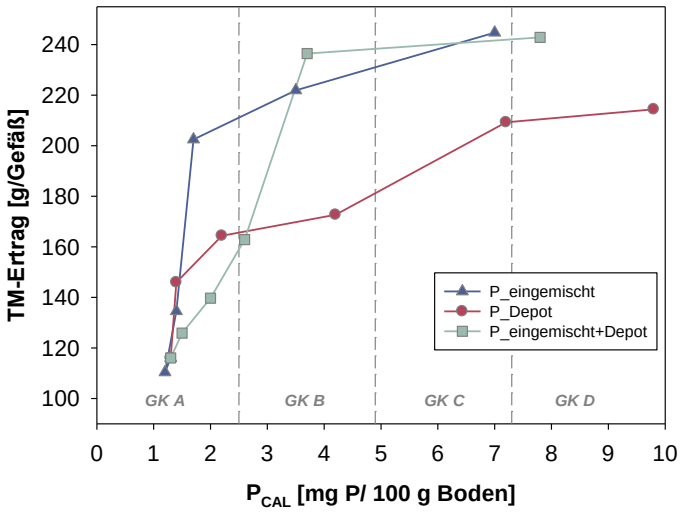

Abbildung 20: Beziehung zw. P_{CAL}-Gehalt im Boden nach Ernte von SM und TM-Ertrag der Fruchtfolge SG-SM in Abhängigkeit von der P-Düngung

Mais

In einem dritten Gefäßversuch wurde die Wirkung der verschiedenen Applikationsarten der Düngerablage auf den Ertrag von Silomais untersucht. In beiden Anbaujahren traten signifikante Wechselbeziehungen zwischen den Faktoren Applikation und Düngermenge bezogen auf den TM-Ertrag und dem P-Entzug auf. Bis auf wenige Ausnahmen wurden die niedrigsten TM-Erträge und P-Entzüge bei der Depotdüngung und die höchsten bei der Kombination aus Einmischen und Depot erreicht (Tabelle 11, Abbildung 21, Abbildung 22).

Tabelle 11: Ertrag sowie P-und N-Entzug Gefäßversuch P-Düngung Silomais

PG	P-Menge g P/Gefäß	P-Applikation	FM-Ertrag [g/Gefäß]		TM-Ertrag [g/Gefäß]		P-Entzug [g/Gefäß]		N-Entzug [g/Gefäß]	
			2011	2012	2011	2012	2011	2012	2011	2012
1	0	-	576 a	655 a	105 a	131 a	0,06 a	0,08 ab	2,31	1,40 abcd
2	0,1	eingemischt	709 bc	755 bcd	127 bc	162 bc	0,07 ab	0,09 bc	2,43	1,44 abcd
3	0,2		763 cd	788 bcde	141 bcd	171 bcdef	0,08 ab	0,10 d	2,53	1,45 abcd
4	0,4		826 de	803 bcde	155 defg	176 cdef	0,11 bcd	0,10 cd	2,52	1,50 cd
5	0,8		882 e	798 bcde	162 efg	187 fgh	0,18 ef	0,10 d	2,71	1,32 ab
6	1,6		900 e	835 de	161 efg	200 gh	0,28 h	0,15 g	2,81	1,48 bcd
7	0,1	Depot	672 b	728 ab	126 bc	155 b	0,07 ab	0,09 bc	2,59	1,34 abc
8	0,2		645 ab	753 bcd	122 ab	166 bcde	0,08 abc	0,07 a	2,98	1,30 a
9	0,4		726 bc	828 cde	141 bcd	188 fgh	0,08 abc	0,10 cd	2,37	1,46 abcd
10	0,8		830 de	798 bcde	160 defg	186 efgh	0,13 cd	0,12 e	2,60	1,34 abc
11	1,6		893 e	785 bcde	165 fg	182 cdefg	0,22 fg	0,14 f	2,72	1,42 abcd
12	0,1	50 % P eingemischt + 50 % P Depot	676 b	748 bc	134 bc	166 bcd	0,07 ab	0,07 a	2,45	1,46 abcd
13	0,2		712 bc	775 bcde	146 cdef	173 bcdef	0,08 ab	0,08 ab	2,43	1,38 abcd
14	0,4		725 bc	805 bcde	145 cde	183 defg	0,09 abc	0,10 cd	2,31	1,51 d
15	0,8		829 de	818 cde	163 efg	190 fgh	0,15 de	0,10 d	2,57	1,33 ab
16	1,6		883 e	840 e	170 g	204 h	0,23 gh	0,16 g	2,68	1,81 e
		GD Tukey, 5 %	*83*	*82*	*20*	*20*	*0,04*	*0,01*	*n. s.*	*0,17*

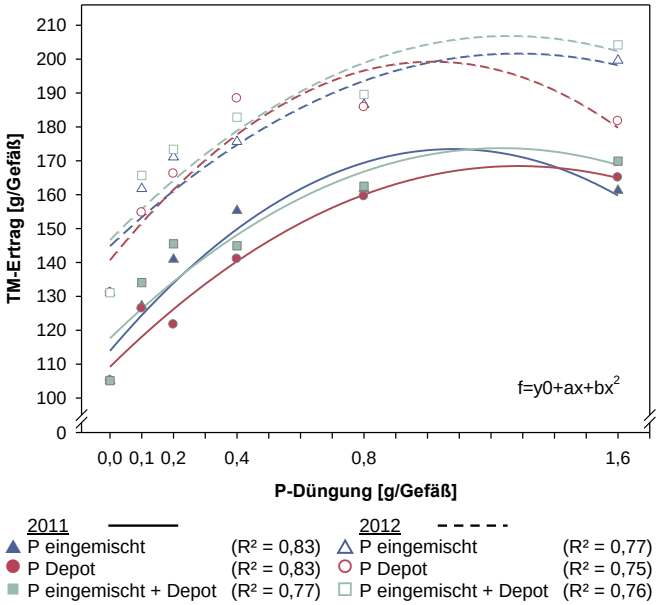

Abbildung 21: Mittlerer TM-Ertrag von Silomais in Abhängigkeit von der P-Düngung

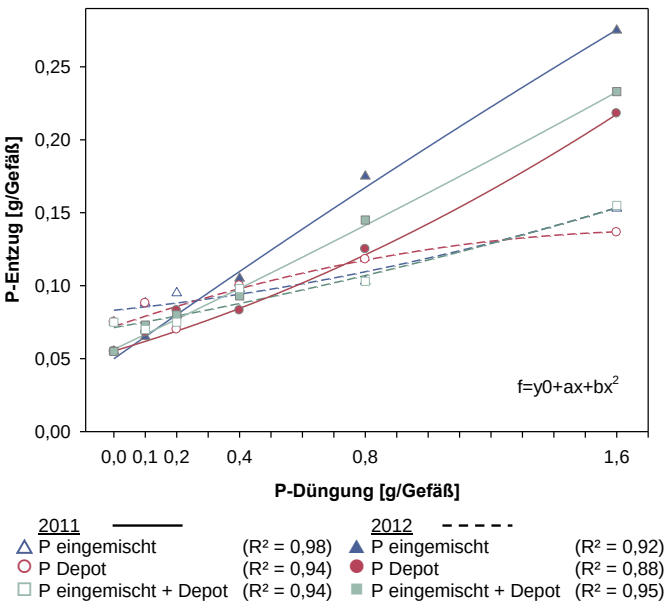

Abbildung 22: Mittlerer P-Entzug von Silomais in Abhängigkeit von der P-Düngung

Zusammenfassung und Diskussion

In beiden Versuchsjahren führten steigende P-Gaben zu signifikanten Mehrerträgen bei den untersuchten Fruchtarten Winterweizen, Sommergerste und Silomais. Ursache hierfür ist der niedrige Versorgungszustand des eingesetzten Bodens (Gehaltsklasse A). Nur bei einer ausreichend hohen P-Zufuhr (mindestens GK C) konnten optimale Erträge erreicht werden. Eine P-Düngung in Höhe des P-Entzuges reichte nicht aus, um ausreichend hohe Erträge zu erhalten. Im Vergleich zur reinen Getreidefruchtfolge erhöhte sich der P-Bedarf durch den Anbau von Mais in der Fruchtfolge.

Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Applikationsarten „eingemischt“, „Depot“ und der Kombination aus „eingemischt+Depot“ waren dabei teilweise signifikant. Oftmals traten signifikante Wechselbeziehungen zwischen den beiden Einflussfaktoren „Düngermenge“ und „Applikationsart“ auf.

Im Jahr der erfolgten P-Düngung reagierten Winterweizen und Sommergerste in der Regel auf den eingemischten Dünger mit den höchsten Erträgen, gefolgt von der Variante „eingemischt und Depot“. Bei der reinen Depotdüngung lagen die Erträge meistens am niedrigsten. Das trifft auch für den angebauten Silomais zu, bei dem jedoch auch die Kombination aus Einmischen und Depot zu Ertragsvorteilen führte.

Die Nachwirkung der P-Düngung auf die mit P ungedüngte Folgefrucht zeigte dagegen differenzierte Ergebnisse für die Fruchtarten Sommergerste und Silomais. Die dem Winterweizen nachgebaute Sommergerste reagierte vor allem in den höheren Düngungsstufen auf die Depotdüngung mit Mehrerträgen. Der Silomais, bei dem die Düngung zur Vorfrucht Sommergerste erfolgte, profitierte dagegen eher im niedrigen Versorgungsbereich von der Depotablage. Es ist davon auszugehen, dass die höheren Erträge der Vorfrucht und damit der höhere P-Entzug in den eingemischten Varianten zu geringeren P-Ausgangsgehalten für die Folgefrucht geführt haben. Noch bedeutender dürfte sein, dass der in Form von Depots abgelegte leichtlösliche Phosphor besser vor dem auch als „Alterung“ bekannten Prozess – der Bildung schwerlöslicher Phosphate - geschützt wurde. Bei den eingemischten Varianten kann man dagegen davon ausgehen, dass ein größerer Teil des leichtlöslichen P-Düngers inzwischen durch Festlegungsprozesse im Boden gebunden wurde und somit nicht mehr pflanzenverfügbar war. Dass Silomais und Sommergerste darauf verschieden reagierten, liegt an der fruchtartenbedingten unterschiedlichen Durchwurzelung des Bodens und der durch die Gefäße bedingten Begrenzung des Wurzelraumes. Sommergerste weist unter Feldbedingungen eine relativ geringe Durchwurzelung auf und gilt auch aufgrund ihrer kurzen Vegetationszeit als eine Fruchtart, die schnell auf P-Mangel reagiert. Von Mais ist bekannt, dass er vor allem in seiner Jugendentwicklung ein ausgesprochen schlechtes Phosphoraneignungsvermögen aufgrund seines langsamen Wurzelwachstums aufweist. Weil aber besonders in dieser Phase ein hoher P-Bedarf zum Aufbau der Biomasse besteht, reagiert er schnell mit Mangelerscheinungen. Unter Freilandbe-

dingungen könnte er durch verstärktes Wurzelwachstum tiefere Bodenschichten zur Nährstoffausnutzung erschließen. Untersuchungen zur Unterfußdüngung beim Mais (SUNTHEIM 1990) zeigten, dass der positive Effekt einer beschleunigten Entwicklung durch die Düngerablage in Wurzelnähe bis zur Ernte in Form von höheren Trockenmasseerträgen erhalten bleibt.

Weil Phosphat im Boden durch Diffusionsprozesse nur über geringe Entfernungen transportiert wird, steht den Pflanzen unter Feldbedingungen nicht das gesamte Bodenvolumen zur P-Aufnahme zur Verfügung. Entscheidend ist die räumliche Erschließung durch ein möglichst intensives Wurzelwachstum. Dagegen bilden die Pflanzen in den Gefäßen eine viel intensivere Durchwurzelung aus, welches die räumliche Zugänglichkeit erhöht und somit zu einer besseren P-Aufnahme führt. Das dürfte vor allem bei den eingemischten Varianten zu einem Vorteil geführt haben. Bei der in der Praxis durchgeführten Unterfußdüngung zum Mais wird der Dünger entlang eines Düngerbandes in etwa 5 cm Abstand in 5 cm Tiefe zum Mais ausgebracht. In den Gefäßversuchen stand ein Depot in der Gefäßmitte vier Pflanzen zur Verfügung. Im Vergleich zum Freiland dürfte hier die räumliche Erschließung vermindert sein und die Depotwirkung reduzieren. Die Ergebnisse der Gefäßversuche sind damit nur sehr eingeschränkt auf Feldbedingungen übertragbar.

(B) Feldversuch Forchheim zur P-Unterfußdüngung

Material und Methoden

Der Versuch wurde auf einer bereits mehrjährig pfluglos bestellten und P-niedrig (Tabelle 12) versorgten Praxisfläche (GK B) in Nähe der Versuchsstation Forchheim im Erzgebirge angelegt. Der Standort Forchheim (565 m üb. NN) ist geprägt vom feuchten, kühlen Klima der mittleren Berglagen. Die mittleren, langjährigen Niederschläge liegen bei 879 mm, die Durchschnittstemperatur bei 6,5 °C. Es handelt sich um einen Verwitterungsstandort aus Gneis.

Untersucht wird die Wirkung der Unterfußdüngung mit Diammonphosphat (DAP) zur Aussaat im Vergleich zur breitwürfigen Triplesuperphosphat-(TSP)-Ausbringung zur Aussaat bzw. zum Vegetationsbeginn in zwei Düngungsstufen (20 und 40 kg P/ha). Zusätzlich existiert eine Variante mit einem stabilisierten P-Dünger, der zu Vegetationsbeginn ausgebracht wird (Prüfglieder siehe Tabelle 13). Im ersten Versuchsjahr (2010/11) des auf drei Jahre angelegten statischen Versuches wurde als stabilisierter P-Dünger „D-Coder Pac 22 Duo-P“ (3 % N; 22 % P_2O_5; 7,3 % S) verwendet, ab dem zweitem Jahr „0-18-0“ (18 % P_2O_5; 12 % S).

Die Unterfußdüngung wurde mit einer Direktsaat-Parzellendrillmaschine mit Cross-Slot-Technik (Abbildung 23) durch die HTW Dresden durchgeführt. Bei der Cross-Slot-Maschine wird der Dünger (flüssig und Granulat) bänderförmig auf der rechten Seite abgelegt und die Körner auf der linken Seite (Abbildung 24).

Tabelle 12: Charakterisierung Versuchsstandort Forchheim (V, sL) vor Anlage des Versuches

	N_{min}		pH	P_{CAL}	P_t	K_{CAL}
[cm]	[kg/ha]	[cm]		[mg/100g]	[mg/100g]	[mg/100g]
0-30	23,7	0-20	5,8	2,6	190	12,1
30-60	5,6	20-40	5,5	0,9	170	2,8
		40-60	5,4	1,1	320	1,4

(Probenahme August 2010)

Tabelle 13: Feldversuch zur Unterfußdüngung Forchheim - geprüfte Varianten

PG	P-Düngung [kg/ha]	Applikation	*(2010/2011)*
1	0	-	
2	20	DAP-Unterfußdüngung mit Aussaat	*(zur Aussaat WRa)*
3	40		
4	20	TSP breitwürfig zur Aussaat	*(zur Aussaat WRa)*
5	40		
6	20	TSP breitwürfig zu Vegetationsbeginn	*(zur Aussaat SG)*
7	40		
8	20	stabilisierter P-Dünger breitwürfig zu Vegetationsbeginn	*(zur Aussaat SG)*

**Winterraps (WRa) wurde im Frühjahr 2011 umgebrochen, weil Bestand nicht versuchstauglich und anschließend Sommergerste (SG) parzellengenau neu ausgesät*

Abbildung 23: Cross-Slot-Gerät der HTW Dresden

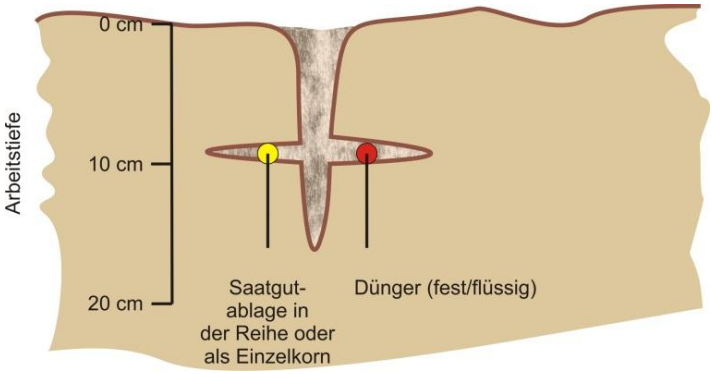

Abbildung 24: Schema Saatgut- und Düngerablage mit Cross-Slot-Technik (ALBERT 2012)

Die N-Düngung erfolgte praxisüblich. Der im P-Dünger (DAP) enthaltene Stickstoff (PG 2 und 3) wurde bei der Bemessung der N-Gabe berücksichtigt. Zu Vegetationsbeginn im Frühjahr wurde bedarfsabhängig auf Grundlage der N_{min}-Gehalte im Boden nach Berechnung mit BEFU (Programmsystem zur Düngungsberatung und Nährstoffbilanzierung in Sachsen) gedüngt. Insgesamt wurden zur Sommergerste 120 kg N/ ha und zum Winterraps 250 kg N/ ha ausgebracht. Die S-Düngung erfolgte im Frühjahr mit 1 dt Kieserit/ ha; der Einsatz von Herbiziden, Fungiziden und Insektiziden einheitlich nach Befallsrichtwerten des integrierten Pflanzenbaus.

Im ersten Versuchsjahr (2010/11) wurde Winterraps (Sorte Visby) ausgesät. Aufgrund der ungünstigen Witterungsbedingungen 2010 und den damit verbundenen schlechten Aussaatbedingungen ging der Raps sehr schlecht entwickelt in den Winter. Im Frühjahr 2011 wurde der nicht versuchstauglich entwickelte Winterrapsbestand umgebrochen und anschließend Sommergerste (Sorte Grace) gedrillt (24.03.2011). Auf Grund der eingesetzten Herbizide war eine Bodenbearbeitung (Grubbern, 15 cm tief) erforderlich. Die Parzellenstruktur blieb jedoch erhalten. Die guten Wachstumsbedingungen im Mai und Juni 2011 sorgten für eine sehr gute Entwicklung der Sommergerstenbestände. Die Ernte (09.08.2011) erfolgte bei noch relativ hoher Feuchte (18 %), um einen zeitigen Aussaattermin des nachfolgenden Winterrapses zu gewährleisten.

Die Aussaat des Winterrapses (Sorte Dimension) erfolgte 2011 bereits relativ früh (12.08.2011.), weil bei Direktsaat zeitige Saattermine empfohlen werden. Auf Grund der guten Wachstumsbedingungen im September und Oktober 2011 gingen die Pflanzen trotz des sehr geringen Niederschlages im November gut entwickelt in den Winter. Bis zur Ernte (08.08.2012) bildete sich ein üppiger Bestand aus stark verzweigten Einzelpflanzen aus.

Die Witterungsbedingungen in den Versuchsjahren 2010/2011 und 2011/2012 im Vergleich zum langjährigen Mittel sind der Abbildung 25 zu entnehmen.

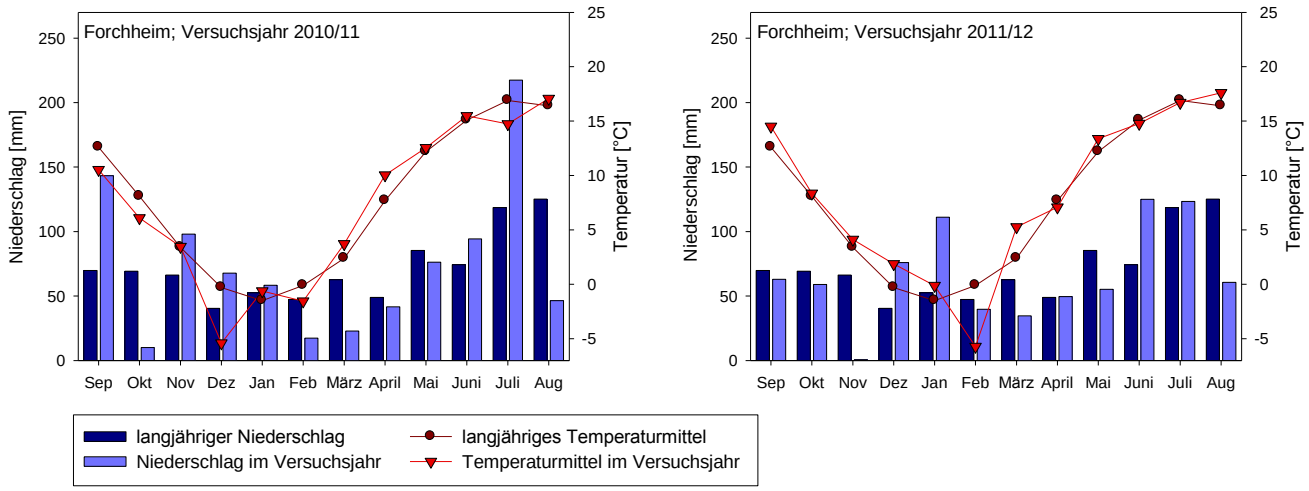

Abbildung 25: Temperaturverlauf und Niederschlagsverteilung Forchheim in den Versuchsjahren 2010/2011 und 2011/2012 im Vergleich zum langjährigen Mittel (langjähriges Mittel seit 1999)

Der Feldversuch wurde als Blockanlage mit vier Wiederholungen angelegt. Die Größe der Anlageparzelle betrug 30 m^2, geerntet wurde eine Kernparzelle von 15 m^2.

Ergebnisse

Der Versuch wurde auf einem Verwitterungsstandort auf Gneis angelegt. Böden dieses Ursprungs sind durch ein starkes Phosphatfixierungsvermögen gekennzeichnet. In der Regel weisen diese Standorte hohe Gesamt-Phosphorgehalte (P_t) bei gleichzeitig niedrigen Gehalten an pflanzenverfügbaren Phosphor (P_{CAL}) auf (RICHTER & SUNTHEIM 1993). Die Bodenuntersuchung vor Versuchsanlage ergab, dass der Anteil von P_{CAL} (78 kg/ ha) an P_t (5.700 kg/ ha) nur 1,37 % beträgt. Die Ursache hierfür liegt in der intensiven Verwitterung des Ausgangsgesteins und der Bildung entsprechender Verwitterungsprodukte, die aufgrund ihrer Mineralstruktur in der Lage sind, viel Phosphor zu binden. Zur Sicherung hoher Erträge und zur Verringerung der P-Fixierung sollte die P-Düngung auf diesen Böden nicht auf Vorrat, sondern gezielt ggf. auch als Depot erfolgen (RICHTER & SUNTHEIM 2003). Mehrjährige Feldversuche mit Braugerste auf einem Gneisverwitterungsstandort belegen, dass eine P-Düngung zur Aussaat der Herbstapplikation im Ertrag eindeutig überlegen ist (ALBERT 2011).

Die applizierte P-Düngung zur Sommergerste führte in allen Prüfgliedern zu einem Ertragsanstieg (Tabelle 14, Abbildung 26). Signifikante Unterschiede im Kornertrag zur ungedüngten Kontrollvariante traten bei einer Düngung mit 40 kg P/ ha als TSP ausgebracht im Herbst und bei der Düngung mit 20 kg P/ ha des stabilisierten P-Düngers auf. Eine Anhebung der Düngermenge von 20 auf 40 kg P/ ha führte innerhalb einer Applikationsart zu keinem nennenswerten Ertragsanstieg. Nur bei der Düngung mit TSP im Herbst führte eine höhere Düngungsmenge auch zu einem deutlichen, wenn auch nicht signifikanten Mehrertrag von 7,8 dt/ ha. Eine Vorteilswirkung der Frühjahrsdüngung im Vergleich zur Herbstapplikation konnte im Versuchsjahr 2010/2011 nicht nachgewiesen werden. Die höchsten Erträge wurden mit 64,1 dt/ ha bei 40 kg P/ ha TSP, im Herbst ausgebracht, erreicht (Tabelle 14, Abbildung 26).

Die Anwendung des stabilisierten P-Düngers führte zu vergleichsweise guten Ergebnissen. Mit 20 kg P/ha des stabilisierten Düngers, verabreicht im Frühjahr, konnten etwa gleich hohe Kornerträge (63,8 dt/ ha) wie bei der Düngung mit 40 kg P/ ha TSP im Herbst erzielt werden. Laut Hersteller wird das leichtlösliche Phosphat durch einen patentierten „Duo-P-Komplex“ im Boden vor Festlegungsprozessen geschützt und kann bei Bedarf durch die Pflanzenwurzeln aufgenommen werden. Gleichzeitig soll durch die Verwendung des Düngers das Wurzelwachstum stimuliert und somit die Nährstoffaufnahme erhöht werden. Bei den erzielten Rohproteingehalten (im Mittel der PG 10,2 %) und dem P-Gehalt im Korn (im Mittel der PG 0,33 kg P/ ha) traten keine Unterschiede zwischen den Prüfgliedern auf. Der P-Gesamtentzug durch die Pflanze (Korn und Stroh) unterschied sich in den Varianten „40 kg P/ ha TSP im Herbst“ und „20 dt/ ha stabilisierter P-Dünger zur Aussaat SG“ durch signifikant höhere Entzüge von der ungedüngten Variante. Zusätzlich konnten signifikant höhere P-Entzüge bei der Düngung mit dem stabilisierten Dünger im Vergleich zu den anderen mit gleicher P-Menge (20 kg P/ ha) gedüngten Varianten (PG 2, PG 4, PG 6) festgestellt werden.

Tabelle 14: Ertrag, Rohproteingehalt und P-Entzug von Sommergerste in Abhängigkeit von der P-Düngung (Forchheim, 2011)

PG	P-Düngung [kg/ha]	Applikation	Ertrag [dt/ha]	Rohprotein-gehalt [%]	P-Entzug (Korn) [kg P/ ha]	P-Entzug (gesamt) [kg P/ ha]	P-Saldo [kg P/ ha]
1	0	-	54,6 a	10,1	15,8 a	17,5 a	-17,5 a
2	20	Unterfußdüngung als DAP mit der Aussaat WRa*	59,0 ab	10,0	16,7 ab	18,7 ab	1,3 c
3	40		60,0 ab	10,5	17,3 ab	19,4 abc	20,6 d
4	20	TSP breitwürfig zur Aussaat WRa*	56,3 ab	10,2	16,1 ab	18,0 a	2,0 c
5	40		64,1 b	10,2	17,9 ab	20,4 bc	19,6 d
6	20	TSP breitwürfig zur Aussaat SG	58,5 ab	10,2	15,9 a	18,2 a	1,8 c
7	40		60,4 ab	10,1	16,6 ab	19,2 abc	20,8 d
8	20	stabilisierter P-Dünger breitwürfig zur Aussaat SG	63,8 b	10,3	18,2 b	21,2 c	-1,2 b
		Grenzdifferenz $_{Tukey, 5\%}$	8,0	n. s.	2,2	2,2	2,2

**Winterraps (WRa) wurde im Frühjahr 2011 umgebrochen*

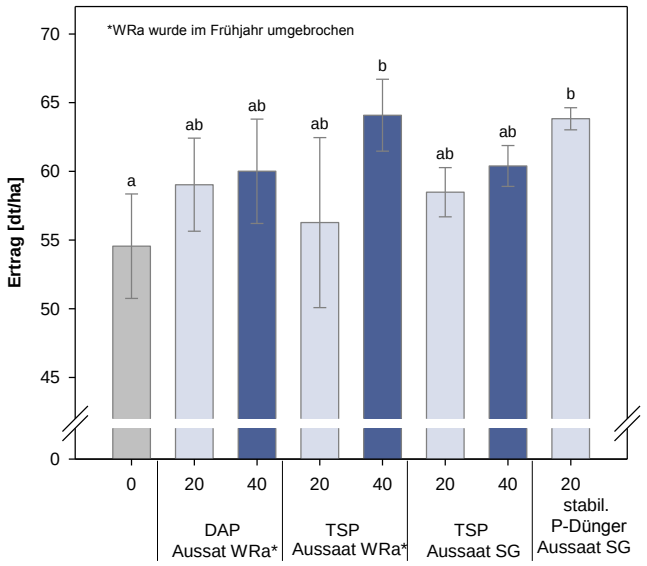

Abbildung 26: Mittlere sowie minimale und maximale Sommergerstenerträge [dt/ha, 86 % TS] in Abhängigkeit von der P-Düngung (Forchheim, 2011)

(unterschiedliche Buchstaben = signifikante Unterschiede Tukey-Test; P-Düngungsverfahren siehe Tabelle 14)

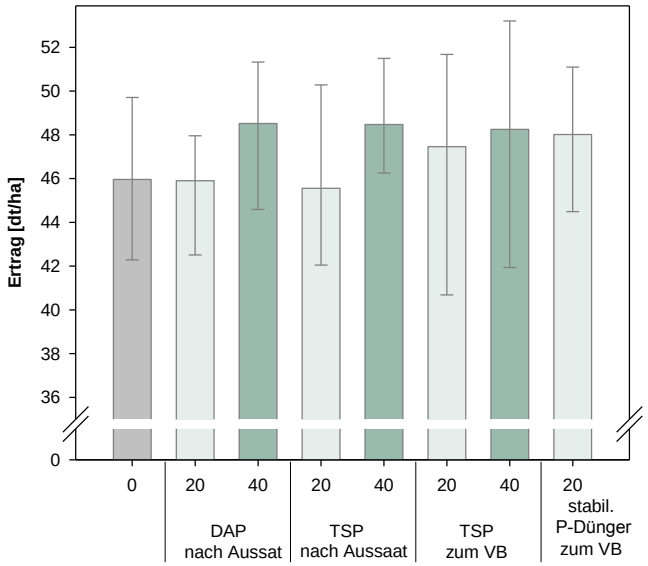

Abbildung 27: Mittlere sowie minimale und maximale Winterrapserträge [dt/ha, 91 % TS] in Abhängigkeit von der P-Düngung (Forchheim, 2012)

(keine signifikanten Unterschiede mit Tukey-Test; P-Düngungsverfahren siehe Tabelle 14)

Im Vergleich zur Sommergerste weist Winterraps einen deutlich höheren P-Bedarf auf. Jedoch steht ihm zum einen durch eine längere Vegetationszeit mehr Zeit zur Verfügung, um seinen P-Bedarf zu decken und zum anderen ermöglicht ihm sein intensives Wurzelwachstum, P-Vorräte besser zu erschließen. Im Untersuchungsjahr sorgten überdurchschnittliche Temperaturen für eine schnelle Bodenerwärmung im Frühjahr (Abbildung 25). Verbunden mit einer ausreichenden Bodenfeuchte führte das zu einer starken Mineralisierung im Boden und damit zu einer besseren Verfügbarkeit des Phosphors. Zu der Zeit, als der spezifische P-Bedarf für den Winterraps besonders hoch war (Übergang von vegetative in generative Phase), herrschten somit gute Wachstumsbedingungen. Die bessere Pflanzenverfügbarkeit des Phosphors durch die verstärkte Mineralisierung sorgte für eine geringe P-Düngewirkung. Zwischen der ungedüngten und den gedüngten Varianten traten daher nur sehr geringe Ertragsunterschiede auf und das Ertragsniveau im Untersuchungsjahr lag mit 46 dt/ ha für diesen Standort insgesamt sehr hoch (Abbildung 27, Tabelle 15). Die Erträge liegen in einem Bereich zwischen 45,6 und 48,5 dt/ ha sehr eng beieinander. Die Düngung mit 20 kg P/ ha zur Aussaat des Winterrapses mit DAP als Unterfußdüngung oder breitwürfig mit TSP führte sogar zu geringfügig niedrigeren Erträgen als die ungedüngte Variante. Alle anderen Prüfglieder unterschieden sich mit einer maximalen Ertragsdifferenz von 1 dt/ ha praktisch nicht voneinander.

Tabelle 15: Ertrag von Winterraps in Abhängigkeit von der P-Düngung (Forchheim, 2012)

PG	Applikation	P-Düngung [kg/ha]	Ertrag [dt/ha]
1	-	0	46,0
2	DAP-Unterfußdüngung mit Aussaat	20	45,9
3		40	48,5
4	TSP breitwürfig zur Aussaat	20	45,6
5		40	48,5
6	TSP breitwürfig zu Vegetationsbeginn	20	47,5
7		40	48,3
8	stabilisierter P-Dünger breitwürfig zu Vegetationsbeginn	20	48,0
	Grenzdifferenz $_{Tukey, 5\%}$		n. s.

Die P_{CAL}-Gehalte nach Ernte der Sommergerste bzw. des Winterrapses zeigen, dass die gedüngten P-Mengen nicht ausreichten, um einen wirksamen Anstieg an pflanzenverfügbaren Phosphor zu erreichen (Tabelle 16).

Tabelle 16: Feldversuch zur P-Unterfußdüngung Forchheim - P_{CAL}- und pH-Werte unterschiedlicher Bodentiefen

PG	P-Düngung		P_{CAL} [mg/100 g] 0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm
vor Aussaat SG (30.08.10)			2,6	0,9	1,1
nach Ernte SG (25.07.11)					
1	0 [kg/ha]	keine P-Düngung	2,5	0,8	0,6
2	20 [kg/ha]	DAP zur Aussaat	3,2	0,8	1,0
3	40 [kg/ha]		2,8	0,7	0,7
4	20 [kg/ha]	TSP zur Aussaat	2,6	0,7	0,3
5	40 [kg/ha]		2,8	0,9	1,3
6	20 [kg/ha]	TSP zum VB	2,3	0,7	1,0
7	40 [kg/ha]		2,7	0,5	0,5
8	20 [kg/ha]	stabilisierter P-Dünger zu VB	2,7	0,6	0,6
nach Ernte WRa (15.08.12)					
1	0 [kg/ha]	ohne P-Düngung	2,9	1,4	1,1
8	40 [kg/ha]	TSP zum VB	3,2	1,1	0,9

2.2.2 P- Injektion

Die Wirkung der Injektionsdüngung von Phosphor auf verschiedene Kulturarten wurde anhand von Feldversuchen auf zwei Standorten geprüft.

(A) Feldversuch Pommritz zur P-Injektionsdüngung

Material und Methoden

Auf einer P-niedrig versorgten Praxisfläche (P_{CAL} 2,3 mg/100 g Boden) wurde die Wirkung der P-Injektion im Vergleich zur breitwürfigen P-Applikation auf Ertrag und P-Aufnahme untersucht. Die Praxisfläche liegt in der Nähe der Versuchsstation Pommritz im Landkreis Bautzen. Der Versuch wurde als statischer Versuch auf drei Erntejahre (2011, 2012, 2013) angelegt mit der Fruchtfolge Wintergerste – Winterraps – Winterweizen. In dem Versuch werden insgesamt zehn Prüfglieder in vier Wiederholungen (Blockanlage) geprüft (Tabelle 17).

Die Injektionsdüngung wurde mit einer 3-Meter-Injektionsdüngungsmaschine durchgeführt; welche eine Punktinjektion in etwa 8 cm Tiefe ermöglicht. Bei der Injektionsdüngung wird Mono-Ammoniumphosphat (Krista-MAP 12 % N, 61 % P_2O_5) als P-Dünger verwendet, die breitwürfige P-Applikation erfolgt mit Triplesuperphosphat (TSP, 46 % P_2O_5).

Die durchzuführende N-Düngung erfolgte praxisüblich. Die Höhe der jeweils ersten Stickstoffgabe zu Vegetationsbeginn im Frühjahr wurde bedarfsabhängig auf Grundlage der N_{min}-Gehalte im Boden nach Berechnung mit BEFU (Programmsystem zur Düngungsberatung und Nährstoffbilanzierung in Sachsen) festgelegt. Der im P-Dünger (Krista-MAP) bereits enthaltene Stickstoff wurde bei der Bemessung Düngungshöhe berücksichtigt. Insgesamt wurden zur Wintergerste 173 kg N/ ha und zum Winterraps 218 kg N/ ha ausgebracht. Die S-Düngung erfolgte einheitlich im Frühjahr mit 1 dt Kieserit/ ha. Pflanzenschutz wurde nach Befallsrichtwerten optimal durchgeführt. Die Größe der Anlageparzelle betrug 30 m^2, geerntet wurde eine Kernparzelle von 15 m^2. Bodenproben wurden vor Anlage, zu Vegetationsbeginn und nach der Ernte gezogen.

Tabelle 17: Feldversuch zur P-Injektion Pommritz - geprüfte Varianten

PG	P-Düngung [kg/ha]	Applikation
1	0	-
2	20	TSP streuen zur Aussaat & einarbeiten
3	40	
4	60	
5	20	P-Injektion unmittelbar nach Aussaat
6	40	
7	20	TSP streuen zum Vegetationsbeginn
8	40	
9	20	P-Injektion zum Vegetationsbeginn
10	40	

Im ersten Versuchsjahr (2010/2011) wurde Wintergerste der Sorte Lomerit angebaut. Aufgrund der vergleichsweise geringen Niederschläge im Oktober 2010 war der Aufgang der Wintergerste allgemein sehr schlecht, dafür aber gleichmäßig. Im Verlauf des Versuchsjahres trat verstärkt Rapsdurchwuchs auf, der immer wieder selektiert wurde. Zur Ernte Anfang Juli 2011 bildete sich nur ein sehr dünner, lockerer Bestand heraus. Im Jahr 2011/2012 folgte im Anbau Winterraps (Sorte Dimension), der Ende August gedrillt wurde und gut und gleichmäßig aufging. Trotz des fehlenden Niederschlages ging er gut entwickelt in den Winter und bildete bis zur Ernte im August 2012 einen gleichmäßigen Bestand heraus.

Der Verlauf der Witterung in den Versuchsjahren 2010/2011 und 2011/2012 im Vergleich zum langjährigen Mittel ist in Abbildung 28 dargestellt.

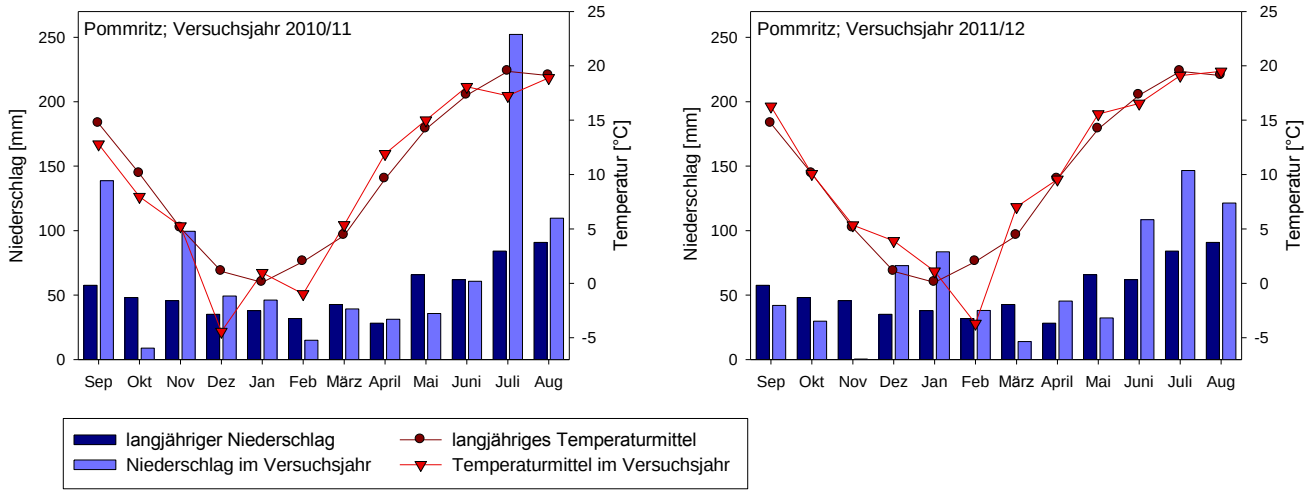

Abbildung 28: Temperaturverlauf und Niederschlagsverteilung Pommritz in den Versuchsjahren 2010/2011 und 2011/2012 im Vergleich zum langjährigen Mittel (langjähriges Mittel seit 1994)

Ergebnisse und Diskussion

Bei der Wintergerste führte mit Ausnahme der P-Injektion zur Aussaat (73,7 dt/ ha) eine Düngung mit 20 kg P/ ha zu keinem Mehrertrag im Vergleich zur ungedüngten Kontrollvariante (70,1 dt/ ha) (Tabelle 18, Abbildung 29). Die Anhebung der Düngung auf 40 kg P/ ha brachte einen deutlicheren Ertragsanstieg. Dabei wurden die höchsten Erträge erreicht, wenn der Dünger im Herbst zur Aussaat ausgebracht wurde. Die Ausbringungsart „TSP streuen & einarbeiten“ (76,8 dt/ ha) sowie „P-Injektion“ (76,2 dt/ ha) unterschieden sich dabei nicht wesentlich voneinander. Die Düngung im Frühjahr führte zu einem niedrigeren Ertrag, aber auch hier traten keine Unterschiede zwischen der Streuvariante (72,3 dt/ ha) und der P-Injektion (72,4 dt/ ha) auf. Die mit 60 kg P/ ha höchste Düngermenge, appliziert als TSP mit anschließender Einarbeitung, führte zu keinem weiteren Ertragsanstieg. Die beschriebenen Unterschiede im Ertrag waren nicht signifikant. Auch in den Rohproteingehalten und im Korn-P-Entzug traten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Prüfgliedern auf.

Tabelle 18: Ertrag, Rohproteingehalt und P-Entzug von Wintergerste in Abhängigkeit von der P-Düngung (Pommritz, 2011)

PG	P-Düngung [kg/ha]	Applikation	Ertrag [dt/ha]	Rohprotein-gehalt [%]	P-Entzug (Korn) [kg P/ ha]	P-Entzug (gesamt) [kg P/ ha]	P-Saldo [kg P/ ha]
1	0	-	70,1	12,7	13,9 ab	15,2 ab	-15,2 a
2	20	TSP streuen zur Aussaat & einarbeiten	68,8	13,0	14,0 ab	15,2 ab	4,8 b
3	40		76,8	13,3	15,7 b	17,2 b	22,8 c
4	60		76,7	12,9	14,8 ab	16,2 ab	43,8 d
5	20	P-Injektion unmittelbar nach Aussaat	73,7	13,1	14,7 ab	16,1 ab	3,9 b
6	40		76,2	13,3	15,7 b	17,0 b	23,0 c
7	20	TSP streuen zum Vegetationsbeginn	67,8	12,8	12,5 a	13,7 a	6,3 b
8	40		72,3	13,3	13,9 ab	15,1 ab	24,9 c
9	20	P-Injektion zum Vegetationsbeginn	69,8	13,0	14,1 ab	15,0 ab	5,0 b
10	40		72,4	13,1	14,3 b	15,3 ab	24,7 c
		Grenzdifferenz $_{Tukey, 5\%}$	*n. s.*	*n. s.*	*2,6*	*2,6*	*2,6*

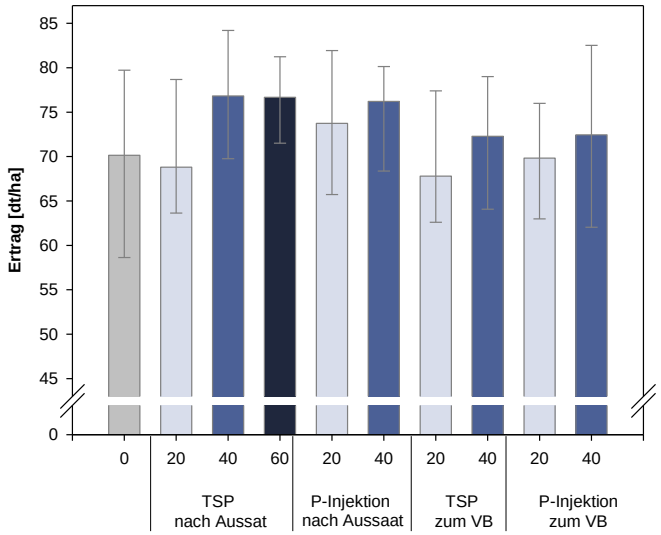

Abbildung 29: Mittlere sowie minimale und maximale Wintergerstenerträge [dt/ha, 86 % TS] in Abhängigkeit von der P-Düngung (Pommritz, 2011)
(keine signifikanten Unterschiede mit Tukey-Test)

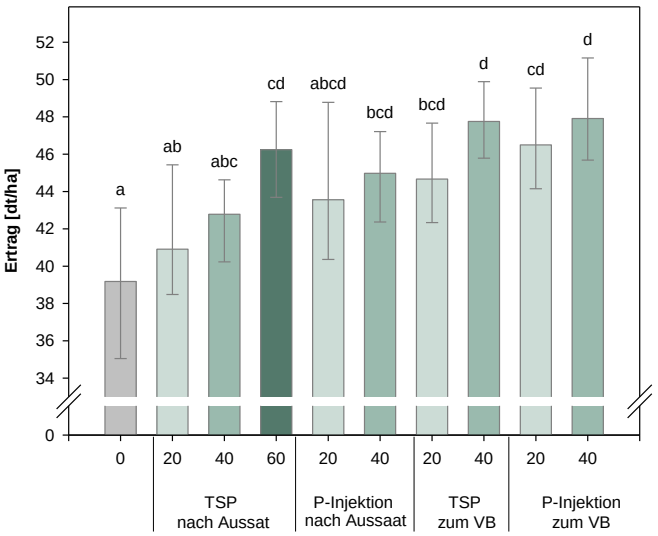

Abbildung 30: Mittlere sowie minimale und maximale Winterrapserträge [dt/ha, 91 % TS] in Abhängigkeit von der P-Düngung (Pommritz, 2012)
(unterschiedliche Buchstaben = sig. Unterschiede mit Tukey-Test)

Bei der Folgefrucht Winterraps führte eine zunehmende Düngermenge zu ansteigenden Erträgen (Tabelle 19, Abbildung 30). Die Erträge der Düngungsvarianten lagen signifikant höher als bei der ungedüngten Kontrollvariante. Nur bei der zur Aussaat des Winterrapses durchgeführten Düngung mit TSP in Höhe von 20 bzw. 40 kg P/ ha und die P-Injektion in Höhe von 20 kg P/ ha konnten keine statistisch gesicherten Unterschiede zur Nullvariante festgestellt werden. Die zeitliche Platzierung des Düngers im Frühjahr brachte deutliche Vorteile gegenüber der Herbstdüngung. Bei der P-Injektion lag der Mehrertrag der Frühjahrsdüngung im Mittel bei 2,9 dt/ ha; beim TSP abhängig von der Aufwandmenge sogar bei 3,8 und 5,0 dt/ ha. Die höchsten Erträge wurden erreicht mit 40 kg P/ ha, verabreicht im Frühjahr als TSP oder als Injektion. Diese Varianten unterschieden sich signifikant von der Düngung mit 20 bzw. 40 kg P/ ha TSP im Herbst.

Bei den im Herbst zur Aussaat gedüngten Varianten erwies sich die Injektionsdüngung als vorteilhaft. Sie führte im Vergleich zur Ausbringung von TSP zu einem Mehrertrag von über 2 dt/ ha. Für die Frühjahrsdüngung gilt das nur für die niedrige Düngemenge in Höhe von 20 kg P/ ha. Eine Düngung mit 40 kg P/ ha führte zu keinen Unterschieden zwischen den beiden Applikationsformen. Es kann davon ausgegangen werden, dass der positive Effekt der Injektionsdüngung auf einer verminderten Festlegung des leichtlöslichen Düngers im Boden beruht.

Tabelle 19: Ertrag von Winterraps in Abhängigkeit von der P-Düngung (Pommritz, 2012)

PG	P-Düngung [kg/ha]	Applikation	Ertrag [dt/ha]	Ölgehalt [%]
1	0	-	39,2 a	49,1
2	20	TSP streuen zur Aussaat & einarbeiten	40,9 ab	49,5
3	40		42,8 abc	49,1
4	60		46,2 cd	49,1
5	20	P-Injektion unmittelbar nach Aussaat	43,6 abcd	49,3
6	40		45,0 bcd	49,2
7	20	TSP streuen zum Vegetationsbeginn	44,7 bc	49,6
8	40		47,8 d	48,9
9	20	P-Injektion zum Vegetationsbeginn	46,5 cd	48,7
10	40		47,9 d	48,9
		Grenzdifferenz $_{Tukey, 5\%}$	4,9	n.s.

Die P_{CAL}-Gehalte nach Ernte der Wintergerste bzw. des Winterrapses zeigen, dass die gedüngten P-Mengen nicht ausreichten, um einen wirksamen Anstieg an pflanzenverfügbaren Phosphor zu erzielen (Tabelle 20). Abhängig von den Standortbedingungen bedarf es zur Anhebung des verfügbaren P-Gehaltes um 1 mg/100 g Boden P-Überschüsse zwischen 90 bis 210 kg/ha (ALBERT & SUNTHEIM 2004). Im Versuchsjahr 2010/2011 lag der höchste P-Saldo bei 44 kg P/ha, erreicht bei der maximalen Düngungsstufe von 60 kg P/ha (Tabelle 18)

Tabelle 20: Feldversuch zur P-Injektion Pommritz - P_{CAL}- und pH-Werte unterschiedlicher Bodentiefen

PG	P-Düngung	Applikation	P_{CAL} [mg/100 g] 0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm
vor Versuchsanlage (30.08.10)			2,3		
nach Ernte WG (25.07.11)					
1	0 [kg/ha]	ohne P-Düngung	1,6	0,6	0,4
2	20 [kg/ha]	TSP streuen zur Aussaat	1,8	0,7	0,6
3	40 [kg/ha]		1,6	0,4	0,3
4	60 [kg/ha]		1,5	0,6	0,2
5	20 [kg/ha]	P-Injektion nach Aussaat	1,4	0,7	0,2
6	40 [kg/ha]		1,0	0,5	0,3
7	20 [kg/ha]	TSP streuen zum VB	1,2	0,7	0,6
8	40 [kg/ha]		1,8	0,5	0,3
9	20 [kg/ha]	P-Injektion zum VB	1,7	0,7	0,5
10	40 [kg/ha]		2,1	0,5	0,3
nach Ernte WRa (09.08.12)					
1	0 [kg/ha]	ohne P-Düngung	1,5	1,2	0,6
8	40 [kg/ha]	TSP streuen zum VB	1,8	1,2	0,6

(B) Praxisversuch Kitzscher zur P-Injektionsdüngung

Material und Methoden

Der Versuch wurde 2011 auf einer mit Phosphor niedrig versorgten Fläche (GK B) des Landwirtschaftsbetriebes Kitzscher GmbH durchgeführt. Geprüft wurde der Einfluss von P-Applikationsart und -menge auf das Wachstum von Pflanzkartoffeln (Sorte: Satina). Der Versuch wurde als Blockanlage mit vier Wiederholungen angelegt. Der Abstand zwischen den Reihen betrug 75 cm, in der Reihe 24 cm.

Die P-Düngung erfolgte in drei Aufwandmengen (20, 40 und 60 kg P/ha) breitwürfig mit Triplesuperphosphat (TSP) und als Depot mit Monocalciumphosphat ($Ca(H_2PO_4)_2$). Die Düngung mit TSP erfolgte vor der Bodenbearbeitung bzw. dem Legen der Kartoffeln (06.04.2011). Die Parzellengröße betrug 50 m^2 (5 m x 10 m), um Randeffekte zu verringern. Beerntet wurde später jeweils nur die mittlere Reihe in der Parzelle. Die Injektionsdüngung wurde mit einem speziellen Handinjektionsgerät nach dem Legen der Kartoffeln durchgeführt (21.04.2011). Je Parzelle wurde an 42 Pflanzen (drei Reihen á 14 Pflanzen) ein Depot angelegt, wobei für die Auswertung zehn Pflanzen in der mittleren Reihe berücksichtigt wurden (Tabelle 21).

Tabelle 21: Prüfglieder Praxisversuch P-Injektionsdüngung Kitzscher

PG	Applikation	Dünger	kg P/ha	Parzellengröße
1	ohne	-	0	
2	breitwürfig	TSP	20	50 m^2
3			40	
4			60	
5	Injektion	$Ca(H_2PO_4)_2$	20	42 Pflanzen
6			40	
7			60	

Am 14.06.2011 erfolgte im Versuch eine Pflanzenprobenahme. In jeder Parzelle wurden Blattproben (gerade voll entwickelte Blätter) entnommen und diese auf den Gehalt an Stickstoff, Phosphor, Kalium, Magnesium und Schwefel untersucht. Bodenproben wurden zu Beginn, während der Vegetationsperiode und zur Ernte genommen. Die erste Bodenprobe vor Anlage des Versuches wurde als Mischprobe in der Tiefe 0-20 cm über die Versuchsfläche genommen. Während des Versuches erfolgten die Bodenprobenahmen parzellenweise aus dem Damm.

Der Verlauf der Witterung im Versuchsjahr 2011 im Vergleich zum langjährigen Mittel ist in Abbildung 31 dargestellt.

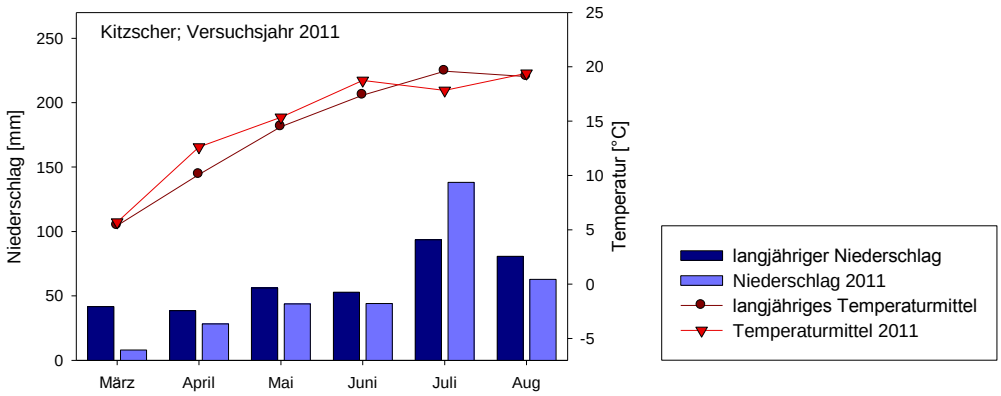

Abbildung 31: Temperaturverlauf und Niederschlagsverteilung Kitzscher im Versuchsjahr 2011 im Vergleich zum langjährigen Mittel
(Daten der Wetterstation Großpösna; langjähriges Mittel Daten der Messstation Leipzig-Möckern seit 1994)

Ergebnisse und Diskussion

Während der Zwischenernte im Juni 2011 konnte außer bei Phosphor kein signifikanter Einfluss der P-Düngung auf den Nährstoffgehalt festgestellt werden. Die Blätter enthielten in dem Prüfglied 60 kg P/ha TSP signifikant mehr Phosphor (Abbildung 32). Doch auch mit 0,32 % P in der Trockenmasse muss der Gehalt als niedrig beurteilt werden. BERGMANN (1993) gibt für Kartoffeln zu Blühbeginn einen anzustrebenden P-Gehalt von 0,30 bis 0,61 % in der Trockenmasse an.

Eine Düngung mit 60 kg P/ha TSP verursachte einen mindestens kurzfristigen Anstieg des pflanzenverfügbaren P-Gehaltes im Boden (Abbildung 33). Alle anderen Düngungsvarianten führten zu abnehmenden P_{CAL}-Gehalten, die zur Ernte der Gehaltsklasse A zuzuordnen waren. Zu berücksichtigen ist, dass sich die Beprobung einer Fläche mit vorheriger Injektionsdüngung als schwierig gestaltet, weil weder eine Probenahme neben dem Depot noch eine im Depot repräsentativ für die Fläche ist.

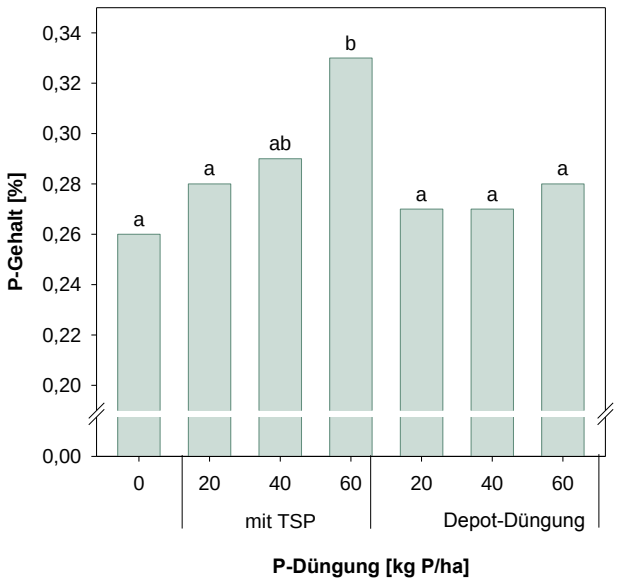

Abbildung 32: P-Gehalte [kg/ha] im Blatt in Abhängigkeit von der P-Düngung, Praxisversuch P-Injektionsdüngung zu Kartoffeln in Kitzscher (Juni 2011)

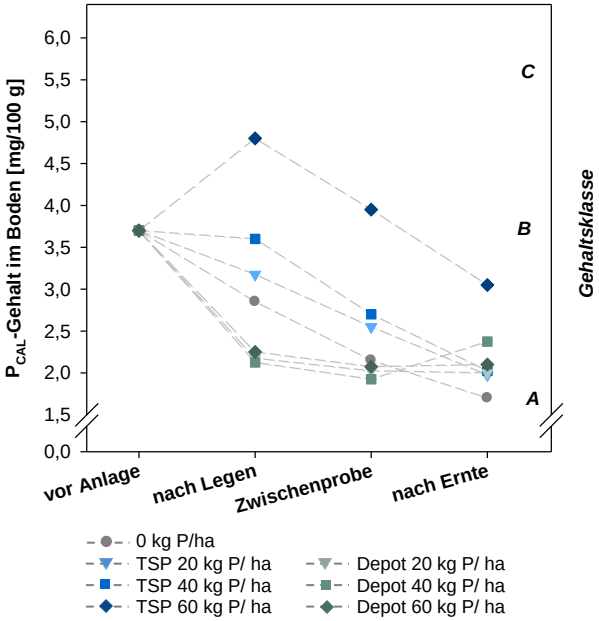

Abbildung 33: Änderung der P_{CAL}-Gehalte im Boden in Abhängigkeit der Düngung, Praxisversuch P-Injektionsdüngung zu Kartoffeln in Kitzscher (Einteilung der Gehaltsklassen nach DüV Sachsen)

Bekannt ist, dass eine gute Versorgung der Pflanzen mit Phosphor sich positiv auf die Gesamtknollenzahl, Pflanzknollenzahl und den Pflanzgutertrag sowie den Trockensubstanz- und Rohproteingehalt des Erntegutes auswirken kann (FISCHNICH & PÄTZOLD 1961; RÖHRICHT 1992).

Im Praxisversuch führte die P-Düngung zu Mehrerträgen zwischen 13 und 20 % (Tabelle 22, Abbildung 34). Die Zunahme der Düngermenge von 20 auf bis zu 60 kg P/ ha bewirkte bei der breitwürfigen TSP-Ausbringung nur noch einen relativ geringen Ertragszuwachs. Die Gesamterträge der P-Injektion lagen leicht über denen der TSP-Applikation, mit Ausnahme der Stufe 40 kg P/ ha. Auch hier führte die Ausbringung von 20 bzw. 60 kg P/ ha zu keinem deutlichen Ertragsanstieg. Eine mögliche Erklärung für die fehlende Düngewirkung zwischen den Aufwandmengen 20 bzw. 60 kg P/ ha bieten die guten Witterungsbedingungen des Frühjahres bzw. Frühsommers 2011 (Abbildung 31). Überdurchschnittlich hohe Temperaturen, verbunden mit einer ausreichenden Bodenfeuchte, begünstigten Mineralisierungsprozesse im Boden und damit eine bessere Pflanzenverfügbarkeit des Phosphors. Der geringere Ertrag bei der P-Injektion mit 40 kg P/ ha ist nur durch Standortunterschiede in der P-Versorgung bzw. durch Unzulänglichkeiten bei der Erntebeprobung zu begründen.

Im Gegensatz zur Zwischenbeprobung im Juni traten bei der Ernte in den Knollen keine Unterschiede im P-Gehalt auf.

Tabelle 22: Kartoffelertrag, P- und Stärkegehalt in Abhängigkeit von der P-Applikation, Praxisversuch P-Injektionsdüngung Kitzscher

PG	P-Düngung kg/ha	Applikation	Ertrag [dt/ha] Gesamt	35 - 50 u. 50 - 60 mm	> 60 mm	TM-Ertrag [dt/ha]	P-Gehalt [% in TS]	Stärkegehalt [% in TS]
1	0		418	338	67	64	0,18	75,8
2	20		473	355	103	70	0,16	77,4
3	40	TSP breitwürfig	486	395	73	72	0,16	79,7
4	60		494	368	113	76	0,18	76,3
5	20		496	377	105	77	0,17	78,4
6	40	P-Injektion	475	385	77	77	0,15	76,3
7	60		503	374	117	78	0,16	78,8

Die P-Düngung bewirkte eine Zunahme der Gesamtknollenzahl pro Pflanze (Tabelle 23). Zwischen den beiden Applikationsverfahren und auch den verschiedene Düngungsmengen traten dabei keine eindeutigen Unterschiede auf. Bei der Verteilung auf die verschiedenen Größenklassen ist keine Beeinflussung durch die durchgeführte P-Düngung zu erkennen (Abbildung 35).

Tabelle 23: Anzahl Knollen je Pflanze und Größensortierung in Abhängigkeit der P-Applikation, Praxisversuch P-Injektionsdüngung Kitzscher

PG	P-Düngung	Applikation	Anzahl Knollen je Pflanze				
	kg/ha		Gesamt	< 35 mm	35 - 50 mm	50 - 60 mm	> 60 mm
1	0		9,4	1,5	3,3	3,9	0,7
2	20		10,7	2,2	3,5	3,9	1,1
3	40	TSP breitwürfig	12,0	2,7	4,0	4,5	0,8
4	60		11,1	2,2	3,6	4,2	1,1
5	20		11,4	1,9	4,4	4,0	1,1
6	40	P-Injektion	11,3	1,9	4,5	4,1	0,9
7	60		10,8	1,5	3,9	4,2	1,2

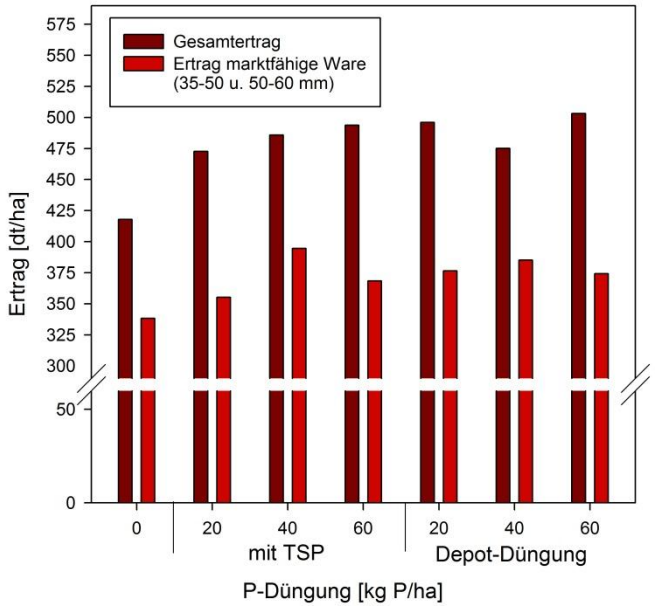

Abbildung 34: Kartoffelertrag in Abhängigkeit von der P-Applikation, Kitzscher

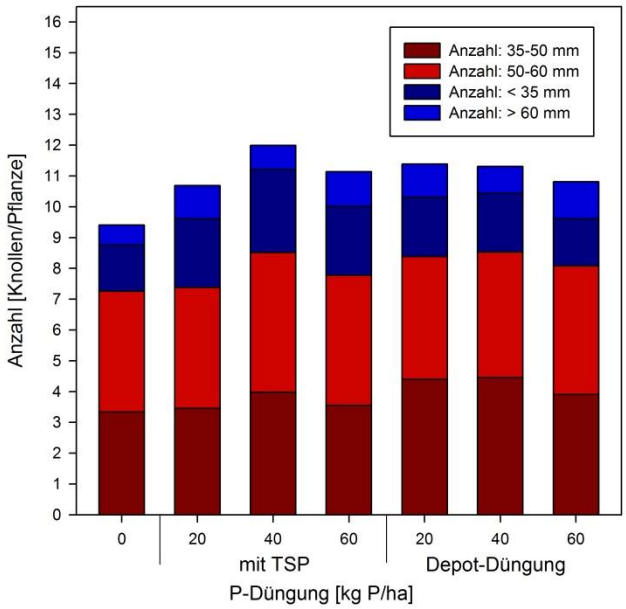

Abbildung 35: Anzahl Knollen je Pflanze und Größensortierung in Abhängigkeit von der P-Applikation, Kitzscher

2.3 P-Dünger aus Klärschlamm nach Hochtemperaturschmelzbehandlung (Mephrec®-Verfahren)

Die verfügbaren mineralischen Phosphorreserven sind begrenzt. Gleichzeitig nimmt mit wachsender Weltbevölkerung und mit steigenden Wohlstandsansprüchen der Phosphorbedarf weltweit zu. Zudem sind die wirtschaftlich abbaubaren Phosphorvorkommen durch immer höhere Schwermetallkonzentrationen belastet. Reststoffe wie Klärschlamm oder auch Tierkörpermehl verfügen zwar zum Teil über recht hohe P-Gehalte (Tabelle 24), doch ist ihr direkter landwirtschaftlicher Einsatz durch zum Teil hohe Schwermetallgehalte oder durch hygienische Bedenken eingegrenzt. Daher nimmt die Bedeutung von Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung aus kommunalen Abwässern, Klärschlämmen, Tiermehlen und sonstigen tierischen Abfallprodukten oder industriellen Abfällen stetig zu.

Tabelle 24: Phosphormengen verschiedener Abfälle und Reststoffe in Deutschland (LAGA 2012; PINNEKAMP 2011)

Stoffstrom	geschätzte P-Mengen [t/a]	derzeitige Verwertung
kommunale Abwässer (Zulauf)	54.000	nein
kommunaler Klärschlamm	50.000	teilweise
industrielle Abwässer (Zulauf)	15.000	nein
Wirtschaftsdünger	444.000	ja
Gärrückstände	125.000	teilweise
tierische Nebenprodukte	20.000	teilweise
Komposte	k. A.	ja

Eine Methode zur Rückgewinnung von Phosphor stellt das Mephrec®-Verfahren (Metallurgisches Phosphor Recycling) dar. Es ermöglicht die Verarbeitung verschiedener P-haltiger Abfallstoffe zu P-Düngern bei gleichzeitiger Nutzung des in den Abfallstoffen enthaltenen energetischen Potenzials. Beschrieben ist das Verfahren u. a. in SCHEIDIG et al. (2011), worauf die nachfolgende Beschreibung beruht. Zunächst wird der Klärschlamm durch ein spezielles Verfahren zu Formlingen (i. d. R. Briketts) gepresst, welche zu verschiedenen Anteilen Tiermehl und/oder phosphathaltige Aschen enthalten können. Im Mephrec®-Reaktor werden zuerst die organischen Bestandteile vergast. Beim Erreichen der Schmelztemperaturen der mineralischen Bestandteile bilden diese zusammen mit geschmolzenen Zuschlagstoffen und Koksasche eine Schlacke, welche schließlich im Wasserbad zu porösen Granalien erstarrt. Eventuell vorhandene organische Schadstoffe der Ausgangsmaterialien werden durch die hohen Temperaturen im Mephrec®-Reaktor zerstört. Einige Schwermetalle (z. B. Zn, Cd, Hg) verdampfen bei den vorherrschenden Temperaturen und werden über die Gasreinigung abgeführt. Andere Schwermetalle wie Fe, Cu, Cr, Ni sammeln sich überwiegend aufgrund ihrer höheren Dichte unterhalb der flüssigen Schlacke und werden getrennt abgeschieden. Je nach eingesetzten Ausgangstoffen werden unterschiedlich hohe P-Gehalte in der gebildeten Schlacke erreicht. Der Anteil des citronensäurelöslichen Phosphors ist dabei sehr hoch (> 90 % am Gesamt-P), sodass von einer hohen Pflanzenverfügbarkeit ausgegangen werden kann.

Das Verfahren ist gekennzeichnet durch hohe

- Wirtschaftlichkeit durch eine gleichzeitige stoffliche und energetische Verwertung von P-haltigen Reststoffen,
- verfahrenstechnische Flexibilität durch möglichen Einsatz unterschiedlicher P-haltiger Abfälle,
- Pflanzenverfügbarkeit des in der Schlacke enthaltenen Phosphors,
- Umweltverträglichkeit, weil die gebildete Schlacke frei von organischen Schadstoffen ist und niedrige Schwermetallgehalte aufweist (SCHEIDIG 2009).

Material und Methoden

Die P-Düngewirkung von „Phosphat-Dünger“ aus der Hochtemperatur-Schmelzbehandlung von Klärschlamm nach dem Mephrec®-Verfahren (Schlacken) auf das Wachstum und den Ertrag von Sommergerste wurde anhand eines Gefäßversuches untersucht.

Je Gefäß wurden 5 kg Boden und 1,5 kg Quarzsand gemischt. Bei dem verwendeten Boden handelt es sich um einen P-armen Gneis-Verwitterungsboden aus Oberschöna mit einem Ausgangsgehalt von 1,7 mg P_{CAL}/100 g Boden (GK A). Der pH-Wert liegt bei 5,8 und der K_{CAL}-Gehalt bei 7,7 mg/100 g Boden. Getestet wurden vier Schlacken, die sich in der Zusammensetzung des verwendeten Ausgangsmaterials (Anteil an Klärschlamm, Asche sowie Zement) für das Mephrec®-Verfahren unterscheiden. Die Schlacken lagen in drei unterschiedlichen Körnungen vor: gemahlen (a) 0,5 bis 1,6 mm (b) und 1,6 bis 2,5 mm (c). Leider waren nicht zu allen vier Schlacken alle drei Körnungsstufen vorhanden (Tabelle 25), was für die statistische Auswertung einen Nachteil darstellt und die Auswertungsmöglichkeiten einschränkt.

Bereitgestellt wurden die Schlacken von der ingitec (Ingenieurbüro für Gießereitechnik) GmbH aus Leipzig.

Der Versuch wurde mit vier Wiederholungen und drei Düngungsstufen (0,4, 0,8 und 1,6 g P/Gefäß) angelegt. Bezugsgröße für die Düngung war der Gesamtphosphorgehalt in den Schlacken. Der Dünger bzw. die Schlacke wurde gleichmäßig in den Boden eingemischt. Zu Vergleichszwecken wurde ein Prüfglied (PG) ohne P-Düngung und je Düngungsstufe ein Prüfglied mit einer mineralischen P-Düngung (Superphosphat $Ca(H_2PO_4)_2$) angelegt. Somit ergeben sich insgesamt 28 Prüfglieder und 112 Gefäße.

Der Versuch wurde 2012 im Gewächshaus Nossen durchgeführt. Nach der Ernte 2012 wurden prüfgliedweise Bodenproben entnommen und auf ihren Nährstoffgehalt untersucht. Für das Folgejahr ist ein Nachbau mit Sommergerste geplant, um die Nachwirkung der P-Düngung im zweiten Anbaujahr zu prüfen.

Die N- und K-Düngung erfolgte einheitlich mit 1 g N/Gefäß (NH_4NO_3) bzw. 1,5 g K/Gefäß (K_2SO_4) zum Ansatz und mit 0,5 g N/Gefäß (NH_4NO_3) zu EC 30/31. Pflanzenschutzmaßnahmen wurden nach Bedarf für alle Gefäße gleich durchgeführt. Die Bewässerung erfolgte optimal mit deionisiertem Wasser.

Die eingesetzten Schlacken wurden vor ihrer Verwendung auf ihren Nähr- und Schwermetallgehalt analysiert (Tabelle 25, Tabelle 26). Die meisten der Schlacken weisen einen pH-Wert knapp über 7 auf. Schlacke 1a und 3a liegen mit einem Wert von 9,4 bzw. 8,1 deutlich höher. Über die niedrigsten Gesamt-Phosphorgehalte (P_t = 1,4 bzw. 1,2 %) verfügen die Schlacken, welche zu 100 % aus Klärschlamm ohne einen Ascheanteil stammen (PG 4a und 4b). Bei den restlichen Schlacken liegen die P_t-Gehalte zwischen 33 und 44 g P/ kg (Abbildung 36). Ungewöhnlich erscheint der höhere Gesamt-P-Gehalt bei der gemahlenen Schlacke 1a im Vergleich zu den beiden anderen Körnungsgrößen dieser Schlacke (1b, 1c). Eine mögliche Ursache könnte die Heterogenität der analysierten Schlacke oder ein nicht vollständiger Probenaufschluss vor Analyse sein. Zur Bestimmung der Phosphorlöslichkeit als Maß für die Pflanzenverfügbarkeit stehen verschiedene Analysemethoden zur Verfügung. Die Extraktion mit Wasser zählt zu den schwächeren Extraktionsverfahren und erfasst Phosphor (P_w), der als Monocalciumphosphat oder Ammoniumphosphat vorliegt und damit direkt pflanzenverfügbar ist. Die Gehalte an P_w waren bei den untersuchten Schlacken sehr gering und lagen bei den meisten unter der Erfassungsgrenze. Die Bestimmung des neutral-ammoniumcitratlöslichem und wasserlöslichen Phosphors (P_{NAC+W}) dagegen umfasst neben den leichtlöslichen P-Formen (Monocalciumphosphat und Dicalciumphosphat) die pflanzenverfügbaren Fe-Al-Phosphate sowie teilweise auch schwer verfügbare P-Formen. Die P_{NAC+W}-Gehalte schwankten in den untersuchten Schlacken zwischen 5 und 23 g/kg. Auch hier ist die Zunahme der Gehalte bei der Schlacke 1 von der gemahlen Schlacke hin zur größeren Körnung 1,6 bis 2,5 mm nicht zu erklären. Normalerweise würde man eher davon ausgehen, dass mit zunehmender Oberfläche, d. h. verringerter Körnungsgröße, die Pflanzenverfügbarkeit und damit die Gehalte zunehmen.

Eine weitere Methode zur Bestimmung der Phosphatlöslichkeit, die vor allem bei Boden angewandt wird, ist die Extraktion mit Calcium-Acetat-Lactat (P_{CAL}). Relevante Gehalte an P_{CAL} lagen nur in den gemahlenen Schlacken (1a, 2a, 3a, 4a) vor und zwar in einem Bereich zwischen 3 und 8 g/ kg.

Hinsichtlich der Schwermetallgehalte liegen alle untersuchten Schlacken weit unter den Bereichen der Kennzeichnungspflicht oder den Grenzwerten der Düngemittelverordnung.

Tabelle 25: Inhaltstoffe und Zusammensetzung der verwendeten Schlacken im Gefäßversuch alternativer P-Dünger (Mephrec®-Verfahren)

Nr	Körnung [mm]	Zusammensetzung [%]			pH	CaO	K_t	K_{CAL}	Schwermetallgehalt [%]				
		Klärschlamm	Asche[1)]	Zement [2)]			[%]		As	Pb	Cd	Cr	Ni
1a	gemahlen	60	40	15	9,35	24,7	0,74	0,11	1,98	<0,01	0,04	51,3	3,51
1b	0,5 … 1,6	60	40	15	7,23	23,1	0,43	0,24	<0,01	<0,01	0,1	44,3	2,54
1c	1,6 … 2,5	60	40	15	7,05	24,3	0,42	0,20	<0,01	<0,01	0,07	41,2	2,62
2a	gemahlen	60	40	15	7,01	24,7	0,42	0,09	1,96	<0,01	0,16	51,8	30,1
2b	0,5 … 1,6	60	40	15	7,06	23,7	0,42	0,23	<0,01	<0,01	0,06	45,5	2,41
3a	gemahlen	40	60	20	8,12	32,2	0,46	0,08	<0,01	<0,01	0,09	63,8	20,8
4a	gemahlen	100		15	7,1	29,9	0,45	0,11	<0,01	<0,01	0,06	22,9	1,56
4b	0,5 … 1,6 m	100		15	7,03	29.8	0,42	0,27	<0,01	<0,01	0,07	22,8	0,85

[1)] aus Monoverbrennungsanlagen [2)]fungiert als Bindemittel

Tabelle 26: Phosphorgehalte der verwendeten Schlacken im Gefäßversuch alternativer P-Dünger (Mephrec®-Verfahren)

Nr	Körnung [mm]	Zusammensetzung [%]			P_t	P_{CAL}	P_{NAC+W}	P_w	Anteil P_{NAC+W} an P_t
		Klärschlamm	Asche[1)]	Zement [2)]	[%]	[%]	[%]	[%]	
1a	gemahlen	60	40	15	4,40	0,80	0,56	< 0,004	13
1b	0,5 … 1,6	60	40	15	3,44	0,01	0,85	< 0,004	25
1c	1,6 … 2,5	60	40	15	3,28	0,01	1,23	< 0,004	37
2a	gemahlen	60	40	15	3,81	0,65	0,52	< 0,004	14
2b	0,5 … 1,6	60	40	15	3,39	< 0,01	0,67	0,01	20
3a	gemahlen	40	60	20	3,95	0,29	2,32	< 0,004	59
4a	gemahlen	100		15	1,36	0,32	0,60	0,18	44
4b	0,5 … 1,6 m	100		15	1,24	0,03	0,60	< 0,004	48

[1)]aus Monoverbrennungsanlagen [2)]fungiert als Bindemittel

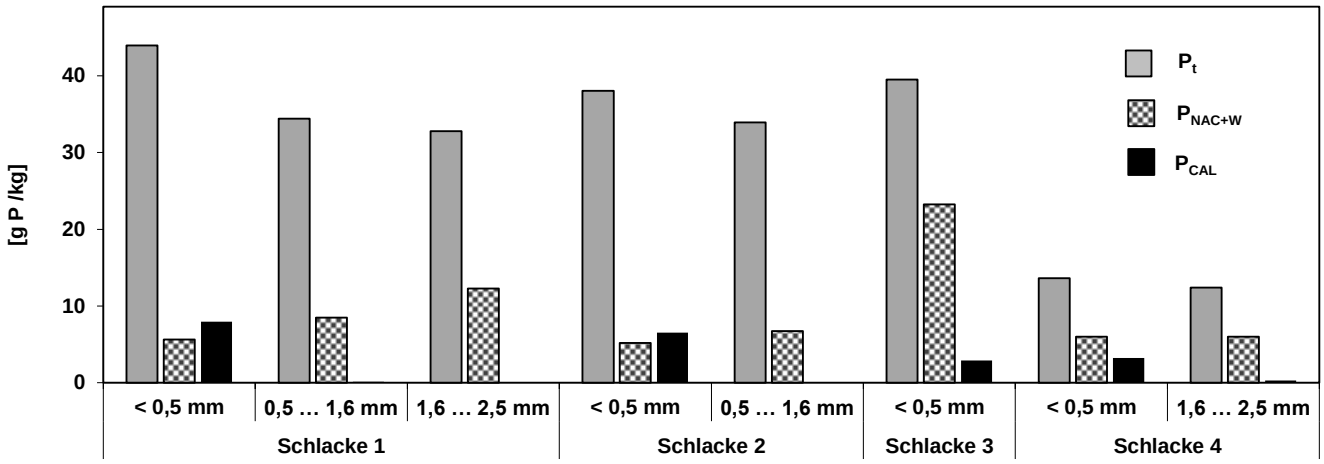

Abbildung 36: P-Gehalte der verwendeten Schlacken im Gefäßversuch alternativer P-Dünger (Mephrec®-Verfahren)

Ergebnisse und Diskussion

Die Verwendung der Schlacken als P-Dünger führte im Vergleich zu der ungedüngten Variante zu Mehrerträgen, die jedoch deutlich unter denen der Vergleichsvariante mit dem Mineraldünger lagen (Tabelle 27, Abbildung 37). Mit Werten zwischen 15 und 32 % fielen die Mehrerträge der Schlacken mit gröberer Körnung (0,5 … 1,6 mm und 1,6 … 2,5 mm) wesentlich niedriger aus als die der gemahlenen Schlacken (43 bis 143 %). Eine zunehmende Einsatzmenge der ungemahlenen Schlacken führte i. d. R. zu keinem weiteren Ertragsanstieg im Gegensatz zu den gemahlenen Schlacken, wo eine klare Abstufung des Kornertrages in Abhängigkeit von der Düngermenge auftrat.

Um den Ertragszuwachs im Vergleich zu dem Ertrag des mineralischen Kontrolldüngers zu ermitteln, wurde die relative agronomische Effizienz (RAE) nach der folgenden Formel berechnet:

$$RAE\ (\%) = \frac{Ertragszuwachs_{Testd\,\ddot{u}nger} \times 100}{Ertragszuwachs_{Minerald\ \ddot{u}nger}}$$

Weil keine signifikanten Wechselbeziehungen zwischen der Art der verwendeten Schlacke und der Düngermenge auftraten, ist es möglich, die RAE gemittelt über die Düngungsstufen darzustellen und auf statistische Unterschiede zu prüfen. Das Ergebnis zeigt, dass sich die gemahlenen Schlacken im Vergleich zu den anderen Schlacken durch eine signifikant höhere RAE auszeichnen (Abbildung 38). Mit 66 % RAE kommt die Schlacke 3a der Wirkung des mineralischen P-Düngers am nächsten.

Zu einem nennenswerten Anstieg im P-Entzug führten neben dem mineralischen P-Dünger nur die Varianten mit den gemahlenen Schlacken (Tabelle 28, Abbildung 40). Die Varianten der gemahlenen Schlacken 1a, 2a, 3a und 4a waren dabei durch signifikant höhere P-Entzüge gekennzeichnet als die ungedüngte Variante. Die höchsten P-Entzüge wurden durch die mineralische Düngung erreicht, wobei sie sich signifikant von allen anderen PG unterschieden. Die P-Entzüge der PG mit den ungemahlenen Schlacken lagen nur geringfügig über denen der ungedüngten Kontrollvariante.

Auch bei der Höhe des N-Entzuges konnten abhängig von der eingesetzten Schlacke und der Düngermenge signifikante Unterschiede festgestellt werden. Weil auch hier zwischen beiden Faktoren keine Wechselbeziehungen auftraten, ist es möglich, die N-Entzüge gemittelt über die verschiedenen Düngerstufen darzustellen und statistisch zu bewerten. Wiederum führten die gemahlenen Schlacken zu den besten Ergebnissen, die jedoch nicht an die des mineralischen Düngers heranreichten. Innerhalb der untersuchten Schlacken erreichte Schlacke 3a den signifikant höchsten N-Entzug (Abbildung 39).

Tabelle 27: Ertragsparameter Gefäßversuch alternativer P-Dünger (Mephrec®-Verfahren)

PG	P-Düngung	P-Dünger		Kornertrag	Rel. agronom. Effizienz	Rohproteingehalt	ÄTH	TKM
	[g P/Gefäß]			[TM g/Gefäß]	[%]	[%]	[n]	[g]
1	0			18,8 a		16,7	25,5 a	39,4 abc
2	0,4			41,5 jk		14,3	55,3 fg	43,5 efghi
3	0,8	$Ca(H_2PO_4)^2$		49,0 lm		12,8	62,8 gh	44,1 fghi
4	1,6			54,5 m		12,4	68,5 h	45,2 i
5	0,4			27,1 abcd	36,5 cdef	15,7	37,0 abcde	41,8 cdefgh
6	0,8	Schlacke 1 a	gemahlen	32,5 abc	45,2 fgh	15,0	44,5 cdef	42,3 cdefghi
7	1,6			34,5 abc	43,8 efgh	14,5	44,5 cdef	44,3 ghi
8	0,4			23,7 abc	21,2 abcde	16,1	31,0 ab	41,4 bcdefgh
9	0,8	Schlacke 1 b	0,5 bis 1,6 mm	21,9 abc	10,3 a	16,1	31,0 ab	39,6 abc
10	1,6			23,2 ab	12,2 a	15,5	33,5 abcd	41,0 abcde
11	0,4			21,7 bcdefg	12,7 ab	15,9	33,0 abc	38,6 ab
12	0,8	Schlacke 1 c	1,6 bis 2,5 mm	22,6 fghi	12,5 a	16,1	31,8 abc	38,2 a
13	1,6			21,1 hi	6,3 a	15,8	29,3 ab	42,2 cdefghi
14	0,4			27,5 abc	38,0 defg	15,7	41,0 bcde	41,0 abcde
15	0,8	Schlacke 2 a	gemahlen	29,8 abcd	36,3 cdef	15,2	41,8 bcde	40,7 abcde
16	1,6			33,3 abcde	40,6 efgh	15,0	49,3 ef	43,4 efghi
17	0,4			22,3 cdefg	15,3 abcd	16,3	29,5 ab	41,8 cdefgh
18	0,8	Schlacke 2 b	0,5 bis 1,6 mm	23,5 defgh	15,5 abcd	15,8	32,0 abc	41,7 cdefgh
19	1,6			24,8 ghi	16,7 abcd	15,6	34,3 abcd	41,3 bcdefg
20	0,4			32,4 fghi	59,6 ghi	14,7	46,0 def	41,8 cdefgh
21	0,8	Schlacke 3 a	gemahlen	37,7 ij	62,4 hi	14,6	48,3 ef	44,2 fghi
22	1,6			45,7 kl	75,3 i	13,3	56,3 gh	44,5 hi
23	0,4			26,9 abc	35,7 bcdef	15,7	36,8 abcde	41,4 bcdefgh
24	0,8	Schlacke 4 a	gemahlen	30,3 abc	37,9 cdefg	14,9	41,8 bcde	41,2 abcdef
25	1,6			32,0 abc	36,8 cdefg	14,7	41,5 bcde	43,2 defghi
26	0,4			22,2 bcdef	14,8 abc	15,4	31,5 ab	40,1 abc
27	0,8	Schlacke 4 b	< 2,5 mm	23,5 efgh	15,4 abcd	15,6	35,0 abcd	40,9 abcde
28	1,6			22,4 fghi	9,8 a	16,2	32,8 abc	40,2 abcd
		Grenzdifferenz $_{Tukey, 5\%}$		*6,3*	*23,1*	*n. b.*	*12,8*	*3,1*

Tabelle 28: P- und N-Entzüge Gefäßversuch alternativer P-Dünger (Mephrec®-Verfahren)

PG	g P/Gefäß	P-Dünger		P-Entzug [g/Gefäß]		N-Entzug [g/Gefäß]	
				Korn	Gesamtpflanze	Korn	Gesamtpflanze
1	0			0,06 ab	0,07 a	0,50 a	0,75 a
2	0,4			0,12 fg	0,13 gh	0,95 hij	1,23 fghi
3	0,8	$Ca(H_2PO_4)^2$		0,16 hi	0,17 i	1,01 ij	1,30 hi
4	1,6			0,21 j	0,23 j	1,08 j	1,37 i
5	0,4			0,08 abcd	0,09 abcd	0,68 bcdef	0,94 abcd
6	0,8	Schlacke 1 a	gemahlen	0,10 def	0,11 ef	0,78 fg	1,05 cdef
7	1,6			0,11 ef	0,11 efg	0,80 fg	1,08 defg
8	0,4			0,07 ab	0,08 ab	0,61 abcde	0,93 abcd
9	0,8	Schlacke 1 b	0,5 bis 1,6 mm	0,07 abc	0,08 ab	0,57 abc	0,87 abc
10	1,6			0,07 ab	0,08 ab	0,58 abcd	0,89 abcd
11	0,4			0,06 a	0,07 a	0,55 abc	0,87 abc
12	0,8	Schlacke 1 c	1,6 bis 2,5 mm	0,07 ab	0,08 ab	0,58 abcd	0,93 abcd
13	1,6			0,06 a	0,07 a	0,53 ab	0,81 ab
14	0,4			0,09 cde	0,10 cdef	0,69 cdef	0,99 bcde
15	0,8	Schlacke 2 a	gemahlen	0,10 def	0,11 def	0,72 def	1,05 cdef
16	1,6			0,11 f	0,12 fg	0,80 fgh	1,09 defg
17	0,4			0,07 a	0,07 a	0,58 abcd	0,90 abcd
18	0,8	Schlacke 2 b	0,5 bis 1,6 mm	0,07 ab	0,08 ab	0,59 abcd	0,91 abcd
19	1,6			0,07 abc	0,08 abc	0,62 abcde	0,95 abcd
20	0,4			0,10 def	0,11 ef	0,76 efg	1,06 cdefg
21	0,8	Schlacke 3 a	gemahlen	0,14 gh	0,15 h	0,88 ghi	1,17 efgh
22	1,6			0,16 i	0,18 i	0,97 ij	1,25 ghi
23	0,4			0,09 bcde	0,10 bcde	0,68 bcdef	0,97 bcde
24	0,8	Schlacke 4 a	gemahlen	0,11 ef	0,12 efg	0,72 def	1,01 bcde
25	1,6			0,11 ef	0,12 fg	0,75 efg	1,03 cde
26	0,4			0,07 ab	0,08 ab	0,55 abc	0,87 abc
27	0,8	Schlacke 4 b	< 2,5 mm	0,07 abc	0,08 ab	0,59 abcd	0,91 abcd
28	1,6			0,07 a	0,08 ab	0,58 abcd	0,89 abcd
		Grenzdifferenz $_{Tukey, 5\%}$		*0,02*	*0,02*	*0,15*	*0,20*

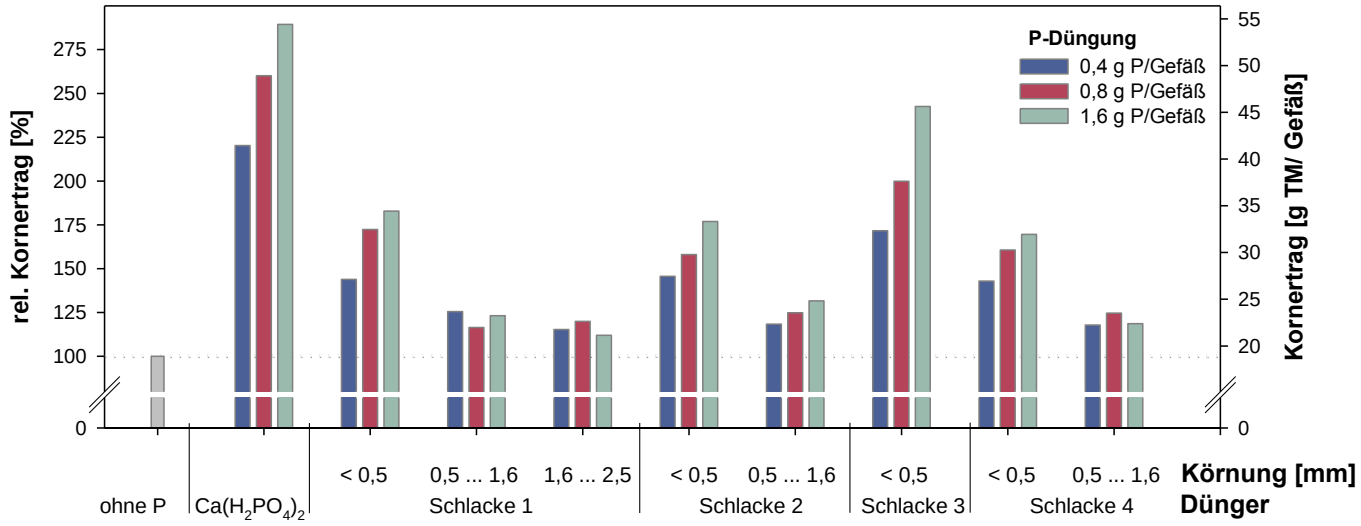

Abbildung 37: Gefäßversuch alternative P-Dünger aus dem Mephrec®-Verfahren – relativer und absoluter Kornertrag

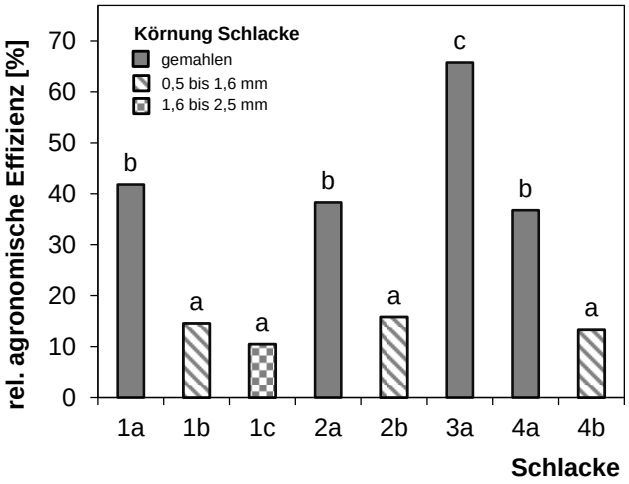

Abbildung 38: Gefäßversuch alternative P-Dünger aus dem Mephrec®-Verfahren - Relative agronomische Effizienz der eingesetzten Schlacken (GD_{Tukey}, 5 % = 11,1)

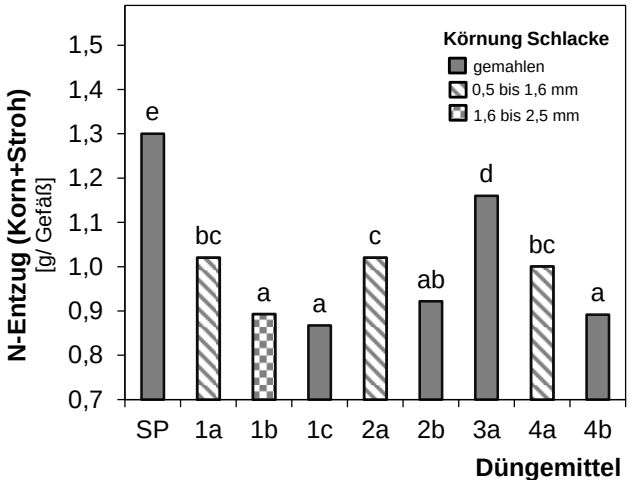

Abbildung 39: Gefäßversuch alternative P-Dünger aus dem Mephrec®-Verfahren – N-Entzug (Korn+Stroh) in Abhängigkeit vom Düngemittel (GD_{Tukey}, 5 % = 0,46)

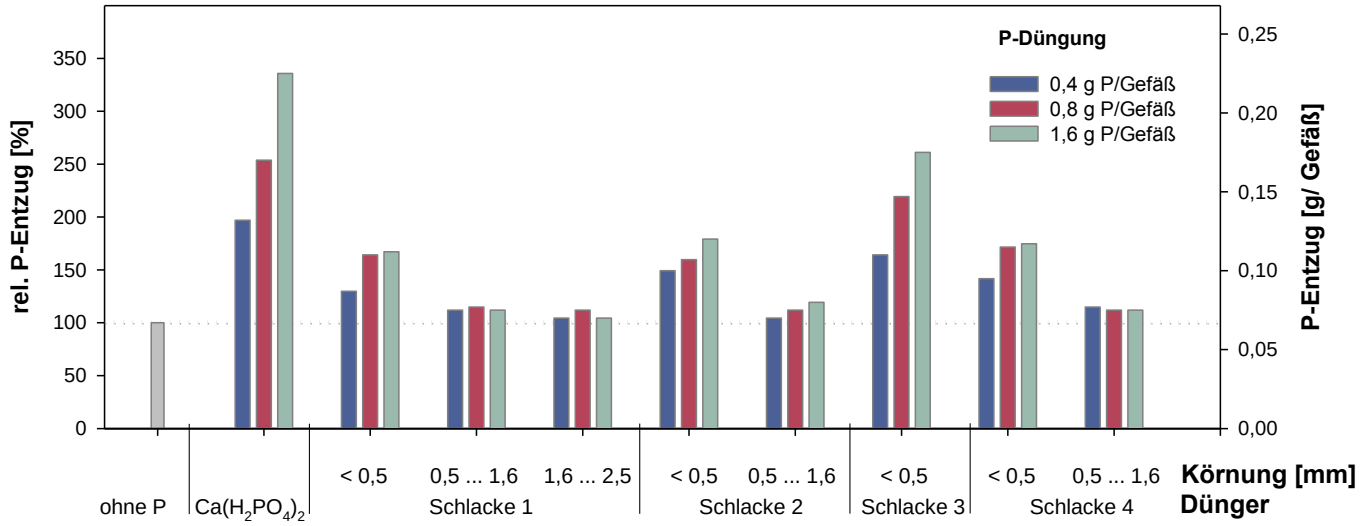

Abbildung 40: Gefäßversuch alternative P-Dünger aus dem Mephrec®-Verfahren – relativer und absoluter P-Entzug (Korn+Stroh)

Die PG, bei denen die gemahlenen Schlacken als P-Dünger fungierten, wiesen nach der Ernte der Sommergerste zum Teil beachtliche P_{CAL}-Gehalte im Boden auf (Abbildung 41). Die Gehalte der Schlacke 1a und 2a lagen etwa auf dem Niveau des mineralischen Vergleichsdüngers. Hingegen lagen die Gehalte der Schlacken 3a und 4b deutlich darüber. In der höchsten Düngestufe 1,6 g P_t/Gefäß wurden bis zu dreimal so hohe P_{CAL}-Gehalte im Vergleich zur mineralischen Düngung erreicht.

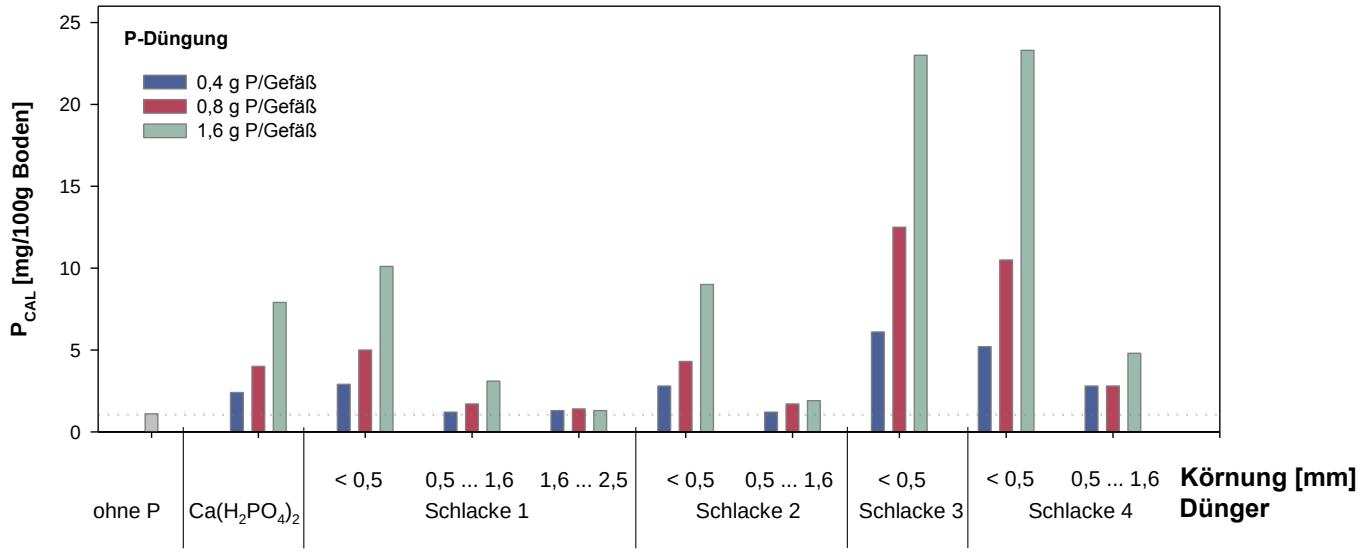

Abbildung 41: Gefäßversuch alternative P-Dünger aus dem Mephrec®-Verfahren – P_{CAL}-Gehalte im Boden nach Ernte der Sommergerste in Abhängigkeit von der P-Düngung

Interessant dürfte die Betrachtung der Nachwirkung der erfolgten P-Düngung auf den Nachbau mit Sommergerste sein, vor allem im Vergleich zu dem mineralischen P-Dünger. Dabei ist die Frage interessant, inwieweit Mineralisierungsprozesse bei den gemahlenen Schlacken zu einer weiteren Freisetzung an pflanzenverfügbaren Phosphor im Boden führen. Für weitergehende Erkenntnisse und Bewertungen sollten weitere Versuche in Form von Feld- und Gefäßversuchen durchgeführt werden.

3 Zusammenfassung

Die Phosphorvorkommen sind endlich. Der Abbau von Phosphorvorkommen ist energieaufwändig und mit zum Teil hohen Umweltbelastungen verbunden. Gleichzeitig sind die abgebauten Phosphate zunehmend durch Schwermetalle belastet, was insbesondere bei einer landwirtschaftlichen Nutzung problematisch ist. Zudem steigt die weltweite Nachfrage nach Phosphor durch das Wachstum der Bevölkerung und durch zunehmende Wohlstandsansprüche an. So ist auch zukünftig mit weiteren Preissteigerungen und wohl auch mit Lieferengpässen zu rechnen. Deutschland verfügt über keine eigenen Phosphorvorkommen und ist daher von Importen abhängig. Preisanstiege in den letzten Jahren führten bereits dazu, dass Landwirtschaftsbetriebe zunehmend bei der Phosphordüngung sparen. Besonders ackerbaulich stark geprägte Regionen weisen bereits abnehmende pflanzenverfügbare Bodengehalte auf, welche schließlich zu Mangelernährung mit einhergehenden Ertragsverlusten führen können. Im Gegensatz zum Stickstoffmangel wird latenter Mangel bei Phosphor oft nicht erkannt und damit werden die negativen Auswirkungen auf Ertrag und Qualität unterschätzt.

Aber nicht nur aus Gründen der Kostenersparnis sollte die P-Düngung möglichst effizient erfolgen, sondern auch angesichts der Nährstoffbelastung der Gewässer. Infolge von Erosion, Oberflächenabfluss und Zwischenabfluss (preferential flow) werden z. T. erhebliche Mengen an Phosphor aus landwirtschaftlich genutzten Flächen in Gewässer eingetragen. Neben Erosionsschutzmaßnahmen ist vor allem die Begrenzung der P-Anreicherung von Böden eine wirksame Maßnahme, um den P-Eintrag in Gewässer zu verringern. Eine wesentliche Grundlage für die Erzielung optimaler Erträge ohne eine unnötige Anreicherung der Böden mit P ist die bedarfsgerechte P-Düngung. Die Höhe der Düngung sollte sich dabei an der aktuellen Bodenversorgung, den angebauten Fruchtarten und den zu erwartenden Erträgen orientieren. Ziel einer guten fachlichen Düngepraxis ist das Erreichen und das Erhalten einer optimalen P-Versorgung der Böden (Gehaltsklasse C). Bei hohen und sehr hohen Bodengehalten (Gehaltsklasse D und E) sollten die Bodenvorräte abgebaut werden. Auf niedrig versorgte Böden (Gehaltsklasse A und B) ist die P-Düngewirkung am größten, daher sollte hier über dem Entzug gedüngt werden. Dabei sind anspruchsvolle Fruchtarten wie Mais, Kartoffeln oder Raps innerhalb der Fruchtfolge zu beachten. Zu ihnen sollte bevorzugt gedüngt werden.

Neben der Bemessung der optimalen Düngermenge ist darauf zu achten, dass der ausgebrachte Dünger durch die Pflanzen bestmöglich aufgenommen und verwertet werden kann. Die P-Aufnahme durch die Pflanzen wird beeinflusst durch die räumliche und die chemische Verfügbarkeit des Phosphors im Boden. Weil der Gehalt an pflanzenaufnehmbarem P in der Bodenlösung sehr gering ist, muss ständig P aus der labilen Phase nachgeliefert werden. Durch die Einstellung des optimalen Boden-pH-Wertes durch Kalkung kann die chemische Verfügbarkeit verbessert werden. Auch die Zufuhr von P in organischer Form über Wirtschaftsdünger und die Beachtung einer guten Humusversorgung des Bodens wirken sich positiv aus (Humateffekt). Für die räumliche Verfügbarkeit sind das P-Aneignungsvermögen der Pflanze und die vorherrschenden Bodeneigenschaften (Bodenstruktur, -dichte, Wassergehalt, Temperatur) wichtige Einflussfaktoren. Pflanzenarten und -sorten unterscheiden sich hinsichtlich ihrer P-Aufnahme bzw. Verwertungseffizienz, hinsichtlich ihres Wurzelwachstums, der Wurzeloberfläche (Wurzelmasse, Mykorriza) und auch der Wurzeldichte sowie durch ihre Fähigkeit, mit Ausscheidungen von Wurzelexsudaten zur Mobilisierung von P im Boden beizutragen.

Eine Möglichkeit, den mineralisch gedüngten Phosphor effizienter auszunutzen, bietet die platzierte, konzentrierte Ausbringung des P-Düngers in den Boden. Im Unterschied zum Nitrat wird Phosphat nicht mit dem Massenfluss zur Wurzel transportiert, sondern hauptsächlich über Diffusionsprozesse. Dabei ist die Geschwindigkeit und Reichweite der Diffusion gering und wird durch hohe Konzentrationen an zweiwertigen Kationen infolge der Bildung wasserunlöslicher Verbindungen noch zusätzlich verringert. Den Dünger in konzentrierter Form im wurzelnahen Bereich auszubringen, ist als Unterfußdüngung von Diammonphosphat (DAP) zu Mais bereits gängige Praxis. In Deutschland findet die Unterfußdüngung außer beim Mais kaum Anwendung bei anderen Kulturarten.

Anhand eines Gefäßversuches und auf Grundlage von Feldversuchen wurde die Wirkung der Unterfußdüngung und der Injektionsdüngung auf den Ertrag von verschiedenen Fruchtarten untersucht. Bisher liegen zweijährige Ergebnisse aus dieser Versuchsreihe vor. Sie belegen, dass die P-Platzierung im Wurzelraum der Pflanzen in Form der Unterfußdüngung bzw. durch Injektion eine geeignetes Mittel ist, die Effizienz der P-Verwertung zu erhöhen. Auch im Hinblick auf den Gewässerschutz sind von den Verfahren Vorteile zu erwarten, weil nur in einem relativ geringen Bodenbereich Dünger ausgebracht wird und die Ab-

lage zudem unter die Bodenoberfläche erfolgt. Auftretende Erosionsereignisse dürften somit mit einem geringeren P-Austrag verbunden sein.

Die Wirkung der Verfahren ist dabei abhängig zum einem von einem „besonderen“ P-Bedarf der angebauten Kultur und zum anderen von den Standort- und Witterungsbedingungen. Ein „besonderer“ P-Bedarf ergibt sich aus einem hohen P-Entzug (z.B. bei Winterraps), einem schlechten P-Aneignungsvermögen durch ein langsames Wurzelwachstum (z. B. bei Mais) oder einer relativ kurzen Vegetationszeit (z. B. bei Sommergetreide). Treten dann auch noch schlechte äußere Rahmenbedingungen hinzu, ist eine deutliche Vorteilswirkung bei ausreichend verabreichter Düngermenge zu erwarten. Unterfußdüngung und P-Injektion wirken dabei besonders positiv auf Böden mit einem niedrigen Versorgungszustand, auf Standorten mit hohem P-Fixierungsvermögen (Verwitterungsböden aus Gneis, Diabas, Granit, Keuper, Muschelkalk) sowie unter ungünstigen Witterungsbedingungen (Vorteil bei Trockenheit bzw. nasskalter Witterung). Die Wirkung der Applikationsverfahren beruht dabei vor allem auf einer verbesserten räumlichen Erschließbarkeit des Düngers durch die Ablage im Wurzelraum und auf der verminderten Festlegung des leichtlöslichen P-Düngers im Boden durch die hohe lokale Absättigung.

Neben der möglichst effizienten Ausnutzung des eingesetzten mineralischen Düngers ist auch die effektivere Nutzung von Phosphor aus Siedlungsabfällen, Wirtschaftsdüngern und sonstigen P-haltigen Reststoffen von Gewerbe und Industrie eine Form des nachhaltigen Umgangs mit der begrenzten Ressource Phosphor. Neben dem direkten Einsatz von Fleischknochenmehl, Klärschlamm und Kompost als Düngungsalternativen in der Landwirtschaft besteht auch die Möglichkeit, durch technische Verfahren den Phosphor aus den genannten Quellen zurückzugewinnen und als sekundäre P-Ressource zu nutzen. Eine Methode zur Rückgewinnung von Phosphor stellt das Mephrec®-Verfahren (Metallurgisches Phosphor Recycling) dar. Es ermöglicht die Verarbeitung verschiedener P-haltiger Abfallstoffe zu P-Düngern bei gleichzeitiger Ausnutzung der dabei frei werdenden Energie. In einem einjährigen Gefäßversuch wurde die Wirksamkeit der dabei entstehenden Schlacken als P-Düngemittel untersucht. Der Versuch belegt, dass sich die Schlacken grundsätzlich als P-Dünger eignen. Es gibt allerdings Unterschiede hinsichtlich der Zusammensetzung der Ausgangsstoffe und der Granulierung. Grundsätzlich sollten die Schlacken gemahlen als P-Dünger eingesetzt werden. Granulierte Varianten erwiesen sich als wenig wirksam. Von untergeordneter Bedeutung für die Wirkung ist der Gesamtphosphatgehalt, ausschlaggebend ist der Anteil an pflanzenverfügbarem Phosphat. Nach der Ernte wurden teilweise beachtliche P_{CAL}-Gehalte im Boden gemessen. Wichtig wäre daher eine mehrjährige Prüfung, um belastbare Ergebnisse zu erhalten.

Quellen

ALBERT, E. (2011): Aspekte einer effizienten Grunddüngung. In: Der Pflanzenarzt, Jg. 64, Heft 1-2, S. 28-30 sowie Heft 3, S. 18-19, Wien.

ALBERT, E. (2012): persönliche Mitteilung.

ALBERT, E. et al. (2007): Umsetzung der Düngeverordnung. Hinweise und Richtwerte für die Praxis. Hrsg. Freistaat Sachsen, Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft.

ALBERT, E. & SUNTHEIM, L. (2004): Reduzierte Phosphatdüngung – Folgen für die Bodenfruchtbarkeit. In: Folgen negativer Nährstoffbilanzen in Ackerbaubetrieben, Tagungsband der Tagung des Verbandes der Landwirtschaftskammern e.V. (VLK) und des Bundesarbeitskreises Düngung (BAD) am 27. und 28. April 2004 in Würzburg, S 67-82.

BERGMANN, W. (1993): Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen, Gustav Fischer Verlag Jena, Stuttgart.

BLUME, H.-P.; BRÜMMER, G. W.; HORN, R.; KANDELER, E.; KÖGEL-KNABNER, I.; KRETZSCHMAR, R.; STAHR, K.; WILKE, B.-M. (2010): Scheffer/Schachschabel: Lehrbuch der Bodenkunde; 16. Aufl. 2010, XIV, 570 S., Springer Spektrum

BMELV (2011): Entwicklung des Inlandeinsatzes von Düngemitteln. Internetquelle (www.bmelv-statistik.de), Hrsg. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz.

DESTATIS Statistisches Bundesamt (1993 bis 2011): Fachserie 4 Reihe 8.2, Düngemittelversorgung.

FISCHNICH, O. & PÄTZOLD, C. (1961): Die Bedeutung der Phosphatdüngung für die Pflanzkartoffelerzeugung, Zeitschrift für Pflanzenernährung und Düngung, Bd. 93, 214-220, 1961.

HALBFASS, S.; GEBEL, M.; FRIESE, H.; GRUNEWALD, K.; MANNSFELD, K. (2005): Atlas der Nährstoffeinträge in sächsische Gewässer. Hrsg. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.

Ingitec (Ingenieurbüro für Gießereitechnik GmbH) (2009): Metallurgisches Phosphor-Recycling aus Klärschlämmen und Filterstäuben als Voraussetzung für die wirtschaftliche Erzeugung eines hochwertigen Phosphor-Düngemittels aus Abfällen. DBU-Projekt AZ 24557-23.

KNITTEL, H. & ALBERT, E. (2003): Praxishandbuch Dünger und Düngung, Agrimedia, 1., Aufl.

LAGA (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall) (2012): Bewertung von Handlungsoptionen zur nachhaltigen Nutzung sekundärer Phosphorreserven. Bericht, www.laga-online.de.

PINNEKAMP, J.; EVERDING, W.; GETHKE, K.; MONTAG, D.; WEINFURTNER, K.; SARTORIUS, C.; VON HORN, J.; TETTENBORN; F.; GÄTH, S.; WAIDA, C.; FEHRENBACH, H.; REINHARDT, J. (2011): Phosphorrecycling – Ökologische und wirtschaftliche Bewertung verschiedener Verfahren und Entwicklung eines strategischen Verwertungskonzepts für Deutschland (PhoBe). Abschlußbericht. Aachen.

PRADT, D. (2012): Vortrag DBV-Erntegespräch 05.09.2012 in Berlin, nach Dr. Simone Röhling, BGR 2011.

RICHTER, W. & SUNTHEIM, L. (1993): Phosphatfixierung in Verwitterungsböden auf Gneis. 1. Fixierung von Phosphat durch Sandfraktionen. Arch. Acker- Pfl. Boden, Vol. 37, S. 59-69.

RÖHRICHT, C. (1992): Untersuchungen zur Effektivität der mineralischen Phosphor-Düngung im Kartoffelbau, Die Bodenkultur, Bd. 43, S. 55-63, Wien.

RICHTER, W. & SUNTHEIM, L. (2003): Untersuchungen zum P-Fixierungsverhalten sächsischer Verwitterungsböden auf metamorphen Gesteinen, Archives of Agronomy Soil Science, Vol. 49, S. 261-273.

SCHEIDIG, K.; MALLON, J. & SCHAAF, M. (2011): Klärschlammverwertung nach dem Mephrec®-Verfahren. 7. Klärschlammtage, Fulda.

SUNTHEIM, L. (1990): Untersuchung zur P-Dynamik im Boden und Schlussfolgerungen für eine bedarfsgerechte P-Ernährung ausgewählter landwirtschaftlicher Nutzpflanzen. Dissertation B, Akademie der Landwirtschaftswissenschaft der DDR, Berlin.

U.S. Geological Survey (2011): Phosphate rock statistics. Data Series 140. Internetquelle (http://minerals.usgs.gov/ds/2005/140/).

WERNER, W. & TRIMBORN, M. (2008): Potentiale zur Effizienzsteigerung der P-Düngung. Braunschweiger Nährstofftage „Ressourcen schonender Einsatz von Phosphor in der Landwirtschaft“. 10 und 11. November 2008.

Herausgeber:
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-0
Telefax: +49 351 2612-1099
E-Mail: lfulg@smul.sachsen.de
www.smul.sachsen.de/lfulg

Autoren:
Franziska Heinitz, Katharina Farack, Dr. habil. Erhard Albert
Abteilung Pflanzliche Erzeugung/Referat Pflanzenbau
Waldheimer Straße 219, 01683 Nossen

Redaktion:
Dr. Michael Grunert
Abteilung Pflanzliche Erzeugung/Referat Pflanzenbau
Waldheimer Straße 219, 01683 Nossen
Telefon: + 49 35242 631-7101
Telefax: + 49 35242 631-7199
E-Mail: michael.grunert@smul.sachsen.de

Redaktionsschluss:
16.05.2013

ISSN:
1867-2868

Hinweis:
Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter https://publikationen.sachsen.de/bdb/ heruntergeladen werden.

Verteilerhinweis
Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.
Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als Parteinahme des Herausgebers zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.
Diese Beschränkungen gelten unabhängig vom Vertriebsweg, also unabhängig davon, auf welchem Wege und in welcher Anzahl diese Informationsschrift dem Empfänger zugegangen ist. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.