

Einfluss mineralischer P- und K-Düngung auf die Ertragsreaktion der Fruchtarten in Abhängigkeit von der Nährstoffversorgung des Bodens unter den Anbaubedingungen des ökologischen Landbaus in Deutschland

Mineral P and K fertilization effect on crop yield response as a function of soil nutrient supply under the cultivation conditions of organic farming in Germany

Zusammenfassung

Entsprechend den experimentellen Erfahrungen im konventionellen Landbau bestehen bei den Grundnährstoffen zwischen den pflanzenverfügbaren Nährstoffgehalten der Bodenkrume und den Ertragsdifferenzen nach zusätzlicher Düngung statistische Zusammenhänge, die sich besonders zum Aufbau von Verfahren der Düngungsbemessung eignen, wenn möglichst viele Versuchsergebnisse und Standorte in die Auswertung eingegangen sind. Die erhaltenen Ergebnisse sind jedoch insbesondere vom Ertragsniveau des Anbausystems abhängig. Daher wurden in dieser Arbeit alle verfügbaren Feldversuche zusammengefasst, die unter den Bedingungen des ökologischen Landbaus zur Düngung mit mineralischen P- (weicherdige Rohphosphate, Thomasphosphat) und K-Düngemittel (Kalirohsalze, Kaliumsulfat) durchgeführt worden sind.

Aus der Zeitperiode 1993–2016 konnten mehrjährige Versuchsergebnisse zum Nährstoff Phosphor von 21 Standorten und 243 Varianten und zum Nährstoff Kalium von 30 Standorten und 201 Vergleichsvarianten aus insgesamt 9 Bundesländern Deutschlands mit Hilfe von Regressions- und Boxplot-Analysen graphisch und tabellarisch ausgewertet werden, um die Beziehungen zwischen den CAL- und DL-löslichen Bodengehalten an P und K und den relativen Ertragsdifferenzen der angebauten Fruchtarten zwischen Standardvarianten ohne und Steigerungsvarianten mit Düngung (0–100 kg P/ha/a;

0–664 kg K/ha/a) möglichst quantitativ darstellen zu können. Für beide Nährstoffe wurden Ergebnisse erzielt, aus denen in Abhängigkeit von steigenden Bodengehalten an Phosphor (0,8–12,3 mg P/100 g) und an Kalium (2,1–29,0 mg K/100 g Boden) jeweils der abnehmende Ertragszuwachs von Mangelernährung bis zum Ertragsmaximum deutlich sichtbar wurde.

Die Ertragswirkung der P-Düngemittel war bei hohen pH-Werten des Bodens verschieden. Entgegen den Ergebnissen der P-Steigerungsversuche konnten bei niedriger K-Versorgung des Bodens deutliche Wechselwirkungen sowohl zwischen der Bodenart als auch den Fruchtarten und den Ertragsdifferenzen ermittelt werden. Bei zu niedrigen Bodengehalten an K führt Düngung auf schwereren Böden (L–T) zu höheren Ertragsdifferenzen als auf leichten Böden (S–sL). In der Rangfolge reagieren Klee- und Luzernegrass, Hackfrüchte (Kartoffel, Mais, Feldgemüse) und besonders Körnerleguminosen (Ackerbohne, Erbse, Lupine) deutlich empfindlicher auf eine Zusatzdüngung als die Getreidearten.

In Anlehnung an das Nährstoffklassifizierungs-System des VDLUFA konnten, durch Zusammenfassung der Ertragsergebnisse zu Gruppen unterschiedlicher Bodennährstoffgehalte, Bereiche an Nährstoffen ermittelt werden, bei denen durch zusätzliche Düngung keine oder nur noch sehr geringe durchschnittliche Ertragsdifferenzen erzielt werden. Diese optimalen Nährstoffgehalte liegen mit ungefähr 2,5–4,5 mg P/100 g und 6,6–10,0 mg K/100 g Boden z.T. deutlich unter den Werten, die für

Affiliation

Ehemals Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Nossen

Kontaktanschrift

Dr. Hartmut Kolbe, Altes Dorf 19, 04435 Schkeuditz, E-Mail: hartmutkolbe@yahoo.de

Zur Veröffentlichung angenommen

am 22. Januar 2019

konventionelle Anbaubedingungen angestrebt werden. Bei sehr niedrigen Bodengehalten kommt es in Abhängigkeit von einer hohen Streubreite der Einzelergebnisse zu mittleren Ertragszuwächsen von 9% bei Phosphor- und von 12% nach Kaliumdüngung. Die auf diese Weise experimentell begründeten Gruppen zur Klassifizierung der Bodengehalte können für die Weiterentwicklung von Verfahren zur Düngebedarfsermittlung im ökologischen Landbau Verwendung finden.

Stichwörter: Ökologischer Landbau, Fruchtartenertrag, P- u. K-Grunddüngung, Bodenuntersuchung

Abstract

According to conventional farming knowledge from basal nutrient experiments, statistical relations were found between topsoil plant-available nutrient concentrations and crop yield differences received from additional fertilization which are especially well-suited to establishing fertilization measurement procedures, when as many trial results and sites as possible in the data analysis were included. However, the findings obtained are dependent on the yield level of the cropping system. Therefore, in this paper all available field trials conducted under organic farming conditions were collected with regard to mineral phosphorus (P, soft rock phosphate, Thomas phosphate) and potassium (K, natural potash salts, potassium sulfate) fertilizer application.

Within the time period 1993–2016 regression and box-plot graphical and tabular analyses could be used to analyze multi-year trial results comprising 21 sites and 243 P variants and 30 sites and 201 K variants from a total of 9 federal German states. The relations between the available P and K nutrients (extraction with diluted lactate solutions, CAL, DL) and the relative crop yield differences between standard and fertilizer variants (0–100 kg P/ha/a, 0–664 kg K/ha/a) were described as quantitatively as possible. Subject to increasing soil content of P (0.8–12.3 mg P/100 g) and K (2.1–29.0 mg K/100 g), the declining yield increase from nutrient deficit up to yield maximum was clearly visible for both nutrient results.

The yield effect of P fertilizers was different at high soil pH values. Contrary to the findings of the P increase trials, distinct interactions between soil type as well as the cultivated crop species and the yield effects were found in the range of low K concentration. On plots with insufficient soil K content fertilization led to higher yield effects on heavy soils (L–T) than on light soils (S–sL). In order of precedence, clover and alfalfa grass mixtures, row crops (potato, maize, field vegetables) and especially grain legumes (field bean, pea, lupine) reacted much more sensitively than cereal crops.

According to the nutrient-availability classification system of the VDLUFA, aggregation of the crop yield results into groups of differently available soil nutrient content enabled nutrient ranges to be identified in which only

marginal or no mean yield effects were achieved with additional fertilizer application. These optimal nutrient values of 2.5–4.5 mg P/100 g and 6.6–10.0 mg K/100 g soil are located on a markedly lower level compared to estimated values of conventional cultivation systems. Subject to the high range of the individual results within very low soil nutrient contents, mean yield increase of 9% appeared after P and of 12% after K fertilization. These experimentally established groups for classifying soil nutrient content can be used to further development work on fertilizer requirement methods in organic farming systems.

Key words: organic farming, crop yield, P- and K basic fertilization, soil analysis

Einleitung

Unabhängig vom Anbausystem werden die chemischen Bodeneigenschaften als wichtige Bestandteile der Bodeneignung angesehen. Zwischen den Nährstoffgehalten des Bodens und dem Ertrag der Fruchtarten bestehen in einem weiten Versorgungsbereich positive statistische Beziehungen. In unzähligen Versuchen wurden hierzu unter den verschiedenen Standort- und Anbaubedingungen geeignete Extraktionsmittel für Bodenproben und andere Verfahren zur Kennzeichnung des Bodenversorgungsgrades ermittelt. Wichtige Zielstellungen bestehen darin, dass nicht nur möglichst enge Beziehungen zwischen den Ergebnissen der Methoden und den Erträgen der Fruchtarten erreicht werden, sondern dass sie auch für die robusten Bedingungen der landwirtschaftlichen Praxis geeignet und leicht umzusetzen sind (VETTER und FRÜCHTENICHT, 1974; BERGMANN, 1990; RICHTER und KERSCHBERGER, 1991; SPIEGEL et al., 2014).

Auf diese Weise wurden für jeden wichtigen Nährstoff eigene Düngungssysteme entwickelt. Zur stetig notwendigen Anpassung an wechselnde Umgebungsbedingungen und an den technischen Fortschritt hat sich ein regional differenziertes Versuchswesen etabliert, dessen Ergebnisse über eine gut funktionierende Infrastruktur zum Nährstoffmanagement zwischen Praxis, Beratung und Laboreinrichtungen umgesetzt werden können.

Im Bereich der Grundnährstoffe haben sich die Extraktionsmittel Doppellaktat (DL) (EGNER und RIEHM, 1955) bzw. Calcium-Acetat-Laktat (CAL) (SCHÜLLER, 1969) in wässriger Lösung zur Ermittlung des pflanzenverfügbaren Phosphor und Kalium im Boden unter verschiedenen Standortbedingungen als vorteilhaft erwiesen (WAGNER, 1970; WERNER und WIECHMANN, 1971; MUNK und REX, 1987), so dass diese Mittel in den Ländern Österreich und Deutschland eine weite Verbreitung gefunden haben. Die hierdurch erfassten Nährstoffe stehen in gewisser positiver Beziehung zu weiteren Anteilen unterschiedlicher Löslichkeit und auch zu den Gesamtgehalten im Boden (BUCHER et al., 1981; SHWIEKH et al., 2015). Relativ unabhängig vom eingesetzten Düngemittel werden z.B. nach dem Umsatz und der Mineralisation

auch die freiwerdenden Nährstoffe aus organischen Düngemitteln aus Versuchsergebnissen verschiedener Anbausysteme mit ausreichender Sicherheit erfasst (KOLBE und KÖHLER, 2008; FARACK et al., 2019).

Im Gegensatz zum Hauptnährstoff Stickstoff, zwischen dessen Verfügbarkeit im Boden und der Ertragsreaktion in der Regel eine direkte Beziehung erstellt werden kann (WEHRMANN und SCHARPF, 1986; OLFS et al., 2005), ist das Wirkungsspektrum der Grundnährstoffe Phosphor und Kalium in der Regel deutlich geringer ausgeprägt, so dass deren Ertragsreaktionen oft in einzelnen Versuchen, mit den meistens wenigen angelegten Wiederholungen, nicht signifikant erfasst werden können (FINGER, 1965, 1966; KUHLMANN und WEHRMANN, 1984; JUNGK, 1993).

Daher wurden schon seit langer Zeit Metastudien mit Erfolg angewendet, in denen unter anderem eine zusammenfassende Auswertung vieler meistens mehrjähriger Düngungsversuche mit möglichst unterschiedlich hohem Versorgungsniveau im Boden, unterschiedlichen Bodenarten und Standorten und auch die Ertragsreaktionen verschiedener Fruchtarten gemeinsam vorgenommen werden können.

Die in diesen sog. Eichversuchen ermittelten Ertragsdifferenzen zwischen Düngungs- und Standardvarianten können hierbei den jeweiligen Ausgangsgehalten an löslichen Bodennährstoffen in graphischen Abbildungen gegenübergestellt werden (KÖHNLEIN und KNAUER, 1965; VETTER und FRÜCHTENICHT, 1977; KÖSTER und SCHACHTSCHABEL, 1983; FRÜCHTENICHT und STEFFENS, 1996; FISCHER und APEL, 1998; HEGE und OFFENBERGER, 1996, 1998; JUNGK, 1993; KERSCHBERGER, 1995; KERSCHBERGER und SCHRÖTER, 1998; KUCHENBUCH und BUCZKO, 2011). Auf diese Weise ist in der Regel eine gesicherte Unterscheidung zwischen mindestens drei verschiedenen Versorgungsbereichen gelungen:

- bei sehr niedriger Bodenversorgung erfolgt eine deutliche Ertragsreaktion der Fruchtarten nach zusätzlicher Düngung, die in der Regel zudem durch eine sehr hohe statistische Streuung gekennzeichnet ist
- in einem mittleren Versorgungsbereich werden durch die Düngung nur noch geringe oder keine gesicherten Reaktionen erzielt (= optimaler Versorgungsbereich)
- bei relativ hoher Bodenversorgung wird keine Ertragsreaktion mehr registriert, die über der z.T. deutlichen natürlichen Streuung liegt (= Bereich maximaler Erträge).

Für die Bedingungen der landwirtschaftlichen Praxis besteht hierzu ein Bewertungssystem, das unter anderem vom Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA) generiert und im Bereich der Grundnährstoffe P, K, Mg, dem pH-Wert und der Versorgung mit organischer Substanz (Humus) als 5-stufiges A-E-System eingerichtet worden ist (SPIEGEL et al., 2014). Die Klassifizierung erfolgt mit Hilfe von Ergebnissen aus vielen Eichversuchen. Hierbei gilt, dass die Versorgungsklasse C angestrebt wird, bei der ein weitgehend optimales Ertragsniveau garantiert

werden kann. Die Klassen A und B weisen auf eine Unterversorgung, die Klassen D und E auf eine entsprechende Überversorgung des Bodens hin. Für den praktischen Einsatz wurden vom VDLUFA entsprechende Methoden und Richtwerte zur P- und K-Düngung erstellt (KERSCHBERGER et al., 1997; BAUMGÄRGEL et al., 1999; WIESLER et al., 2018). In einzelnen Bundesländern bestehen ergänzende Handlungsempfehlungen.

Durch Einhaltung dieser unter den experimentellen Bedingungen der konventionellen Landwirtschaft erstellten Methodik zur Grunddüngung kann im Allgemeinen eine ausreichende Sicherheit in der Pflanzenproduktion gewährleistet werden. Bei stark abweichenden Anbauverfahren, z.B. mit deutlichen Unterschieden im Ertragsniveau, sollten ergänzende Untersuchungen angestellt werden (MUNK und REX, 1987; MUNK, 1988; JANSSEN und DE WILLIGEN, 2006). So ist aus Nährstoffsteigerungsversuchen bekannt, dass zur Erlangung eines optimalen Ertrages z.B. bei einer deutlich höheren Stickstoffversorgung auch die anderen Nährstoffe in höheren Konzentrationen im Boden vorliegen müssen (Gesetze vom Minimum und vom abnehmenden Ertragszuwachs, MITSCHERLICH, 1909; GRAß, 1979).

Für die Anbauverfahren des ökologischen Landbaus (ANONYM, 2007) gelten zwar die gleichen naturwissenschaftlichen Grundlagen. Doch die Sicherung der Bodenfruchtbarkeit kommt einer höheren Bedeutung zu, was besonders auf die biologischen und physikalischen, aber auch auf die chemischen Eigenschaften zutrifft. So ist allgemein bekannt, dass z.B. die Höhe der Stickstoffversorgung unter den Bedingungen der ökologischen Praxis deutlich niedriger einzustufen ist als unter konventionellen Anbaubedingungen (KOLBE, 2000).

Auf Grund der damit zusammenhängenden zum Teil deutlich geringeren Ertragsleistungen (SEUFERT et al., 2012) sowie der größeren Bedeutung physikalischer und biologischer Bodeneigenschaften (OBERSON et al., 1993; STOCKDALE et al., 2002) wurde beim Aufbau erster Düngungssysteme für den Ökolandbau aus Ermangelung entsprechender Versuche vorläufig angenommen, dass nicht die Klasse C sondern bereits die Klasse B für die meisten Anbauverfahren eine ausreichende Versorgung mit den Grundnährstoffen gewährleisten kann (KOLBE et al., 1999; KOLBE, 2010). Diese Nährstoffbereiche zwischen 3,5–4,5 mg P/100 g und 6,5–8,5 mg K/100 g wurden auch schon seit langer Zeit in der landwirtschaftlichen Praxis und Beratung des Ökolandbaus empfohlen und sind in ersten Unterlagen zur praktischen Düngungsanwendung eingeflossen (KOLBE, 2001; KOLBE und SCHUSTER, 2011).

Da dieser Sachverhalt nur durch experimentelle Arbeiten unter den Bedingungen des ökologischen Landbaus geklärt werden konnte, wurde im Wesentlichen im Rahmen der länderübergreifenden Zusammenarbeit des Arbeitskreises Ökologischer Landbau des Verbandes der Landwirtschaftskammern (VLK) in Berlin die Anlage eines Netzes von Feldversuchen angeregt. Unter den vielfältigen Standortbedingungen Deutschlands wurden daraufhin Nährstoffsteigerungsversuche mit im Ökolandbau zugelassenen mineralischen Formen an Phos-

phor und Kalium angelegt. In dieser Arbeit erfolgt schließlich eine zusammenführende, überregionale Auswertung dieser mehrjährigen Feldversuche zur Eichung von Verfahren der Grunddüngung zum Einsatz im ökologischen Landbau in Deutschland. Folgende Zielstellungen standen im Vordergrund der Auswertungen:

- Erstellung von quantitativen Zusammenhängen zwischen der Ertragsreaktion der Fruchtarten und der Nährstoffversorgung des Bodens
- Herausarbeitung von pflanzenverfügbaren Nährstoffgehalten des Bodens, die für die Anbaubedingungen des Ökolandbaus als ausreichend bezeichnet werden können
- Erstellung einer Rangfolge der Düngebedürftigkeit für die angebauten Pflanzenarten
- Benennung von Besonderheiten der Standorte (Bodenart, pH-Wert) in der Düngerwirkung.

Material und Methoden

Unter den Anbaubedingungen des ökologischen Landbaus (ANONYM, 2007) wurden in verschiedenen Bundesländern Deutschlands Feldversuche zu sehr verschiedenen Fragestellungen angelegt. Auf Grundlage üblicher Anlageformen befanden sich entweder Düngungsversuche mit jährlichem Ortswechsel oder Dauerversuche mit in der Regel ein- bis mehrstufigen Düngungsvarianten und 3–4 Wiederholungen. Für den Nährstoff Phosphor (P) konnten Versuche von insgesamt 21 Standorten, darunter Ergebnisse aus 7 Dauerversuchen, aus der Zeitperiode 1994–2016 mit insgesamt 243 Verrechnungsvarianten zusammengetragen werden (Tab. 1). Beim Nährstoff Kalium (K) waren es u. a. 5 Dauerversuche von insgesamt 30 Standorten mit 201 Vergleichsvarianten aus den Jahren 1993–2015 (Tab. 2).

Es konnten nur Versuche aufgenommen werden, in denen bestimmte Grundsätze eingehalten worden sind. Neben der langjährigen Erfüllung der Anbaubedingungen des Ökolandbaus durften lediglich in dieser Anbauform erlaubte oder in wissenschaftlicher Prüfung befindliche Düngemittel verwendet werden. Aus Gründen der Einhaltung der Ceteris-Paribus-Regel konnten keine organischen Düngemittel, sondern nur gewöhnliche mineralische Einnährstoff-Düngemittel Verwendung finden, was in der Regel auch eingehalten werden konnte. Die in einigen geprüften Düngemitteln enthaltenen Begleitelemente (S, Mg) weisen oft geringere Konzentrationen oder Düngewirkungen auf, so dass aus den Erfahrungen vergleichbarer Düngungsversuche meistens mit keiner bedeutenden Beeinflussung der erhaltenen Ertragsresultate zu rechnen ist (SCHACHTSCHABEL, 1963; KUCHENBUCH und BUCZKO, 2011). Außerdem musste jede Versuchsanlage mindestens eine Standard-Variante enthalten, in der keine Düngung erfolgte. Von allen Varianten mussten jährliche Ertragsdaten an Hauptfrüchten (oder an Gesamt-Erträgen aus Einzelernten bzw. an Haupt- und Nebenfrüchten) der angebauten Fruchtarten vorlie-

gen. In den meisten Versuchen wurden folgende Düngemittel verwendet:

- Phosphor: (weicherdige) Rohphosphate, Thomasphosphat
- Kalium: Kalirohsalze, Kaliumsulfat.

Die als pflanzenverfügbar anzusehenden Nährstoffanteile wurden entweder als DL-lösliches Phosphat (DL-P) und Kalium (DL-K) nach EGNER und RIEHM (1955) oder als CAL-lösliches Phosphat und Kalium (CAL-P, CAL-K) nach SCHÜLLER (1969) an Bodenproben aus jeweils 0–20 cm Bodentiefe extrahiert. In der Regel waren die Daten in jedem Versuchsjahr nach beiden Methoden ermittelt worden. Von einem kleinen Umfang an Werten lagen jedoch nur die DL-löslichen Nährstoffe vor. Diese Ergebnisse wurden mit Hilfe von einfachen statistischen Gleichungen jeweils in CAL-Werte umgerechnet, die aus den vorliegenden Analysewerten beider Methoden ermittelt worden sind (Tab. 1 und Tab. 2). In den Vergleichskalkulationen wurden die Mittelwerte der Wiederholungen der erhaltenen CAL-löslichen Werte verwendet: Phosphat als P in mg/100 g und Kalium als K in mg/100 g Boden.

Bei den P-Versuchen konnten Standorte aus insgesamt neun Bundesländern berücksichtigt werden, die nach Reichsbodenschätzung über Böden aus Sand (S) bis tonigem Lehm (tL) mit Bodenpunkten von annähernd 20 bis über 95 aufwiesen. Die K-Versuche stammten aus sieben Bundesländern unter Berücksichtigung von Bodenarten der Güte Sand (S) bis tonigem Lehm (tL) und Bodenpunkten zwischen ungefähr 20 – 95 (Tab. 1 und Tab. 2). Es wurden die in den jeweiligen Bundesländern gebräuchlichen Bezeichnungen für die Bodenarten dokumentiert. Für die spätere Charakterisierung und Zusammenfassung der Böden wurden folgende Bezeichnungen verwendet (Schluffböden sind unter mittleren – schweren Böden eingeordnet):

- Leichte Böden: Sand (S), anlehmiger Sand (Sl)
- Mittlere Böden: lehmiger Sand (IS), sandiger Lehm (sL)
- Schwere Böden: Lehm (L), lehmiger Ton (IT), Ton (T).

In den erfassten Dauerversuchen wurden in der Regel alle Fruchtarten gewöhnlicher ökologischer Fruchtfolgen beprobt, in den Versuchen mit Ortswechsel nur die in den jeweiligen Untersuchungsjahren angebauten Fruchtarten (Tab. 1 und Tab. 2). Zur Verrechnung wurden die Ertragswerte der Fruchtarten als Relativ-Erträge der Düngungsvarianten in Relation zu den Erträgen der Standardvarianten ohne Düngung (= 100%) ausgewiesen. Ein Relativwert wurde auf diese Weise mindestens aus einem Standardertrag mit keiner oder geringer Düngung und einem Ertragswert aus Varianten mit Düngung bzw. mit höherer Düngung ermittelt. Die Standardwerte konnten für mehrere Düngungsvarianten Verwendung finden. Es wurden die Mittelwerte über die untersuchten Wiederholungen verwendet. Durch diese Vorgehensweise konnten in einer Auswertung die nährstoffbedingten Ertragsunterschiede von den erfassten Fruchtarten gemeinsam ausgewertet werden.

Tab. 1. Beschreibung der Standorte, der Versuchsbedingungen und beteiligte Institutionen zum Nährstoff Phosphor

Standort-Nr.	Versuchsart**	P _{DL} (mg/100 g)	P _{CAL} (mg/100 g)	Düngemittel	Düngungshöhe (kg P/ha/a)	Bodenart	Ackerzahl/Bodenpunkte	pH-Wert	Fruchtarten (dt TM/ha Standard-Varianten)
1	D	1,1–4,4	1,2–2,1	Dolophos 6,5% P	15–60	L	68	5,4–5,7	W.-Weizen 49–52, Kartoffel 30–44, Ackerbohne 6–18, W.-Gerste 40–56, Luzerne-Klee-gras 53–97
2	O	7,5–14,0	5,8–10,8*	Rohphosphat 14,0% P	15–60	S-Sl	33–38	5,9	S.-Gerste 27–39
3	O	1,5–2,2	1,2–1,7*	Physalg 10,9% P	40	lIS	39	6,6	Grünlandsaaten (Klee-gras) 10–44
4	O	1,0–3,0	0,8–2,3*	Physalg 10,9% P	40	lIS	38	6,0	Grünlandsaaten (Klee-gras) 11–45
5	D	1,5–2,1	1,1–1,6	Thomasphosphat 6,5% P	50–100	L	x	7,4	Kartoffel 28, Roggen 26, Hafer-Erbisen-Wicken-Gemenge 17, Luzerne-Gras x,
6	D	3,8–3,9	1,7–2,9	Thomasphosphat 6,5% P	50–100	L	x	6,6	Hafer-Wicken-Gemenge 62, Kartoffel 81, W.-Weizen 43, Roggen x,
7	O	x	9,9–12,3	Dolophos 6,5% P	26	L	85–96	7,4	Mais 88, W.-Weizen 26–39, S.-Gerste 35–38
8	O	x	12,0	Patent-PK 5,2% P	16–26	tL	57	5,3	Mais 87
9	O	x	3,0–5,0	Patent-PK 5,2% P	21	tL	55	5,2–5,8	Mais 86–117
10	O	4,9–6,5	4,3–5,0*	Litho-Physalg 7,9% P	8–30	Sl	23–31	6,2	W.-Roggen 25–27, Mais 91–99
11	D	4,9–5,9	3,8–5,2	Litho-Physalg 7,9% P	8–30	Sl	23–31	6,1–6,3	W.-Roggen 25–27, Klee-gras 49–77
12	D	5,5	4,3–4,6	Rohphosphat 14,0% P, Rohphosphat 25–50 + element. S	25–50	L	50–65	6,5	Hafer 26, Ackerbohne 41, Dinkel 45, Grün-mais 183, Triticale 51, Klee-gras 104–123
13	O	x	3,0	Rohphosphat 15,5% P, Na-behand. Klärschlammmasche 7,6% P	80	uL	74	6,5	Mais 100–157
14	D	x	1,4–2,0	Gafsa-Phosphat 14,3% P, Neues Tho-masphosphat 9,0% P	5–30	L	74	6,5–7,0	Dinkel 41, Hafer 17, W.-Weizen 30
15	D	x	1,1–2,3	Gafsa-Phosphat 14,3% P, Neues Tho-masphosphat 9,0% P, Ulophos 11,0% P	5–80	Lu-Ul	66	5,7–6,7	Dinkel 41, Hafer 17, Luzerne-Gras 63–90, W.-Weizen 30–45, S.-Mais 137, S.-Weizen 39, Ackerbohne 49
16	O	x	1,7	Gafsa-Phosphat 14,3% P	30	Lu-Ul	66	6,5	Luzerne-Klee-gras 70–120
17	O	x	4,1	Rohphosphat 14,0% P	40	IS-sLU	20–70	6,3	Ackerbohne 17–18
18	O	x	10,3	Rohphosphat 14,0% P	40	IS-sL	50–70	6,1	Ackerbohne 11
19	O	x	6,9	Rohphosphat 14,0% P	40	L	85–90	5,8	Ackerbohne 26, S.-Weizen 31
20	O	x	2,6–9,1	Rohphosphat 14,0% P	50	IS-sLU	20–70	5,8–6,8	Ackerbohne 23–42
21	O	x	2,6–9,1	Rohphosphat 14,0% P	50	IS-sLU	20–70	5,8–6,8	Sojabohne 25–43

* Umrechnung: P_{CAL} (mg/100 g) = P_{DL} · 77,2%/100% (n = 89); ** D = Dauerversuch; O = Versuch m. Ortswechsel; *** Bundesländer Deutschland:

MV: Mecklenburg-Vorpommern; SN: Sachsen; RP: Rheinland-Pfalz; SA: Sachsen-Anhalt; NI: Niedersachsen; BB: Brandenburg; BW: Baden-Württemberg; HE: Hessen; NRW: Nord-Rhein-Westfalen; x = keine Angaben

Tab. 1. Fortsetzung

Standort-Nr.	Varianten-Anzahl (n)	Bundesland***	Ort/Versuchseinrichtung	Einrichtung/Autor	Jahr
1	48	SN	Roda, Ökofeld	Landesamt f. Umwelt, Landwirtschaft u. Geologie: FARACK et al. (2019)	2000–2011
2	16	MV	Gülzow, Ökofeld	Landesforschungsanstalt f. Landwirtschaft u. Fischerei: GRUBER und TITZE (2010b)	2005–2008
3	7	MV	x, Ökobetrieb	Universität Rostock: MAHNKE et al. (2017)	2014–2016
4	7	MV	x, konvent. Betrieb (Umstellung)	Universität Rostock: MAHNKE et al. (2017)	2014–2016
5	16	RP	Carlsberg, Ökobetrieb	Universität Trier: EMMERLING (1999), EMMERLING (2005) schriftl. Mittlg.	1994–2002
6	12	RP	Abtweiler, Ökobetrieb	Universität Trier: EMMERLING (1999), EMMERLING (2005) schriftl. Mittlg.-	1994–2000
7	11	SA	Bernburg, Ökofeld	Landesanstalt f. Landwirtschaft, Forsten u. Gartenbau: KOCH (2008) schriftl. Mittlg.	2003–2004
8	2	NI	Over, Ökobetrieb	Landwirtschaftskammer: MEYERCORDT (2006) schriftl. Mittlg.	2002–2003
9	4	NI	Cuxhaven, Ökobetrieb	Landwirtschaftskammer: MEYERCORDT (2006) schriftl. Mittlg.	2004–2005
10	8	BB	Güterfelde, Ökofeld	Landesamt f. Ländl. Entwicklung, Landwirtschaft u. Flurneuordnung: BELKNER (2017) schriftl. Mittlg.	2012–2013
11	11	BB	Güterfelde, Ökofeld	Landesamt f. Ländl. Entwicklung, Landwirtschaft u. Flurneuordnung: DITTMANN (2011, 2012), DITTMANN (2010) schriftl. Mittlg.	2009–2011
12	7	BW	Kleinhohenheim, Ökofeld	Universität Hohenheim: SCHULZ (2010) schriftl. Mittlg., MÜLLER (2017) schriftl. Mittlg.	2002–2008
13	4	BW	Kleinhohenheim, Ökofeld	Universität Hohenheim: WOLLMANN und MÖLLER (2018)	2014–2015
14	18	HE	Villmar, Gladbacherhof, Ökofeld	Universität Gießen: STEFFENS (2010) schriftl. Mittlg., STEFFENS und LEITHOLD (2011)	2006–2010
15	54	HE	Villmar, Gladbacherhof, Ökofeld	Universität Gießen: PETZOLDT (2015)	2006–2014
16	2	HE	Villmar, Gladbacherhof, Ökofeld	Universität Gießen: FISCHINGER et al. (2013)	2011
17	2	NRW	Hennef, Wiesengut, Ökofeld	Universität Bonn: SEEHUBER et al. (2013), SEEHUBER (2015)	2010
18	1	NRW	Niederkrüchten, Ökobetrieb	Universität Bonn: SEEHUBER (2015)	2010
19	2	NRW	Klein-Altendorf, Ökobetrieb	Universität Bonn: SEEHUBER (2015)	2010
20	6	NRW	Hennef, Wiesengut, Ökofeld	Universität Bonn: KÖPKE et al. (2016)	2013–2015
21	5	NRW	Hennef, Wiesengut, Ökofeld	Universität Bonn: KÖPKE et al. (2016)	2013–2015

Tab. 2. Beschreibung der Standorte, der Versuchsbedingungen und beteiligte Institutionen zum Nährstoff Kalium

Nr.	Versuchsart**	K _{DL} (mg/100 g)	K _{CAL} (mg/100 g)	Düngemittel	Düngungshöhe (kg K/ha/a)	Bodenart	Ackerzahl/ Bodenpunkte	pH-Wert	Fruchtart (dt TM/ha Standard-Varianten)
1	D	2,8–10,5	2,9–8,9	Patentkali 24,9% K	40–160	L	68	5,5–5,8	W.-Weizen 50–52, Kartoffel 30–38, Ackerbohne 4–16, W.-Gerste 33–56, Luzerne-Klee gras 52–97
2	O	4,3–8,5	2,9–8,4	Patentkali 24,9% K	200–400	L	68	5,7–6,3	Kartoffel 33–84
3	O	x	8,1	Magnesia-Kainit 9,1% K, Patentkali 24,9% K	83–166	SL	73	x	Spinat 29
4	O	5,8–14,9	4,6–13,7*	Patentkali 24,9% K	40–160	S-SI	33–38	5,9	Sommergerste 26–38
5	O	12,0–13,0	10,8–11,8*	Patentkali 24,9% K	80	I'S	33–38	6,3	Kartoffel 34–59
6	O	14,4	13,2*	Kainit 8,3% K	66	S-SI	33–38	6,3	S.-Weizen 38
7	O	11,0	9,8*	Patentkali 24,9% K	69	S-SI	33–38	6,3	Erbse 28, Lupine 29
8	O	x	5,8–10,0	Patentkali 24,9% K	83–166	sL	45	6,3	Kartoffel 45
9	O	x	5,8–10,0	Patentkali 24,9% K	83–166	S	28	5,5	Kartoffel 53
10	O	x	8,3	Patentkali 24,9% K	83–166	S	28	4,9	Kartoffel 43
11	O	x	5,8	Patentkali 24,9% K	83–166	SL	50	5,6	Kartoffel 39
12	O	x	10,0	Patentkali 24,9% K	100–200	IS	x	5,5	Kartoffel 79
13	O	x	9,0	Patentkali 24,9% K	83	tL	x	x	Möhren 42
14	O	x	5,5	Patentkali 24,9% K	83–166	L	x	x	Möhren 67
15	O	x	3,0	Patentkali 24,9% K	83	S	x	x	Möhren 93
16	O	x	13,2	Kaliumsulfat x	80	L	85–90	5,8	Ackerbohne 26, S.-Weizen 31
17	O	x	13,4	Kaliumsulfat x	80	IS-sL	50–70	6,1	S.-Weizen 11
18	O	x	16,8	Kaliumsulfat x, Kaliumchlorid x	95	IS-sIU	20–70	5,7–5,8	Ackerbohne 35–40
19	D	x	2,5–4,6	Patentkali 24,9% K, Orthoklas 10,0% K	332–400	L	75	6,7	Kartoffel 42–73, W.-Weizen 37–52, Hafer 44–57, Luzernegras 101–149, Klee gras 351, W.-Roggen 33, Taugetes 29
20	O	x	6,6	Patentkali 24,9% K	166–498	L	75	6,3	Möhren 61
21	O	x	4,2	Patentkali 24,9% K	166–664	L	75	6,6	Möhren 51
22	D	x	2,1–6,1	Kaliumsulfat x	150–400	L	75	6,6	Kartoffel 70–75, Hafer 27–29, Klee gras 73–112, Weizen 25, Mais 108–122
23	O	x	19,0–22,0	Patentkali 24,9% K	91–149	L	85–96	7,4	Mais 81–86, W.-Weizen 26–39, S.-Gerste 35–38
24	O	x	8,0–11,3	Kaliumsulfat x	175–217	IS	44–49	5,8	Kartoffel 46–62
25	O	x	7,5–11,3	Kaliumsulfat x	175–217	IS	44–49	5,6–5,7	Kartoffel 59–71
26	O	x	8,0	Kaliumsulfat x	125	L	66–75	6,7	Weizen 33
27	O	x	20,0	Patent-PK 12,5% K	38–63	tL	57	5,3	Mais 87
28	O	x	10,0–29,0	Patent-PK 12,5% K	50	tL	55	5,2–5,8	Mais 86–117

Tab. 2. Fortsetzung

Nr.	Varianten-Anzahl (n)	Bundesland***	Ort/Versuchsart	Einrichtung/Autor	Jahr
1	57	SN	Roda, Ökofeld	Landesamt f. Umwelt, Landwirtschaft u. Geologie: FARACK et al. (2019)	2000–2011
2	6	SN	Roda, Ökofeld	Landesamt f. Umwelt, Landwirtschaft u. Geologie: KOLBE et al. (2019)	2004–2006
3	2	SN	x	Landesamt f. Umwelt, Landwirtschaft u. Geologie: LABER (2003)	2000–2002
4	16	MV	Gülzow, Ökofeld	Landesforschungsanstalt f. Landwirtschaft u. Fischerei: GRUBER und TITZE (2010b)	2005–2008
5	7	MV	Gülzow, Ökofeld	Landesforschungsanstalt f. Landwirtschaft u. Fischerei: GRUBER (2010), GRUBER und TITZE (2010a)	2007–2009
6	2	MV	Gülzow, Ökofeld	Landesforschungsanstalt f. Landwirtschaft u. Fischerei: GRUBER und TITZE (2008)	2005–2007
7	2	MV	Gülzow, Ökofeld	Landesforschungsanstalt f. Landwirtschaft u. Fischerei: GRUBER und TITZE (2010a)	2012–2014
8	2	NRW	Gütersloh, Ökobetrieb	Landwirtschaftskammer: PAFFRATH et al. (2003b)	2001
9	2	NRW	Gütersloh, Ökobetrieb	Landwirtschaftskammer: PAFFRATH et al. (2003b)	2001
10	2	NRW	Gütersloh, Ökobetrieb	Landwirtschaftskammer: PAFFRATH et al. (2003b)	2002
11	2	NRW	Steinfurt, Ökobetrieb	Landwirtschaftskammer: PAFFRATH et al. (2003b)	2002
12	2	NRW	Kleve, Ökobetrieb	Landwirtschaftskammer: PAFFRATH et al. (2003b)	1995
13	1	NRW	Mettmann, Ökobetrieb	Landwirtschaftskammer: PAFFRATH et al. (2003a)	2001
14	2	NRW	Li., Ökobetrieb	Landwirtschaftskammer: PAFFRATH et al. (2003a)	2001
15	1	NRW	Gütersloh, Ökobetrieb	Landwirtschaftskammer: PAFFRATH et al. (2003a)	2001
16	2	NRW	Klein-Altendorf, Ökobetrieb	Universität Bonn: SEEHUBER (2015)	2010
17	1	NRW	Niederkrüchten, Ökobetrieb	Universität Bonn: SEEHUBER (2015)	2010
18	4	NRW	Hennef, Wiesengut, Ökofeld	Universität Bonn: KÖPKE et al. (2016)	2013–2014
19	19	HE	Bad Vilbel, Dottenfelderhof, Himmelsacker-Kirschberg, Ökofeld	Landbauschule Dottenfelderhof: SPIEß (2002, 2003), SPIEß et al. (2009), SPIEß und MATTHES (2010)	1997–2010
20	3	HE	Bad Vilbel, Dottenfelderhof, Hölle 2, Ökofeld	Landbauschule Dottenfelderhof: SPIEß (2002)	1993
21	4	HE	Bad Vilbel, Himmelsacker Straße, Ökofeld	Landbauschule Dottenfelderhof: SPIEß (2002)	1995
22	12	HE	Bad Vilbel, Himmelsacker Straße, Ökofeld	Landbauschule Dottenfelderhof: SPIEß und MATTHES (2017)	2010–2015
23	11	SA	Bernburg, Ökofeld	Landesanstalt f. Landwirtschaft, Forsten u. Gartenbau: KOCH (2008) schriftl. Mittlg.	2003–2004
24	6	NI	x, Ökobetrieb	Universität Kassel-Witzenhausen: HAASE et al. (2005a)	2002–2004
25	8	NI	x, Ökobetrieb	Universität Kassel-Witzenhausen: HAASE et al. (2005b), HAASE et al. (2006)	2003–2004
26	1	NI	Heuersen, Ökobetrieb	Landwirtschaftskammer: MEYERCORDT (2001)	2001
27	2	NI	Over, Ökobetrieb	Landwirtschaftskammer: MEYERCORDT (2006) schriftl. Mittlg.	2003
28	2	NI	Cuxhaven, Ökobetrieb	Landwirtschaftskammer: MEYERCORDT (2006) schriftl. Mittlg.	2004–2005

Tab. 2. Fortsetzung

Nr.	Versuchsart**	K _{DL} (mg/100 g)	K _{CAL} (mg/100 g)	Düngemittel	Düngungshöhe (kg K/ha/a)	Bodenart	Ackerzahl/Bodenpunkte	pH-Wert	Fruchtart (dt TM/ha Standard-Varianten)
29	D	5,4–6,3	4,3–5,1	Patentkali 24,9% K	40–160	Sl	23–31	6,1–6,3	W.-Roggen 27–29, Kleegras 49–82
30	D	3,6–8,8	2,4–7,6*	Patentkali 24,9% K	40–160	Sl	23–31	6,2	W.-Roggen 27–28, Mais 93–99

* Umrechnung: K_{CAL} (mg/100 g) = K_{DL} - 1,23 (mg K/100 g) (n = 75); ** D = Dauerversuch; O = Versuch m. Ortswechsel; *** Bundesländer Deutschland: MV: Mecklenburg-Vorpommern; SN: Sachsen; SA: Sachsen-Anhalt; NI: Niedersachsen; BB: Brandenburg; HE: Hessen; NRW: Nord-Rhein-Westfalen; * = keine Angaben

Tab. 2. Fortsetzung

Nr.	Varianten-Anzahl (n)	Bundesland***	Ort/Versuchsart	Einrichtung/Autor	Jahr
29	12	BB	Güterfelde, Ökofeld	Landesamt f. Ländl. Entwicklung, Landwirtschaft u. Flurneuordnung: DITTMANN (2011, 2012), DITTMANN (2010) schriftl. Mittg.	2009–2011
30	8	BB	Güterfelde, Ökofeld	Landesamt f. Ländl. Entwicklung, Landwirtschaft u. Flurneuordnung: BELKNER (2017) schriftl. Mittg.	2012–2013

Bei den Phosphat-Versuchen wurden folgende Fruchtarten angebaut:

- Getreidearten: Winterweizen, Wintergerste, Winterroggen, Triticale, Dinkel, Sommerweizen, Sommergerste, Hafer
- Hackfruchtarten inkl. Mais: Kartoffel, Körner- u. Silo-Mais, Grünmais
- Futterleguminosenarten: Luzerne-Klee gras, Luzerne gras, Hafer-Erb sen-Wicken-Gemenge, Hafer-Wicken-Gemenge
- Körnerleguminosenarten: Ackerbohne, Sojabohne.

Bei den Kalium-Versuchen wurden folgende Fruchtarten angebaut:

- Getreidearten: Winterweizen, Wintergerste, Winterroggen, Sommerweizen, Sommergerste, Hafer
- Hackfruchtarten inkl. Mais: Kartoffel, Körner- u. Silo-Mais
- Futterleguminosenarten: Luzerne-Klee gras, Luzerne gras
- Körnerleguminosenarten: Ackerbohne, Erbse, Lupine
- Feldgemüse- u.a. Arten: Spinat, Möhren, Tagetes-Blumen.

In den Tabellen 1–2 wurden die Einzelwerte der Fruchtarten-Erträge der Standardvarianten in Trockenmasse (TM) ausgewiesen. Die erhaltenen relativen Ertragsdifferenzen jeder Fruchtart in jedem Anbaujahr wurden schließlich den ermittelten Bodengehalten an CAL-löslichem Phosphat bzw. Kalium in graphischen Abbildungen gegenübergestellt. Mit Hilfe der in den Tabellen angegebenen Gleichungen wurden von einer geringen Anzahl an Erhebungsdaten die DL-löslichen Werte in CAL-Werte umgerechnet.

Die Bewertung der erhaltenen Ergebnisse wurde in Anlehnung an das VDLUFA-Klassifizierungssystem für Bodenuntersuchungsergebnisse vorgenommen: A = sehr niedrig, B = niedrig, C = mittel, optimal, D = hoch, E = sehr hoch (SPIEGEL et al., 2014). Die Untergliederung der einzelnen Klassen erfolgte an Hand der erhobenen statistischen Merkmale.

Die statistische Auswertung der Versuchsdaten erfolgte mit dem Statistik-Software-Paket SPSS bzw. mit dem Programm EXCEL. Es wurden Regressionsanalysen, Korrelationen (r), Scatterplots, Boxplots, Median, Mittelwert (MW), Perzentile, Anzahl (n), die Standardabweichung (s) und das Bestimmtheitsmaß (R^2) gerechnet. Signifikanzniveaus: $p = 10\%$ (*), 5% *, 1% ***, $0,1\%$ ***.

Ergebnisse

Phosphorversorgung

Die aus einem großen Standortbereich zusammengeführten Feldversuche sind unter den praktischen Verhältnissen des ökologischen Landbaus durchgeführt worden. Es kamen mineralische P-Düngemitteln mit stark unter-

schiedlicher Düngungshöhe zur Anwendung. Die Düngung bestand aus Stufen mit verhältnismäßig geringer Düngungshöhe um 5–25 kg P/ha/a bis zu Düngungswerten von 30–100 kg P/ha/a ($n = 250$, MW = 37 kg P/ha/a, $s = \pm 25$ kg P/ha/a).

Die in den Versuchsanstellungen angebauten und untersuchten Fruchtarten stammten in der Regel aus typischen ökologischen Fruchtfolgen, in denen zur N-Versorgung Leguminosen in gewöhnlichem Umfang angebaut worden und organische Düngemittel in geringer Höhe zum Einsatz gekommen sind. Im Vergleich zu den Leguminosenparzellen war die Position der geprüften Fruchtarten in den Versuchen mit Ortswechsel unterschiedlich in den Fruchtfolgen angesiedelt, in den Dauerversuchen wurden vollständige Fruchtfolgen inklusive der Leguminosen geprüft.

Von den Standardvarianten ohne mineralische Düngung wurden die TM-Erträge der Hauptprodukte der Fruchtarten erfasst und in Tabelle 3 für die P-Versuche dargestellt. Die Mittelwerte der Erträge und deren Schwankung weisen ein im Ökolandbau übliches mittleres Niveau auf, sie werden deutlich von den Standortfaktoren, z.B. von der Bodenart, geprägt (Tab. 1 und Tab. 3).

Von allen Varianten wurden im Vergleich zu den jeweiligen Standarderträgen (= 100%) die Einzelerträge der angebauten Fruchtarten der P-Düngungsvarianten ins Verhältnis gesetzt. Es wurden Erträge von z.T. weit über 100%, aber auch deutlich niedrigere Erträge als in den Standardvarianten berechnet. Die auf diese Weise erhaltenen relativen Ertragsergebnisse wurden dann den in den jeweiligen Anbaujahren vorgefundenen mittleren Bodenuntersuchungsergebnissen an CAL-löslichen P-Gehalten des Bodens gegenübergestellt und graphisch abgebildet (Abb. 1).

Die Wahl einer Potenzgleichung war dem Punkteverlauf am besten angepasst und führte zu einer sehr hohen statistischen Absicherung ($r = 0,377^{***}$). Aus der Abbildung wird dennoch eine erhebliche Streuung der einzelnen ermittelten Ertragswerte deutlich. In einem Versorgungsbereich an löslichem Phosphat zwischen 5–12 mg P/100 g Boden verläuft die Regressionskurve in etwa in dem Bereich der 100%-Linie. Hieraus kann erkannt werden, dass in diesem Versorgungsbereich im Durchschnitt der Varianten bzw. Anbaujahre es durch die zusätzliche P-Düngung zu keiner Ertragsreaktion der geprüften Fruchtarten gekommen ist. Die absolute Schwankung bewegt sich in diesem Bereich um nicht mehr als $\pm 13\%$ Ertragsdifferenz.

In Richtung niedrigerer P-Versorgung schließt sich ein Bereich an, in dem die Wahrscheinlichkeit langsam zunimmt, dass im Durchschnitt vieler Versuchsvarianten es zunächst zu sehr geringen, bei weiter abnehmender P-Versorgung des Bodens dann zu deutlicheren mittleren Ertragsreaktionen im Vergleich zu keiner Düngung kommt. In dem Versorgungsbereich von unter 3,5 mg P/100 g Boden sind im Vergleich zu keiner Düngung (100%) nicht mehr so starke negative Ertragsschwankungen aufgetreten, während die positiven Abweichungen immer deutlicher zutage treten. In diesem Bereich ist

Tab. 3. Fruchtartenerträge (dt TM/ha/a) der Standardvarianten der P- und K-Steigerungsversuche

	P-Versuche Anzahl	Mittelwert	Standard- abweichung	K-Versuche Anzahl	Mittelwert	Standard- abweichung
W.-Weizen	33	38,9	8,9	20	42,0	10,4
W.-Gerste	8	48,0	8,6	10	44,5	12,1
W.-Roggen	12	25,7	0,8	9	28,7	1,8
Triticale	2	51,0	0,0	–	–	–
Dinkel	14	41,6	1,5	–	–	–
S.-Weizen	7	37,9	3,0	4	29,5	12,8
S.-Gerste	20	33,0	4,3	20	32,6	4,9
Hafer	14	18,3	3,3	5	40,2	12,4
Mais	25	116,7	31,3	13	95,2	12,8
Kartoffel	12	50,2	23,6	53	51,9	15,2
Ackerfutter	44	78,2	19,2	37	79,1	24,3
Grünlandansaat (Klee gras)	14	24,8	11,2	–	–	–
Hafer-Erbse-Wicken-Gemenge	6	32,0	23,2	–	–	–
Ackerbohne	26	29,0	16,2	–	–	–
Sojabohne	5	32,0	10,0	–	–	–
Körnerleguminosen	–	–	–	16	20,6	13,0
Spinat	–	–	–	2	29,0	0,0
Möhren	–	–	–	11	59,6	13,6

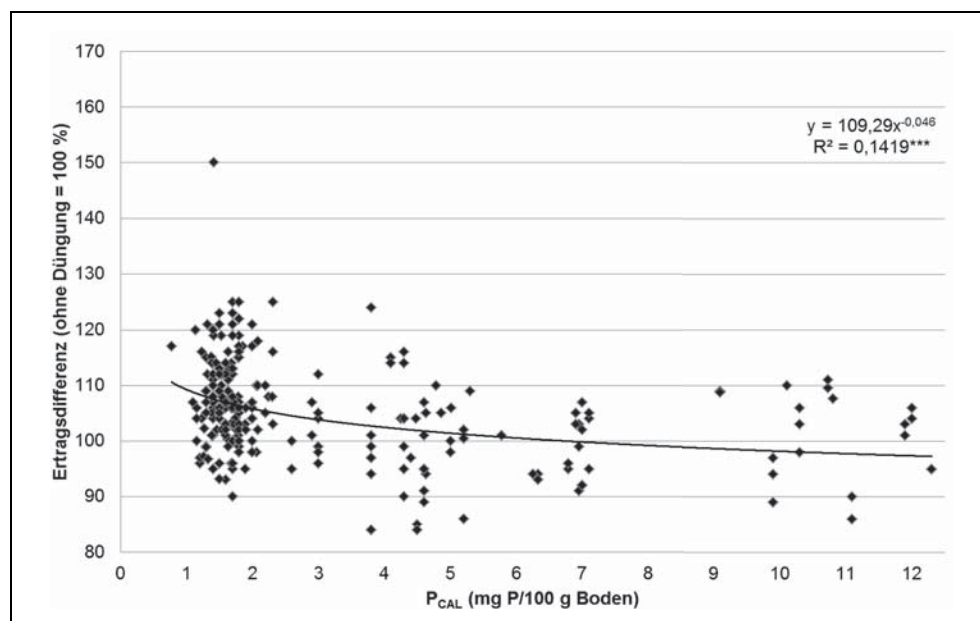


Abb. 1. Einfluss der Versorgung mit löslichem Phosphor des Bodens auf die relative Ertragsdifferenz an Fruchtarten durch mineralische P-Düngung im Vergleich zu keiner Düngung (= 100%)

eine ausgeprägte Krümmung der Regressionskurve hin zu höheren relativen Ertragswerten zu erkennen (Abb. 1).

In Abbildung 2 ist eine Aufgliederung der Ertragsreaktionen nach Fruchtartengruppen vorgenommen worden. Es ist deutlich zu erkennen, dass die unterschiedliche P-Versorgung des Bodens kaum zu einer differenzierenden Ertragsreaktion der Fruchtarten geführt hat, obwohl die dargestellten Gruppen Regressionskurven mit hoher statistischer Absicherung aufweisen. Auf Grund der hohen Anzahl an Untersuchungsvarianten kann festgestellt wer-

den, dass besonders bei geringer P-Versorgung des Bodens es zu keiner Unterscheidung in der Ertragsreaktion der Fruchtartengruppen kommt. Eine zusätzliche Aufgliederung der Leguminosen zwischen Futterleguminosen-Gemengen und den Körnerleguminosen brachte kein anderes Ergebnis, die Kurve der Körnerleguminosen war zudem nicht signifikant (nicht dargestellt).

Eine ähnlich geringe Unterscheidung zwischen den durchschnittlichen Ertragsreaktionen der Fruchtarten konnte ebenfalls ermittelt werden, wenn eine Gruppen-

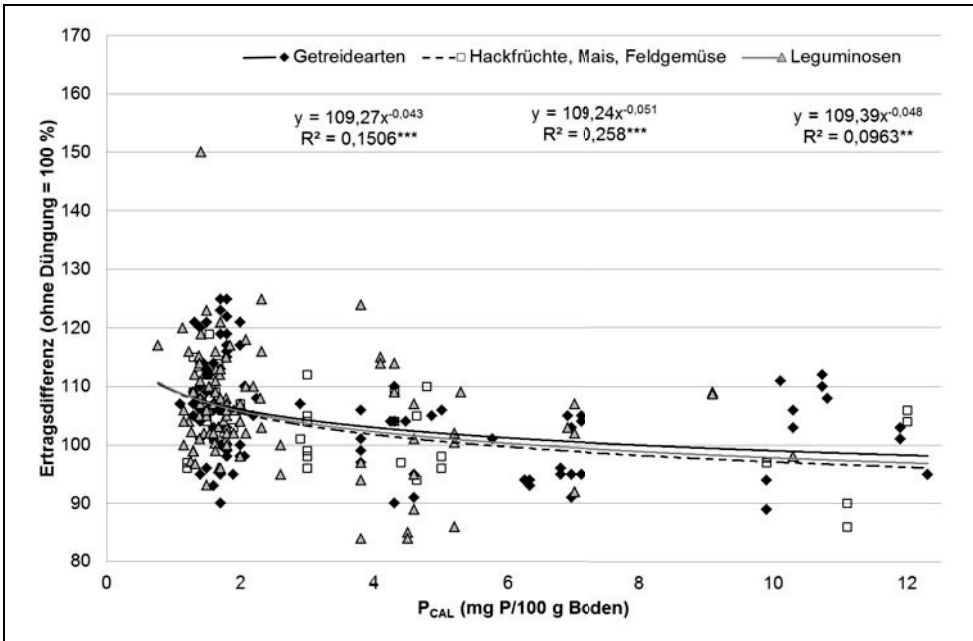


Abb. 2. Einfluss der P-Versorgung des Bodens auf die relativen Ertragsdifferenzen von Fruchtartengruppen durch zusätzliche mineralische P-Düngung im Vergleich zu keiner Düngung (= 100%)

bildung der Ergebnisse nach unterschiedlichen Bodenarten erfolgt ist (Abb. 3). Eine Differenzierung zwischen leichten bis mittleren Böden und den schweren Böden führte nur zu geringen Unterschieden in der Art, dass auf schweren Böden bei sehr niedriger P-Versorgung es im Durchschnitt zu tendenziell höheren relativen Ertragsdifferenzen kommen kann. Die Anzahl an Versuchsergebnissen auf leichten Böden (S-sL) war aber bei niedriger P-Versorgung zu gering, um eine sichere Aussage ableiten zu können.

Zwischen den ermittelten pH-Werten der Versuchsfelder und den P-Düngemitteln bestand eine Wechselwirkung. Während mit steigenden pH-Werten die auf Rohphosphaten basierten Düngemittel (n = 151, r = -0,125(*)) zu einer leicht abnehmenden Ertragswirkung führten, kam es bei

Verwendung der anderen P-Düngemittel (vor allem Thomasphosphat, Ulophos, n = 88, r = 0,502***) zu einer Zunahme der durchschnittlichen Ertragswirkung. Gegenüber den Standardvarianten waren besonders bei pH-Werten von über 7,0 diese geprüften Produkte durch eine Ertragsdifferenz von ca. +10% von Vorteil, dagegen waren die Rohphosphate nur noch durch eine geringe Wirkung von durchschnittlich + 2% gekennzeichnet.

Die erhaltenen Ertragsdifferenzen wurden darüber hinaus in Gruppen unterschiedlicher Bodengehaltsbereiche an löslichen Nährstoffen eingeteilt, in denen die Ergebnisse entsprechend ihrem Grad an Übereinstimmung zusammengefasst worden sind (Tab. 4). Entsprechend der P-Versorgung konnten auf diese Weise 4 Gruppen in Boxplots verrechnet werden, die in Anlehnung an

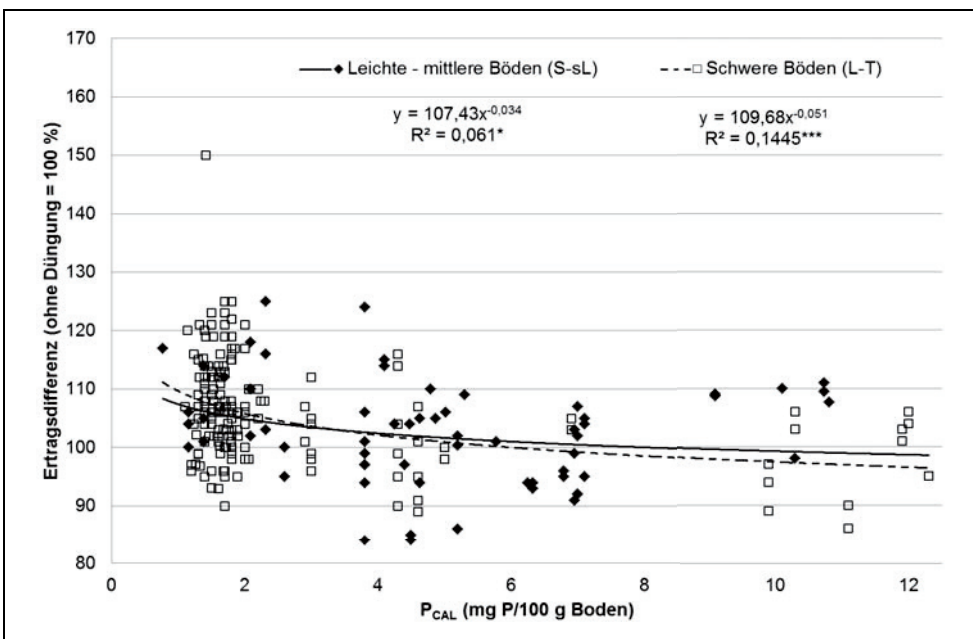


Abb. 3. Einfluss der P-Versorgung des Bodens und zusätzlicher mineralischer P-Düngung im Vergleich zu keiner Düngung (= 100%) auf die relativen Ertragsdifferenzen der Fruchtarten, gerundet auf leichten bis mittleren und auf schweren Böden

Tab. 4. Boxplot-Ergebnisse zum Einfluss der P-Düngung auf die relativen Ertragsdifferenzen (Standard = 100%) in Abhängigkeit von Gehaltsgruppen an löslichem Phosphor im Boden

	P-Gehaltsgruppen (mg/100 g Boden)				
	< 1,5	1,5–2,5	2,5–4,5	> 4,5	
Anzahl	43	119	31	57	
Mittelwert	108,5	107,3	102,6	99,3	
Standardfehler des Mittelwertes	1,47	0,69	1,50	0,96	
Median	107,0	106,0	101,0	100,0	
Standardabweichung	9,61	7,57	8,35	7,27	
Spannweite	55	35	40	27	
Minimum	95	90	84	84	
Maximum	150	125	124	111	
Perzentile					
	25	102	102	97	94
	50	107	106	101	100
	75	114	112	106	105

die Vorgehensweise des VDLUFA als Gehaltsklassen ausgewiesen worden sind.

Bei einer Versorgung mit weniger als 1,5 mg P/100 g Boden (Tab. 4) werden im Durchschnitt der Fruchtarten Mehrerträge von 9% im Vergleich zu keiner Düngung festgestellt (Median 7%), wenn eine zusätzliche P-Düngung zum Anbau verabreicht wird. In dieser Versorgungsgruppe mit 43 Versuchsvarianten werden die höchste Streuung und die größte Spannweite an Ertragswerten der gesamten P-Versuche erzielt. Diese Gruppe könnte mit der Versorgungsklasse A des VDLUFA-Systems gleichgesetzt werden.

Zwischen 1,5–2,5 mg P/100 g Boden schließt sich eine große Gruppe mit 119 Versuchsvarianten und etwas geringerer, aber immer noch deutlicher Ertragswirkung von durchschnittlich 7% (Median 6%) an. Die Spannweite und die Anzahl mit deutlich positiven Ertragsdifferenzen nehmen ab. Diese Gruppe kann der Klasse B gleichgesetzt werden. Daran anschließend kann bei weiter zunehmender Nährstoffversorgung zwischen 2,5–4,5 mg P/100 g Boden ein Versorgungsbereich ausgewiesen werden, in dem nach zusätzlicher P-Düngung nur noch geringe Mehrerträge von nicht ganz 3% (Median 1%) erzielt werden (Tab. 4). Diese Gruppe könnte einem Versorgungsbereich C entsprechend der VDLUFA-Klassifikation zugeschrieben werden.

Bei noch höherer Bodenversorgung mit CAL-löslichem Phosphat von über 4,5 mg P/100 g Boden werden im Durchschnitt dann keine Ertragsreaktionen mehr durch Zusatzdüngung ausgewiesen. In diesen Versuchen kommt es im Vergleich zu keiner Düngung (= 100%) zu einer mittleren Ertragsdifferenz von 99% und im Median zu einem Wert von genau 100%. Die 57 zusammengestellten Versuchsvarianten dieser Gruppe weisen eine Spannweite der Einzelwerte und eine Standardabweichung von etwas über 7% auf. In diesem Versorgungsbereich des

Bodens führt eine P-Düngung zu keiner zusätzlichen Ertragswirkung. Daher kann diese Gruppe den VDLUFA-Klassen D und E zugeordnet werden.

Kaliumversorgung

Die aus sieben Bundesländern Deutschlands stammenden Feldversuche mit mineralischen Kalium-Düngemitteln decken einen sehr weiten Standortbereich ab. Die verabreichten Kaliumdüngemittel des unteren Versorgungsbereichs wiesen eine Höhe von 38–80 kg K/ha/a auf. In Varianten mit hohen Düngungsmengen sind zwischen 140 kg bis über 500 kg K/ha/a verabreicht worden ($n = 201$, $MW = 156$ kg K/ha/a, $s = \pm 120$ kg K/ha/a). Die in den Feldversuchen angebauten Fruchtarten waren in der Regel Bestandteile typischer Fruchtfolgen aus praxisnahen Versuchsanstellungen. Zur N-Versorgung wurden Leguminosen angebaut und es wurden auch organische Düngemittel angewendet. Aus Tabelle 3 kann das durchschnittliche Ertragsniveau und die Streubreite der angebauten Fruchtarten der Standardvarianten entnommen werden. Die TM-Erträge waren, unter Beachtung der Standortbedingungen, in den P- und K-Steigerungsversuchen ähnlich hoch.

Dieses Ertragsniveau der Standardvarianten (= 100%) kann ebenfalls durch eine unterschiedlich hohe Kaliumdüngung verändert werden (Abb. 4). Auch bei den Ergebnissen der K-Versuche ist eine erhebliche Streuung der Einzelwerte zu erkennen. Der gesamte Versuchsansatz lässt einen hochsignifikanten nicht-linearen Gesamtzusammenhang zwischen den K-Bodengehalten und den Ertragsdifferenzen erkennen ($r = 0,327^{***}$).

Bei sehr niedriger Versorgung mit CAL-löslichem Kalium im Boden kommt es zu einer durchschnittlichen Erhöhung der Fruchtartenenerträge von ungefähr 10%. In Abhängigkeit von den Standort- und Umweltbedingungen können aber auch 40% höhere Erträge, in Einzelfällen auch noch deutlich höhere Ertragssteigerungen festgestellt werden (Abb. 4). Im Bereich bis ungefähr 8 mg K/100 g Boden werden tendenziell noch durchschnittliche positive Ertragsdifferenzen von 5% im Vergleich zu den Standardvarianten gefunden. Obwohl bei sehr hoher K-Versorgung zwischen ungefähr 10 mg und 30 mg K/100 g Bodenversorgung eine große Heterogenität der Streuung vorliegt, ist im Durchschnitt keine Ertragswirkung mehr erkennbar, wie aus dem Verlauf der Regressionskurve abgelesen werden kann.

Während bei den P-Versuchen keine unterschiedlichen Ertragsdifferenzen bei den Fruchtarten ermittelt werden konnten (Abb. 2), waren in den K-Versuchen z.T. deutliche Wirkungen zu verzeichnen (Abb. 5). Die Unterschiede traten jedoch nur bei relativ niedriger Bodenversorgung mit Kalium auf. Während die untersuchten Getreidearten nur eine geringe durchschnittliche Ertragswirkung zeigten, waren bei den Ackerfutterarten und den Hackfrüchten 10–20% und bei den Körnerleguminosen durchschnittliche positive Werte von 20–30% Ertragsdifferenzen vorzufinden.

Eine ähnliche differenzierende Wirkung war in den Versuchen zu ermitteln, wenn die Einzelwerte entsprechend

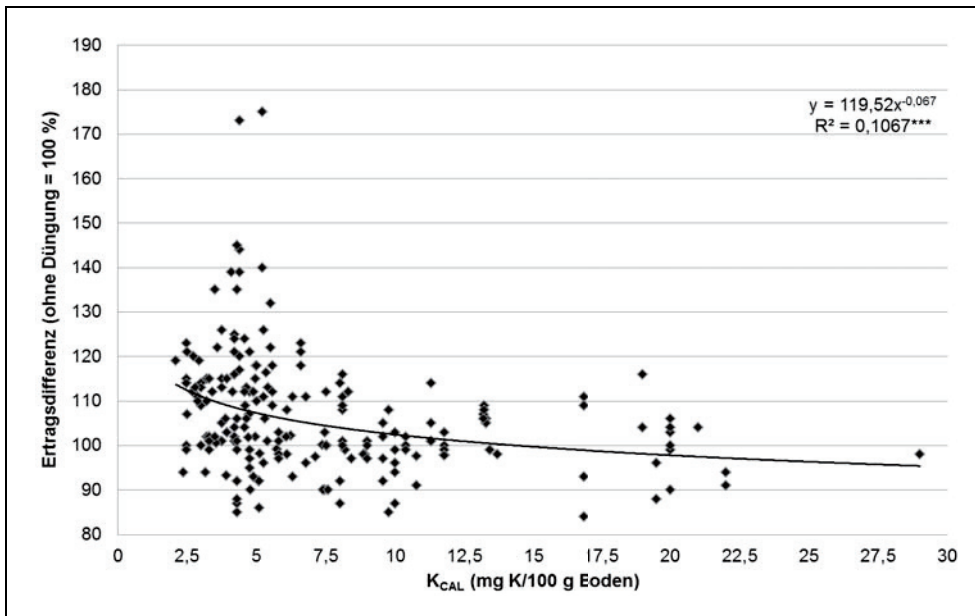


Abb. 4. Einfluss der Versorgung mit löslichem Kalium des Bodens auf die relative Ertragsdifferenz an Fruchtarten durch zusätzliche mineralische K-Düngung im Vergleich zu keiner Düngung (= 100%)

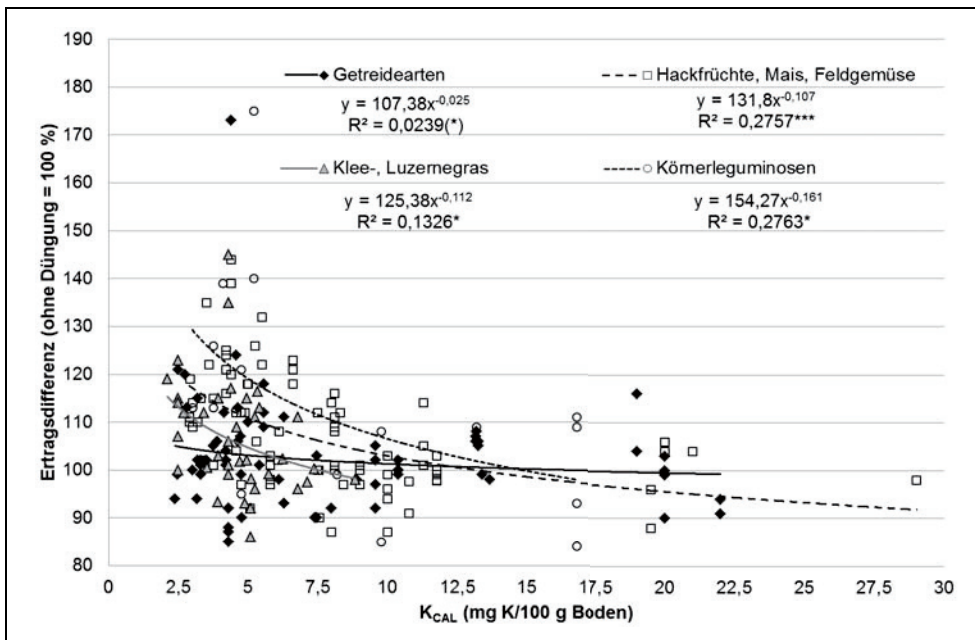


Abb. 5. Einfluss der Versorgung mit löslichem Kalium des Bodens auf die relativen Ertragsdifferenzen verschiedener Fruchtarten-Gruppen durch zusätzliche mineralische K-Düngung im Vergleich zu keiner Düngung (= 100%)

den unterschiedlichen Bodenarten gruppiert worden sind (Abb. 6). Während auf leichten bis mittleren Böden (S-sL) durch sehr geringe K-Versorgung des Bodens kaum Ertragswirkungen durch eine zusätzliche mineralische K-Düngung aufgetreten sind, konnten z.T. deutliche Ertragsdifferenzen auf schweren Böden (L-T) ermittelt werden. Eine separate Ausweisung der mittleren Böden brachte in der Tendenz ebenfalls einen durchschnittlichen mittleren Ertragsanstieg von bis zu 10% und die Datensätze der leichten Böden von 0–5%, doch waren beide Regressionen nicht signifikant (ohne Darstellung).

Auch die ermittelten Ertragsdifferenzen der K-Versuche können an Hand der CAL-löslichen Bodengehalte in Gruppen unterschiedlicher Ertragswirkung eingeteilt (Tab. 5) und zur besseren Handhabung in der landwirt-

schaftlichen Praxis entsprechend der VDLUFA-Klassifizierung gekennzeichnet werden. Bei einer K-Versorgung von unter 4,5 mg K/100 g Boden liegt hiernach ein Bereich mit deutlicher Unterversorgung vor, da durch eine mineralische K-Zufuhr Mehrerträge im Durchschnitt der Fruchtarten von 12% erzielt werden. In diesem Versorgungsbereich, in dem die Ergebnisse aus 66 Versuchsvarianten eingegangen sind, werden mit fast 16% die höchste Streuung der Ertragswerte und eine extrem hohe Spannweite der Ergebnisse erzielt. Die Abnahme der Anzahl negativer Ertragsreaktionen ist jedoch nur schwach ausgeprägt. Diese Gruppe kann somit mit der VDLUFA-Klasse A gleichgesetzt werden.

In der mit etwas höherer Versorgung anschließenden Gruppe von 4,5–6,5 mg K/100 g Boden können im Ver-

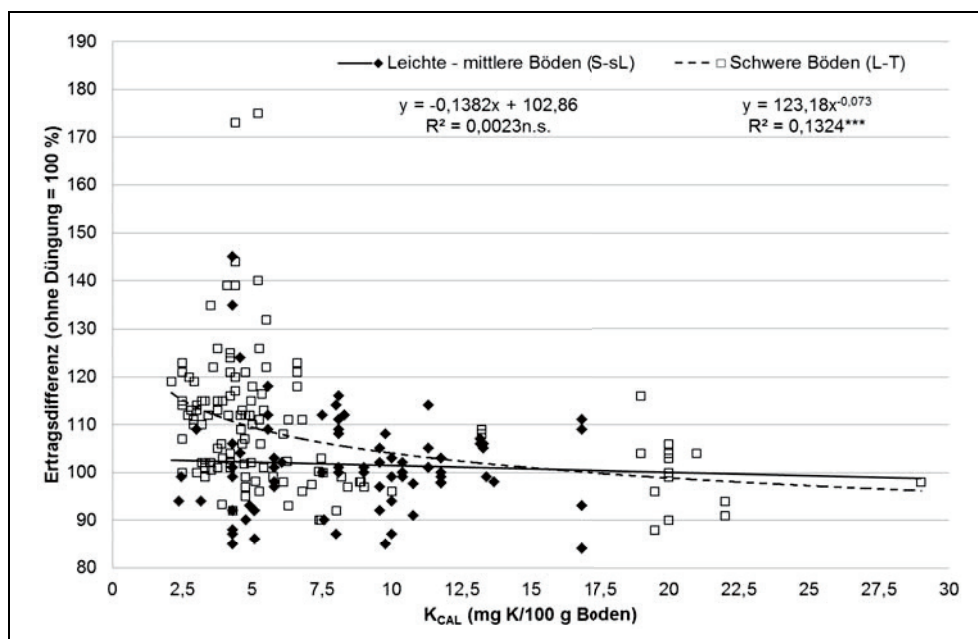


Abb. 6. Einfluss der K-Versorgung des Bodens und zusätzlicher mineralischer K-Düngung im Vergleich zu keiner Düngung (= 100%) auf die relativen Ertragsdifferenzen der Fruchtarten, gerundet auf leichten bis mittleren und auf schweren Böden

gleich zu keiner Düngung noch sehr hohe Ertragsdifferenzen auftreten. Die Streuung der Einzelwerte hat mit fast 15% jedoch bereits abgenommen. In dieser Gruppe mit 50 Varianten wird immerhin noch eine durchschnittliche positive Ertragsdifferenz von 8% (Median 7%) berechnet. Dieser Versorgungsbereich kann entsprechend Versorgungsklasse B zugeordnet werden.

In der anschließenden Gruppe von 6,5–10 mg K/100 g an CAL-löslicher Bodenversorgung wird durch eine zusätzliche mineralische K-Düngung nur noch ein tendenzieller Ertragsanstieg von 2% (Mittelwert) und 0% (Median) im Vergleich zu keiner Düngung ermittelt. Die Standardabweichung und die Spannweite der Versuchsergebnisse haben in dieser Gruppe mit 38 Varianten bereits deutlich abgenommen, wodurch es zu einer entsprechenden Zunahme der Ertragssicherheit kommt. Daher können die Ergebnisse dieser Gruppe einer VDLUFA-Versorgungsklasse C zugeordnet werden.

Bei noch höherer Versorgung als 10 mg K/100 g Boden kommt es durch zusätzliche K-Düngung zu keinen messbaren Ertragseffekten mehr (insgesamt 47 Versuchsvarianten). Die Versuchsstreuung pendelt sich auf Werte von etwas unter 7% und einer Spannweite der Ertragsdifferenzen von 32% ein und ist damit vergleichbar mit der Streuung in den untersuchten P-Feldversuchen (Tab. 4 und Tab. 5). Die erlangten Ergebnisse dieser Gruppe können somit den Versorgungsklassen D und E des VDLUFA-Systems zugeordnet werden, in denen durch zusätzliche Düngungsmaßnahmen keine Ertragseffekte mehr erzielt werden können.

Diskussion

Die Auswertung einzelner Feldversuche zur Grunddüngung hat auch unter den Bedingungen des Ökolandbaus

Tab. 5. Boxplot-Ergebnisse zum Einfluss der K-Düngung auf die Ertragsdifferenzen (Standard = 100%) in Abhängigkeit von den löslichen Bodengehalten an Kalium

	K-Gehaltsgruppen (mg/100 g Boden)			
	< 4,5	4,5–6,5	6,5–10,0	> 10,0
Anzahl	66	50	38	47
Mittelwert	111,7	108,3	102,4	100,5
Standardfehler des Mittelwertes	1,90	2,09	1,54	0,99
Median	111,5	106,5	100,1	100,0
Standardabweichung	15,45	14,75	9,48	6,80
Spannweite	88	89	38	32
Minimum	85	86	85	84
Maximum	173	175	123	116
Perzentile				
25	101,0	98,2	97,0	97,6
50	111,5	106,5	100,1	100,0
75	119,3	113,5	111,0	105,0

gezeigt, dass zwar ein Anstieg der löslichen Anteile und auch der Gesamtgehalte im Boden mit den gedüngten Nährstoffen in der Regel gelingt. Zwischen den Bodengehalten und den Erträgen der Fruchtarten wird aber oft keine eindeutige oder einfache signifikante Differenzierung der Versuchsvarianten erlangt (PETZOLDT, 2015; FARACK et al., 2019). Es stellte sich oft heraus, dass die gefundenen Differenzen in den Erträgen mit und ohne Düngung verhältnismäßig klein waren.

Bei sehr niedriger P- und K-Versorgung wurden auf diese Weise mittlere Ertragswirkungen von 9% in den P- und von 12% in den K-Versuchen und eine sehr hohe Streubreite der Werte ermittelt. In den z.B. von KÖSTER und SCHACHTSCHABEL (1983), BAUMGÄRTEL (1988),

KERSCHBERGER und SCHRÖTER (1998) und KUCHENBUCH und BUCZKO (2011) zusammengefassten konventionellen Versuchen mit einer vergleichsweise hohen Anzahl an Varianten waren es z.T. deutlich höhere Werte. In Versuchen mit geringerer Variantenanzahl wurden dagegen oft vergleichbare Mehrerträge im P- und K-Mangelbereich gefunden (KÖHNLEIN und KNAUER, 1965; GRAß, 1988; JUNGK, 1993; JUNGK et al., 1993; HEGE und OFFENBERGER, 1996, 1998; FRÜCHTENICHT und STEFFENS, 1996; FISCHER und APEL, 1998).

In den eigenen und den zitierten Versuchsergebnissen ist in diesem sehr niedrigen Versorgungsbereich die Wahrscheinlichkeit deutlich erhöht, dass im Durchschnitt vieler Varianten bzw. Anbaujahre bei Unterlassung einer Düngung mit den jeweiligen Nährstoffen die Ertragsausfälle z. T. stark ansteigen können. Auf Grund der hohen Streubreite der registrierten Ertragswerte kann angenommen werden, dass je nach den konkreten Standort- und Wetterbedingungen nur in diesem unzureichenden Versorgungsbereich die für die Pflanzen vorzufindenden Ernährungsbedingungen sehr große Unterschiede aufweisen. An Hand von detaillierten statistischen Auswertungen von Dauerversuchen konnten KOLBE und KÖHLER (2008) und KUCHENBUCH und BUCZKO (2011) einige verantwortliche Faktoren für diese Zusammenhänge etwas deutlicher aufdecken (SCHACHTSCHABEL, 1963; NIEDERBUDE, 1985, 1987).

Unter den Verhältnissen der praktischen Landwirtschaft sind einige wichtige Einflussfaktoren, wie z.B. die zu erwartenden Wetterverhältnisse, weitgehend unbekannt oder es kann keine rechtzeitige Reaktion erfolgen, so dass eine Berücksichtigung bei der Düngungsbemessung kaum möglich erscheint. Im ökologischen Landbau wird zudem bei der Grunddüngung nicht die einzelne anzubauende Fruchtart direkt gedüngt, wie es im konventionellen Landbau heute üblich ist. Die Düngungsbemessung sollte vielmehr im Durchschnitt mehrerer Fruchtarten, am besten im Rahmen der Fruchtfolge verabreicht werden (KOLBE und KÖHLER, 2008). Da im Durchschnitt im ausgewiesenen P- und K-Mangelbereich mit deutlichen Ertragsausfällen zu rechnen ist wenn eine entsprechende Düngung unterbleibt, ist die festgestellte hohe Streubreite der Ertragsdifferenzen im Mangelbereich bei diesem Anbausystem von untergeordneter Bedeutung.

Ziel des Nährstoffmanagements ist es, eine Bodenversorgung mit Nährstoffen zu erreichen, die ein möglichst ungestörtes Pflanzenwachstum gewährleisten kann. Diese ausreichenden Gehalte führen in der Regel noch zu geringen Ertragserlösen bei entsprechender zusätzlicher Düngung, liegen daher nicht auf einem Niveau, bei dem keine Ertragseffekte mehr festzustellen sind (maximales Ertragsniveau). Entsprechend dem Gesetz vom abnehmenden Ertragszuwachs wird daher ein optimales Ertragsniveau an Fruchtarten angestrebt (Versorgungsklasse C).

Aus diesen Versuchsergebnissen tritt der abnehmende Ertragszuwachs deutlich hervor, wenn z.B. die Y-Achsen mit den Ertragsdifferenzen der Abbildungen 1 und 4 spiegelbildlich dargestellt werden. Es können dann die unterschiedlichen Ertragsbereiche in Folge der Boden-

versorgung im Ökolandbau und auch nach entsprechender Datenaufbereitung in konventionellen Anbausystemen relativ eindeutig veranschaulicht werden (MUNK und BÄRMANN, 1977, 1978; MUNK, 1988; KERSCHBERGER und SCHRÖTER, 1998; MUNK et al., 2005).

Nach VDLUFA-Vorgaben liegt das optimale Versorgungsniveau unter konventionellen Bedingungen für Phosphor bisher im Bereich zwischen 4,5 mg/100 g und 9,0 mg P/100 g (KERSCHBERGER et al., 1997) bzw. zwischen 3,1 mg/100 g und 6,0 mg P/100 g Boden (WIESLER et al., 2018) und für Kalium auf mittleren Böden zwischen 8,0 mg/100 g und 17,0 mg K/100 g Boden (KERSCHBERGER und HEGE, 1998; BAUMGÄRTEL et al., 1999). In den hier vorgestellten Versuchen des ökologischen Landbaus können diese optimalen Versorgungsbereiche jedoch in etwa mit Werten zwischen 2,5–4,5 mg P/100 g und 6,5–10,0 mg K/100 g Boden umschrieben werden. Detaillierte Vergleichsauswertungen dieser graphischen Darstellungen unter konventionellen und ökologischen Anbaubedingungen der hier präsentierten Ergebnisse lassen daher deutlich erkennen, dass die Bodengehalte zur Erlangung optimaler Erträge sowie die daraus abgeleiteten Nährstoffklassen auf z.T. deutlich unterschiedlichen Versorgungsbereichen liegen.

Entgegen diesen Unterschieden zwischen den beiden Landbausystemen, liegt die Streuung der Ertragswerte in hohen Nährstoffversorgungsbereichen, in denen keine Ertragseffekte durch zusätzliche Düngung mehr festgestellt werden, auf sehr ähnlichem Niveau. So können in den eigenen Versuchen Werte in der Spannweite der Ertragsdifferenzen um 30% (P = 27%, K = 32%, Tab. 4 und Tab. 5) und in der Standardabweichung von ungefähr 7% ermittelt werden. Unter Beachtung des höheren Ertragsniveaus können in den zusammengefassten Versuchen von KUCHENBUCH und BUCZKO (2011) und anderen Arbeiten im hohen Versorgungsbereich Spannweiten für Ergebnisse aus P-Versuchen um 15 – 25% und für K-Versuche um 20 – 30% abgelesen werden (KÖSTER und SCHACHTSCHABEL, 1983; BAUMGÄRTEL, 1988; JUNGK, 1993; FRÜCHTENICHT und STEFFENS, 1996; FISCHER und APEL, 1998; HEGE und OFFENBERGER, 1998). Diese dokumentierten Werte können somit der gewöhnlich vorzufindenden Versuchsstreuung gleichgesetzt werden.

Auch die Abnahme des Umfangs negativer Ertragsdifferenzen im Bereich einer sehr niedrigen Nährstoffversorgung, wie sie besonders bei den P-Versuchen in Erscheinung traten, können durch Versuchsergebnisse aus dem konventionellen Landbau bestätigt werden (GRAß, 1988; FRÜCHTENICHT und STEFFENS, 1996; FISCHER und APEL, 1998; KUCHENBUCH und BUCZKO, 2011).

In den zusammengefassten P-Versuchen wurden keine deutlichen Zusammenhänge zwischen der zugrundeliegenden Bodenversorgung und den Ertragsdifferenzen ermittelt, die auf den Einfluss unterschiedlicher Bodenarten oder Fruchtarten zurückgeführt werden konnten. In den Auswertungen eines ökologischen Dauerversuches von FARACK et al. (2019) konnten lediglich geringe Tendenzen einer unterschiedlichen Wirkung bestimmter Pflanzenarten ermittelt werden.

Diesen Ergebnissen stehen die Analysen von RÖMER und LEHNE (2004) entgegen, die in Gefäßversuchen bei niedrigen P-Gehalten des Bodens nach P-Düngung deutliche Ertragseffekte z.B. bei Futterleguminosen nachgewiesen haben. Diese Ergebnisse können somit durch die vielen Versuchsvarianten der vorliegenden Feldversuche unter dem Einfluss des praktischen ökologischen Landbaus eindeutig nicht bestätigt werden. Auch aus konventionellen Versuchen traten kaum Wechselwirkungen zwischen der Bodenart oder den Fruchtarten und der P-Bodenversorgung auf die Ertragsdifferenzen in Erscheinung (SCHWERDT und JESSEN, 1961; SCHACHTSCHABEL, 1963; SCHACHTSCHABEL und KÖSTER, 1985; WENDT, 1991; BAUMGÄRTEL, 1996).

Hingegen diesen Untersuchungen führten die hier präzentierten Auswertungen zu den ökologischen K-Versuchen zu deutlichen Abhängigkeiten der Versuchsergebnisse sowohl von den zugrundeliegenden Bodenarten als auch von den untersuchten Pflanzenarten. Die Ergebnisse aus dem K-Steigerungsversuchen von FARACK et al. (2019) weisen in die gleiche Richtung. Während bei niedrigen K-Gehalten des Bodens bei den Getreidearten nur geringe Ertragseffekte gemessen worden sind, wurden bei Kartoffeln und Ackerbohnen deutliche Ertragsunterschiede nach zusätzlicher K-Düngung ermittelt. Auch Versuchsauswertungen des konventionellen Landbaus kamen zu ähnlichen Erkenntnissen (KUHLMANN und WEHRMANN, 1984; SCHACHTSCHABEL, 1985; BAUMGÄRTEL, 1998).

Aus den zusammengestellten Daten geht weiterhin hervor, dass es bei den ökologischen Versuchsbedingungen bei niedriger CAL-löslicher K-Versorgung des Bodens auf den leichten Böden zu einer geringeren Ertragswirkung kommt als bei einem Anbau auf den schwereren Böden. Hieraus kann die Folgerung bestätigt werden, dass mit steigender Textur z.B. im Tongehalt des Bodens eine jeweils höhere Versorgung mit Kalium vorzusehen ist, und dass auch der Bereich einer optimalen Versorgung bei jeweils höheren Kaliumwerten im Boden anzusiedeln ist. Hierzu lassen sich aus der experimentellen Arbeit unter den konventionellen Bedingungen ebenfalls einige Arbeiten nennen, aus denen diese Zusammenhänge herausgearbeitet werden konnten (SCHACHTSCHABEL, 1963; VON BRAUNSCHWEIG, 1980; FRÜCHTENICHT, 1993; KOLBE und KÖHLER, 2008) und Eingang gefunden haben in die VDLUFA-Beschreibungen zur K-Düngung (BAUMGÄRTEL et al., 1999).

Schlussfolgerungen

Im ökologischen Landbau ist es eine bedeutende Zielstellung, über die Schaffung günstiger Bedingungen in den physikalischen und biologischen Aspekten der Bodenfruchtbarkeit (AID, 2015) und einer geringen Nährstoffzufuhr von außen auch mit vergleichsweise niedrigen Nährstoffkonzentrationen bzw. Nährstoffzufuhren über den Boden ein verhältnismäßig hohes Ertragsniveau bei möglichst geschlossenen Nährstoffkreisläufen zu erwirt-

schaften. Hierauf beruhen auch einige überaus positive Einflüsse auf den Umwelt- und Naturschutz dieser Wirtschaftsweise (KOLBE, 2000; OBERSON et al., 2000; WATSON et al., 2002; LOES, 2003; CORNISH und OBERSON, 2008; FRIEDEL, 2008).

Aus der Überprüfung des Nährstoffmanagements vieler Betriebe aus Deutschland und angrenzenden Ländern geht jedoch auch hervor, dass auf Grund langjährig z.T. deutlich negativer Nährstoffsalden es zu einer stetigen Abnahme der Gehalte wichtiger Grundnährstoffe im Boden gekommen ist (SCHULTE und SCHRÖDER, 1996; KOLBE, 2015; COOPER et al., 2018). Aus den hier zusammengeführten Versuchsergebnissen aus dem ökologischen Landbau geht eindeutig hervor, dass die Wahrscheinlichkeit von Ertragsschwankungen und Ertragsausfällen im Ökolandbau zunehmen, wenn bestimmte Konzentrationen an verfügbaren Nährstoffen in den Ackerschlägen unterschritten werden. Diese kritischen Gehalte, die eine Unter- oder sogar Mangelversorgung kennzeichnen, werden beim Phosphat durch Unterschreitung der Werte von 2,5 mg P/100 g und beim Kalium je nach Bodenart bei Werten unterhalb von 6–7 mg K/100 g eines mittelschweren Bodens erreicht.

Die Abnahme der Nährstoffversorgung weist daher auch im ökologischen Landbau Grenzen auf, die durch das Gesetz vom Minimum umschrieben werden, wodurch eine Kompensation von fehlenden einzelnen Nährstoffen durch verbesserte alternative pflanzenbauliche Maßnahmen gar nicht oder nur in geringem Umfang möglich ist. Damit in Zukunft nicht einzelne Nährstoffe ins Minimum gelangen, wodurch die Gefahr von Ertragsausfällen weiter zunehmen und es zu einer Abnahme der Nährstoffeffizienz kommen würde, ist somit ein aktives Nährstoffmanagement auf jeder Acker- und Grünlandfläche auf den Betrieben des ökologischen Landbaus erforderlich.

Aus den Versuchsauswertungen geht hervor, dass auf Grund der insgesamt geringeren Nährstoffzufuhr an Hauptwachstumsfaktoren (in der Regel Stickstoff) und dem damit zusammenhängenden geringeren Ertragsniveau es für den Ökolandbau vorteilhaft ist, ein eigenes Versuchswesen zum Nährstoffmanagement zu etablieren. Die bereits bestehenden Systeme zum Nährstoffmanagement der ökologischen landwirtschaftlichen Praxis sind durch ein ständiges Versuchswesen zu überprüfen und ggf. zu verbessern und sollten auf den Betrieben auf Basis der Schlagkarteiaufzeichnung auf periodisch durchzuführender Bodenuntersuchung, Nährstoffbilanzierung und Düngungsbemessung mit den erlaubten mineralischen und organischen Düngemitteln beruhen.

Für die Einordnung der gefundenen Bodenuntersuchungsergebnisse ist in der praktischen Durchführung ein Bewertungssystem erforderlich, dass an dem bekannten und bewährten fünfstufigen System des VDLUFA ausgerichtet werden sollte. Aus den präsentierten Ergebnissen können hierzu experimentell unterlegte Vorschläge zu beiden Nährstoffen unterbreitet werden. Für das CAL-lösliche Phosphat sollten die Versorgungs-

klassen in etwa folgende Bereiche umfassen (mg P/100 g Boden):

- A < 1,5
- B 1,5 – 2,5
- C 2,5 – 4,5
- D-E > 4,5.

Bisher wurde für den Ökolandbau der Versorgungsbereich der Klasse B des konventionellen Landbaus zwischen 2,1–4,4 mg P/100 g als optimaler Bereich für den Ökolandbau beziffert (KOLBE und KÖHLER, 2008). Für den konventionellen Landbau lag die optimale Klasse C zwischen 4,5–9,0 mg P/100 g Boden (KERSCHBERGER et al., 1997; KOLBE et al., 2015). Damit ist der optimale Bereich der neuen C-Klasse im Ökolandbau in etwa identisch mit der alten B-Klasse.

Neue Vorschläge des VDLUFA für die P-Versorgungsklassen weisen im konventionellen Landbau einen optimalen C-Bereich von 3,1–6,0 mg P/100 g Boden auf (HEGE und OFFENBERGER, 2001, 2008; RÖMER et al., 2005; WIESLER et al., 2018). Entgegen den bisher gültigen Werten von KERSCHBERGER et al. (1997) ist eine deutliche Herabsetzung der Werte festzustellen. Damit bewegen sich die als optimal angesehenen P-Gehalte im konventionellen Landbau auf die jetzt vorgeschlagenen Werte im ökologischen Anbaubereich zu. Sie weisen aber immer noch einen höheren Versorgungsbereich auf, eine zusammenfassende experimentelle Absicherung dieser konventionellen Werte steht jedoch noch aus.

Auf Grund der erlangten Ergebnisse könnten die Versorgungsklassen für das CAL-lösliche Kalium auf den mittleren (bis schweren) (IS-L) Böden folgendermaßen formuliert werden (mg K/100 g Boden):

- A < 4,5
- B 4,5 – 6,5
- C 6,5 – 10,0
- D-E > 10,0.

In der Praxis und Beratung des Ökolandbaus wurden bisher ausreichende Bereiche an Kalium zwischen 6,5–8,5 mg K/100 g Boden angenommen. Aus ersten experimentellen Ableitungen wurden Versorgungsbereiche abgeleitet, die der bisherigen Klasse B des konventionellen Systems entsprechen (KOLBE und KÖHLER, 2008; KOLBE et al., 2015). Im Vergleich zu diesen gebräuchlichen Werten gibt es ebenfalls eine relativ hohe Übereinstimmung zu dem jetzt vorgeschlagenen Versorgungsbereich der Klasse C von 6,5–10 mg K/100 g Boden. Es kann angenommen werden, dass bei einer neuen Justierung der konventionellen Bewertungsklassen ebenfalls mit einer Herabsetzung des optimalen Versorgungsbereichs der Klasse C zu rechnen ist (HEGE und OFFENBERGER, 2001; RÖMER et al., 2005; HEGE et al., 2008; KUCHENBUCH und BUCZKO, 2011).

Im Ökolandbau steht die Fruchtfolgedüngung im Vordergrund einer praktischen Anwendung. Die Grunddüngung sollte hierbei, wie z.B. beim Kalium aufgeführt, zu den benötigten Fruchtarten (Leguminosen, Hackfrüchte,

Feldgemüse) bevorzugt verabreicht werden. Darüber hinaus hat sich allgemein bei der praktischen Umsetzung gezeigt, dass eine Düngungsbemessung auf Basis des Nährstoffentzuges von Fehlern behaftet ist, wenn verhältnismäßig geringe Fruchtartenenerträge vorliegen. Für eine genauere Berechnung der Düngermengen zur Erreichung und Sicherung der Nährstoffzielgehalte des Bodens haben sich daher im Ökolandbau mathematische Methoden bewährt, die auf experimentell begründeten Relationen zwischen den Salden und den Bodenänderungen der Nährstoffe beruhen, wobei Eigenschaften der Nachlieferung und Festlegung berücksichtigt werden (KOLBE und KÖHLER, 2008; KOLBE, 2010).

Danksagung

Diese Arbeit ist entstanden unter der Mitwirkung des AK Ökolandbau der Länder- und weiteren Forschungseinrichtungen in Deutschland (siehe Tab. 1 und Tab. 2).

Literatur


- AID, 2015: Gute fachliche Praxis – Bodenfruchtbarkeit. Infodienst Ernährung, Landwirtschaft, Verbraucherschutz (AID), Bonn.
- ANONYM, 2007: Verordnung (EG) Nr. 834/2007 des Rates über die ökologische/biologische Produktion und Kennzeichnung von ökologischen/biologischen Erzeugnissen und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 2092/91. Amtsblatt der Europäischen Union L189 vom 20.07.2007, 1-23.
- BAUMGÄRTEL, G., 1988: Beurteilung der Phosphatversorgung von Lössböden in Südniederrhein durch Düngungsversuche, Boden- und Pflanzenanalysen. Dissertation, Univ., Hannover.
- BAUMGÄRTEL, G., 1996: Ergebnisse langjähriger statischer Phosphatdüngungsversuche auf ackerbaulich genutzten Flächen. VDLUFA-Schriftenreihe 42, 94-109.
- BAUMGÄRTEL, G., 1998: Ergebnisse langjähriger statischer Kaliumdüngungsversuche auf ackerbaulich genutzten Flächen im Gebiet der Landwirtschaftskammer Hannover. In: Ergebnisse langjähriger, ortsfester Kalidüngungsversuche auf Acker- und Grünland. VDLUFA-Schriftenreihe 47, 19-31.
- BAUMGÄRTEL, G., K. FRÜCHTENICHT, U. HEGE, J. HEYN, K. ORLOVIUS, 1999: Kalium-Düngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf – Richtwerte für die Gehaltsklasse C. VDLUFA-Standpunkt, Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA), Darmstadt. [online: https://www.vdlufa.de/Dokumente/Veroeffentlichungen/Standpunkte/1998_Standpunkt_K-Duengung.pdf]. Stand 01.09. 2018.
- BELKNER, Chr., 2017: Dauerversuch Grunddüngung im ÖLB 2012 – 2013. Landesamt f. Ländl. Entwicklung, Landwirtschaft u. Flurneuordnung, Güterfelde. 7 Dateien, Schriftl. Mitteilung.
- BERGMANN, W., 1990: Die Ermittlung der Nährstoff- und Düngerbedürftigkeit von Böden und Pflanzen aus historischer Sicht. Institut f. Pflanzenernährung u. Ökotoxikologie, Jena.
- BUCHER, R., Th. DIETZ, E. BICHLER, 1981: Ergebnisse zweier langjähriger Kalidüngungsversuche im nordbayerischen Lössgebiet. Landw. Forsch. SH 38, 162-177.
- BRAUNSCHWEIG, L.-C. von, 1980: Optimale Kali-Versorgung mittlerer und schwerer Böden. Kali-Briefe 15, 63-75.
- COOPER, J., E.Y. REED, S. HÖRTENHUBER, T. LINDENTHAL, A.-K. LOES, P. MÄDER, J. MAGID, A. OBERSON, H. KOLBE, K. MÖLLER, 2018: Phosphorus availability on many organically managed farms in Europe. Nutr. Cycl. Agroecosyst. 110, 227-239.
- CORNISH, P.S., A. OBERSON, 2008: New approaches to phosphorus regulation and management. IFOAM Organic World Congress 16. [online: <http://orgprints.org/12830/>]. Stand 01.09. 2018.
- DITTMANN, B., 2010: Dauerversuch Grunddüngung im ÖLB. Landesamt f. Ländl. Entwicklung, Landwirtschaft u. Flurneuordnung, Güterfelde, 8 Seiten. Schriftl. Mitteilung.
- DITTMANN, B., 2011: Dauerversuch Grunddüngung im ÖLB 2011. Landesamt f. Ländl. Entwicklung, Landwirtschaft u. Flurneuordnung, Güterfelde, 5 Seiten. Schriftl. Mitteilung.

- DIETMANN, B., 2012: Dauerversuch Grunddüngung im ÖLB 2012. Landesamt f. Ländl. Entwicklung, Landwirtschaft u. Flurneuordnung, Güterfelde, 4 Seiten. Schriftl. Mitteilung.
- EGNER, H., H. RIEHM, 1955: Die Doppellactatmethode. In: THUN, R., R. HERMANN, E. KNICKMANN: Methodenbuch I. Neumann Verlag, Berlin.
- EMMERLING, Chr., 1999: Phosphorversorgung und -nachlieferung in langjährig ökologisch bewirtschafteten Böden und Schlussfolgerungen für den Praxisbetrieb. In: R. EINSIEDEL: Fortbildungskurs XIX, Boden – Pflanze – Tier – Vermarktung. Schriftliche Kurzfassung der Beiträge 1999, Sächsische Interessengemeinschaft Ökologischer Landbau (SIGÖL), Kossa, 58-75.
- EMMERLING, Chr., 2005: Aspekte der Phosphatversorgung ökologisch bewirtschafteter Böden. FB VI, Bodenkunde, Universität, Trier, 30 Seiten, schriftl. Mitteilung.
- FARACK, K., P. MÜLLER, W. SCHLIEPHAKE, H. KOLBE, 2019: Einfluss steigender organischer sowie mineralischer P- und K-Düngung auf Merkmale der Bodenfruchtbarkeit, Ertrag und Qualität der Fruchtarten in einem ökologischen Dauerversuch auf Lehmboden. Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden, 1-114.
- FINGER, O., 1965: Mehrjährige und einjährige Düngungsversuche mit gesteigerten Gaben an Phosphorsäure und Kali zur Nachprüfung der Grenzwerte bei der chemischen Bodenuntersuchung. Landw. Forsch. **18**, 1-36.
- FINGER, O., 1966: Mehrjährige und einjährige Düngungsversuche mit gesteigerten Gaben an Phosphorsäure und Kali zur Nachprüfung der Grenzwerte bei der chemischen Bodenuntersuchung. 2. Mitteilung. Landw. Forsch. **19**, 86-93.
- FISCHER, D. von, B. APEL, 1998: Kaliumbedarfsprüfungen auf Acker- und Grünland. In: Ergebnisse langjähriger, ortsfester Kalidüngungsversuche auf Acker- und Grünland. VDLUFA-Schriftenreihe **47**, 33-48.
- FISCHINGER, S.A., K. BECKER, A. RIFFEL, G. LEITHOLD, 2013: Effekte einer Schwefel- und Phosphor-Düngung auf Futterleguminosen auf einem Schwefel- und Phosphormangelstandort. Beiträge zur 12. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Verlag Dr. Köster, Berlin, 62-63.
- FRIEDEL, J.K., 2008: Aktive Nährstoffmobilisierung und ihre Bedeutung für die Düngungspraxis im Biologischen Landbau. Umweltökologisches Symposium, Lehr- u. Forschungszentrum f. Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, Irnding, Österreich, 35-39.
- FRÜCHTENICHT, K., 1993: Wechselwirkungen zwischen der K-Düngergabe, dem K-Gehalt im Boden und der ökonomisch optimalen K-Gabe bei Löss- und Marschböden. *Agricult. Res.* **46**, 295-308.
- FRÜCHTENICHT, K., G. STEFFENS, 1996: Ergebnisse von P-Düngungsversuchen in Weser-Ems. In: Ergebnisse langjähriger, ortsfester Phosphatdüngungsversuche auf Ackerland und Grünland. VDLUFA-Schriftenreihe **42**, 80-93.
- GRAß, K., 1979: Bodenuntersuchung und Düngungswirkung auf Grund von Feldversuchen. Landw. Forsch. **27**, SH 2, 146-158.
- GRAß, K., 1988: Bedeutung der Bodenuntersuchung für die praktische Phosphat- und Kalidüngerempfehlung. In: Versorgung der Böden mit Phosphat und Kali als Basis der Ertragsfähigkeit – Gelten noch die herkömmlichen Rezepte? Bundesarbeitskreis Düngung, Kassel, 42-53.
- GRUBER, H., 2010: Bei guter Bodenversorgung lohnt eine mineralische Kaliumdüngung zu Kartoffeln häufig nicht. Bericht, Landesforschungsanstalt f. Landwirtschaft u. Fischerei, Institut f. Acker- u. Pflanzenbau, Gülzow.
- GRUBER, H., A. TITZE, 2008: Einfluss einer Kainit-Düngung auf Unkrautflora und Ertragsbildung bei Sommerweizen im ökologischen Landbau. Abschlussbericht, Forschungs-Nr. 04/14. Landesforschungsanstalt f. Landwirtschaft u. Fischerei, Institut f. Acker- u. Pflanzenbau, Gülzow.
- GRUBER, H., A. TITZE, 2010a: Einfluss anbautechnischer Maßnahmen auf Ertrag und Qualität von Speisekartoffeln aus ökologischem Anbau. Abschlussbericht, Forschungs-Nr. 04/15. Landesforschungsanstalt f. Landwirtschaft u. Fischerei, Institut f. Acker- u. Pflanzenbau, Gülzow.
- GRUBER, H., A. TITZE, 2010b: Einfluss einer mineralischen Grundnährstoffdüngung mit im ökologischen Landbau zugelassenen Düngemitteln auf Boden- und Pflanzengehalte sowie Ertrag. Abschlussbericht Forschungs-Nr. 04/01. Landesforschungsanstalt f. Landwirtschaft u. Fischerei, Institut f. Acker- u. Pflanzenbau, Gülzow.
- GRUBER, H., C. WEGNER, 2017: Schwefeldüngung zu Körnererbsen und Blauen Lupinen auf einem Sandstandort. Beiträge zur 14. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Verlag Dr. Köster, Berlin, 22-25.
- HAASE, T., C. SCHÜLER, E. KÖLSCH, J. HEß, N.U. HAASE, 2005a: Einfluss von Düngung und Sorte auf Ertrags- und Qualitätsparameter von Verarbeitungskartoffeln im Ökologischen Landbau. Beiträge zur 8. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Verlag Dr. Köster, Berlin, 51-54.
- HAASE, T., Chr. SCHÜLER, H. BÖHM, T. KRAUSE, R. LOGES, F. TAUBE, J. HEß, 2005b: Optimierung des Kartoffelanbaus im Ökologischen Landbau hinsichtlich der Weiterverarbeitung zu Pommes frites und Chips. Abschlussbericht Forschungsprojekt-Nr.: 03OE003, Universität Kassel, Fachgebiet Ökologischer Land- und Pflanzenbau, Witzenhausen. [online: <http://orgprints.org/13028/>]. Stand 01.09. 2018.
- HAASE, T., E. KÖLSCH, J. HEß, N.U. HAASE, 2006: Ökologische Erzeugung von Verarbeitungskartoffeln. Teil 3: K- und N-Düngung. Kartoffelbau **57**, 3, 114-123.
- HEGE, U., K. OFFENBERGER, 1996: Ertragswirkung einer P- Düngung in Abhängigkeit von der P-Versorgung des Bodens - Ergebnisse bayerischer ortsfester Dauerdüngungsversuche. In: Ergebnisse langjähriger, ortsfester Phosphatdüngungsversuche auf Acker und Grünland. VDLUFA-Schriftenreihe **42**, 65-79.
- HEGE, U., K. OFFENBERGER, 1998: Ergebnisse von Kalidauerdüngungsversuchen auf Ackerland in Bayern. In: Ergebnisse langjähriger, ortsfester Kalidüngungsversuche auf Acker- und Grünland. VDLUFA-Schriftenreihe **47**, 65-82.
- HEGE, U., K. OFFENBERGER, 2001: Auswirkung einer Phosphat- und Kalidüngung in Höhe der Abfuhr auf den Ertrag und die Entwicklung der Bodengehalte. VDLUFA-Schriftenreihe **57**, Teil 2, Kongressband 2001, 706-718.
- HEGE, U., M. WENDLAND, K. OFFENBERGER, 2008: Zur Bedeutung der Bodenversorgung mit Phosphat und Kali: Wie hoch müssen die Nährstoffgehalte im Boden sein? Pflanzenbauwissenschaften **12**, 53-63.
- JANSSEN, B.H., P. DE WILLIGEN, 2006: Ideal and saturated soil fertility as bench marks in nutrient management. II. Interpretation of chemical soil tests in relation to ideal and saturated soil fertility. *Agric. Ecosys. Environm.* **116**, 147-155.
- JUNGK, A., 1993: Die Pflanzenverfügbarkeit der Nährstoffe im Boden: chemische und räumliche Aspekte. *Berichte über Landwirtschaft* **207**, SH 5, 70-84.
- JUNGK, A., N. CLAASSEN, V. SCHULZ, J. WENDT, 1993: Pflanzenverfügbarkeit der Phosphatvorräte ackerbaulich genutzter Böden - Langfristige Feldversuche zur Nutzbarkeit des Bodenphosphors und zur Bewertung der Bodenuntersuchung. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* **156**, 397-406.
- KERSCHBERGER, M., 1995: Grundlagen für die Auffindung und Festlegung von Richtwerten zur Bewertung von Nährstoffbilanzen, Bodenfruchtbarkeitsmerkmalen und Düngereinsatz in der Pflanzenproduktion. In: Nährstoffbilanz im Blickfeld von Landwirtschaft und Umwelt. Bundesarbeitskreis Düngung, Frankfurt a. Main, 155-178.
- KERSCHBERGER, M., U. HEGE, 1998: Fazit der Beiträge und Schlussfolgerungen. In: Ergebnisse langjähriger, ortsfester Kalidüngungsversuche auf Acker- und Grünland. VDLUFA-Schriftenreihe **47**, 121-127.
- KERSCHBERGER, M., H. SCHRÖTER, 1998: Ergebnisse von Dauerversuchen zur K-Düngung auf Acker- und Grünlandstandorten in Ostdeutschland. In: Ergebnisse langjähriger, ortsfester Kalidüngungsversuche auf Acker- und Grünland. VDLUFA-Schriftenreihe **47**, 83-98.
- KERSCHBERGER, M., U. HEGE, A. JUNGK, 1997: Phosphordüngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf. VDLUFA-Standpunkt. Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA), Darmstadt. [online: https://www.vdlufa.de/Dokumente/Veroeffentlichungen/Standpunkte/1997_Standpunkt_P-Duengung.pdf]. Stand 01.09. 2018.
- KOCH, W., 2008: PK-Düngung im ökologischen Marktfruchtbauland. Landesanstalt f. Landwirtschaft, Forsten u. Gartenbau, Bernburg, 4 Seiten, schriftl. Mitteilung.
- KÖHNLEIN, J., N. KNAUER, 1965: Ergebnisse der Kieler Dauerdüngungsversuche mit Phosphat und Kali. Schriftenreihe der Landwirtschaftlichen Fakultät der Universität Kiel **39**.
- KÖSTER, W., P. SCHACHTSCHABEL, 1983: Beziehung zwischen dem durch Phosphatdüngung erzielbaren Mehrertrag und dem Phosphatgehalt im Boden. *Z. Pflanzenern. Bodenkde.* **146**, 539-542.
- KOLBE, H., 2000: Landnutzung und Wasserschutz. Der Einfluss von Stickstoff-Bilanzierung, N_{min} -Untersuchung und Nitrat-Auswaschung sowie Rückschlüsse für die Bewirtschaftung von Wasserschutzgebieten in Deutschland. WLV Wissenschaftliches Lektorat und Verlag, Leipzig.
- KOLBE, H., 2001: Grundlagen und praktische Anleitung zur P-, K- und Mg-Düngung im Ökologischen Landbau. Broschüre, Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Dresden. [online: <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/13642>]. Stand 01.09. 2018.
- KOLBE, H., 2010: Phosphor und Kalium im ökologischen Landbau – aktuelle Probleme, Herausforderungen, Düngungsstrategien. In:


- Phosphor- und Kaliumdüngung – brauchen wir neue Düngekonzepte? Bundesarbeitskreis Düngung (BAD), Frankfurt/Main, 117-137. [online: <http://orgprints.org/19354/>]. Stand 01.09. 2018.
- KOLBE, H., 2015: Wie ist es um die Bodenfruchtbarkeit im Ökolandbau bestellt: Nährstoffversorgung und Humusstatus? In: Bodenfruchtbarkeit – Grundlage erfolgreicher Landwirtschaft. Tagung des Verbandes der Landwirtschaftskammern (VLK) und des Bundesarbeitskreises Düngung (BAD) in Würzburg, Bundesarbeitskreis Düngung, Frankfurt/Main, 89-123. [online: <http://orgprints.org/29539/>]. Stand 01.09. 2018.
- KOLBE, H., B. KÖHLER, 2008: Erstellung und Beschreibung des PC-Programms BEFU, Teil Ökologischer Landbau. Verfahren zur Grunddüngung, legumen N-Bindung, Nährstoff- und Humusbilanzierung. Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie 36, 1-253. [online: <http://orgprints.org/15101/>]. Stand 01.09. 2018.
- KOLBE, H., M. SCHUSTER, 2011: Bodenfruchtbarkeit im Öko-Betrieb. Untersuchungsmethoden. Broschüre, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden. [online: <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/11877>]. Stand 01.09. 2018.
- KOLBE, H., E. SCHMIDT, S. KLAGES, 2015: Bodenfruchtbarkeit und Düngung. In: Faustzahlen für den Ökologischen Landbau. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL), Darmstadt, 103-151.
- KOLBE, H., K. FARACK, P. MÜLLER, W. SCHLIEPHAKE, 2019: Einfluss mineralischer und organischer Düngemittel auf den Nährstoffumsatz im Boden sowie Ertrag und Qualität von Kartoffeln im Ökologischen Landbau. Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden, 1-144.
- KOLBE, H., F. RIKABI, E. ALBERT, H. ERNST, F. FÖRSTER, 1999: Ansätze zur PK-Düngungsberatung im Ökologischen Landbau. VDLUFA-Schriftenreihe 52, Kongressband 1999, 223-226.
- KÖPKE, U., R. RAUBER, K. SCHMIDTKE, 2016: Optimierung der Unkrautregulation, Schwefel- und Phosphorverfügbarkeit durch Unterfußdüngung bei temporärer Direktsaat von Ackerbohne und Sojabohne. Abschlussbericht d. Verbundprojektes FKZ 11OE087, Institut f. Organischen Landbau, Universität Bonn. [online: <http://orgprints.org/30761/>]. Stand 01.09. 2018.
- KUCHENBUCH, R.O., U. BUCZKO, 2011: Re-visiting potassium- and phosphate-fertilizer responses in field experiments and soil-test interpretations by means of data mining. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* **174**, 171-185.
- KUHLMANN, H., J. WEHRMANN, 1984: Prüfung verschiedener Methoden der Bodenanalyse auf ihre Eignung zur Ermittlung des K-Düngerbedarfs auf Lößböden. *Z. Pflanzenern. Bodenkd.* **147**, 334-348.
- LABER, H., 2003: K- und Cl-Düngung bei ökologisch angebautem Spinat. Sächsische Landesanstalt f. Landwirtschaft, Dresden. [online: <http://orgprints.org/00000886/>]. Stand 01.09. 2018.
- LOES, A.-K., 2003: Studies of the availability of soil phosphorus (P) and potassium (K) in organic farming systems, and of plant adaptations to low P- and K-availability. Dissertation, Univ., As, Norway.
- MAHNKE, B., D. KORPAT, R. ERLINGHAGEN, N. WRAGE-MÖNNIG, J. MÜLLER, 2017: Rolle des Phosphors als Steuerungsgröße des Stickstofftrages und der Phytodiversität ökologisch bewirtschafteter Dauergrünlandbestände. Abschlussbericht Förderkennzeichen BOELN 2812OE008, Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Professur Grünland u. Futterbauwissenschaften, Rostock, 1-104. [online: <http://orgprints.org/32078/>]. Stand 01.09. 2018.
- MEYERCORDT, A., 2001: Einsatz von organischen stickstoffhaltigen Zukaufdüngern im ökologischen Weizenanbau zur Ertrags- und Qualitätsverbesserung. Landessorten- und anbautechnische Versuche. Ergebnisse der Versuche im ökologischen Landbau 2001. Landwirtschaftskammer, Hannover, 38-44.
- MEYERCORDT, A., 2006: Unterfußdüngung im ökologischen Silomaisanbau 2002 – 2003. Ökologischer Maisanbau auf suboptimalen Standorten 2004 – 2005, 10 Seiten, schriftl. Mitteilung.
- MITSCHERLICH, E.A., 1909: Das Gesetz des Minimums und das Gesetz des abnehmenden Bodenertrages. *Landwirtsch. Jahrb.* **38**, 537-552.
- MÜLLER, T., 2017: Dauerversuch zur P- und S-Düngung im Ökolandbau, 2002 – 2008. Institut f. Pflanzenernährung, Universität, Hohenheim, 26 Dateien, schriftl. Mitteilung.
- MUNK, H., 1988: Phosphaternährung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen und sachbezogene Versuchstätigkeit. In: Versorgung der Böden mit Phosphat und Kali als Basis der Ertragsfähigkeit – Gelten noch die herkömmlichen Rezepte? Bundesarbeitskreis Düngung, Kassel, 72-100.
- MUNK, H., C. BÄRMANN, 1977: Zur Auswertung von Feldversuchen und Bodenuntersuchungsergebnissen auf Phosphat. *Landw. Forsch. SH 33/1*, Kongressband 1976, 114-133.
- MUNK, H., C. BÄRMANN, 1978: Zur Frage der Phosphatdüngung im Bereich optimaler bis hoher Anreicherung des Bodens. *Landw. Forsch.* **35**, 311-324.
- MUNK, H., M. REX, 1987: Zur Eichung chemischer Bodenuntersuchungsmethoden auf Phosphat an mehrjährigen Feldversuchen. VDLUFA-Schriftenreihe **20**, Kongressband 1986, 275-297.
- MUNK, H., J. HEYN, M. REX, 2005: Vergleichende Betrachtung von Verfahren zur Auswertung von Nährstoffsteigerungsversuchen am Beispiel Phosphor. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* **168**, 789-796.
- NIEDERBUDE, E.A., 1985: Pflanzennährstoffe in Periphereräumen der festen Bodensubstanz und deren Beiträge zur Nährstoffmobilisierung. *Bayer. Landw. Jb.* **62**, SH 1, 99-108.
- NIEDERBUDE, E.A., 1987: Factors affecting potassium release and fixation in soils. *Kongress d. Intern. Bodenkd. Gesell.* **13**, **6**, 1986, 1155-1167.
- OBERSON, A., J.C. FARDEAU, J.M. BESSON, H. STICHER, 1993: Soil phosphorus dynamics in cropping systems managed according to conventional and biological agricultural methods. *Biol. Fertil. Soils* **16**, **2**, 111-117.
- OBERSON, A., F. OEHL, M. LANGMEIER, A. FLIEßBACH, D. DUBOIS, P. MÄDER, J.-M. BESSON, E. FROSSARD, 2000: Can increasing soil microbial activity help to sustain phosphorus availability? IFOAM Scientific Conference Proceedings **13**, 27.
- OLFS, H.-W., K. BLANKENAU, F. BRENTRUP, J. JASPER, A. LINK, J. LAMMEL, 2005: Soil- and plant-based nitrogen-fertilizer recommendations in arable farming. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* **168**, 414-431.
- PAFFRATH, A., E. LEISEN, M. PUFFERT, F. LIPPERT, 2003a: Anbau von Feldgemüse. Leitbetriebe Ökologischer Landbau in Nordrhein-Westfalen. Schriftenreihe des Lehr- u. Forschungsschwerpunktes „Umweltverträgliche und Standortgerechte Landwirtschaft“, Landwirtschaftliche Fakultät d. Rheinischen Friedrich-Wilhelm-Universität, Bonn, 105, 113-126.
- PAFFRATH, A., E. LEISEN, A. PEINE, CHR. VORLÄNDER, M. BERG, D. NEUHOFF, 2003b: Kartoffelanbau. Leitbetriebe Ökologischer Landbau in Nordrhein-Westfalen. Schriftenreihe des Lehr- u. Forschungsschwerpunktes „Umweltverträgliche und Standortgerechte Landwirtschaft“, Landwirtschaftliche Fakultät d. Rheinischen Friedrich-Wilhelm-Universität, Bonn, 105, 76-104.
- PETZOLDT, L., 2015: Phosphorversorgung im organischen Landbau. Langfristige Wirkung einer P-Düngung in Form von Rohphosphat, Fleischknochenmehl und aufgeschlossenem Phosphat auf Ertrag und P-Verfügbarkeit im organischen Landbau. Master-Arbeit, Institut f. Pflanzenernährung, Universität, Gießen.
- RICHTER, D., M. KERSCHBERGER, 1991: Charakterisierung von pflanzenverfügbarem P und K in Böden und Ableitung von Düngungsempfehlungen. *Kali-Briefe* **20**, 631-638.
- RÖMER, W., Ph. LEHNE, 2004: Vernachlässigte Phosphor- und Kaliumdüngung im ökologischen Landbau senkt die biologische Stickstoffbindung bei Rotklee und den Kornertrag bei nachfolgendem Hafer. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* **167**, 106-113.
- RÖMER, W., N. CLAASSEN, B. STEINGROBE, R. HILMER, 2005: P- und K-Düngung. Reaktion von Winterweizen und Wintergerste auf die P- und K-Düngung in einem 20-jährigen Feldversuch. *Getreidemagazin* **10**, **4**, 238-242.
- SCHACHTSCHABEL, P., 1963: Der anzustrebende pH-Wert, Phosphor- und Kaliumgehalt von Ackerböden. *Landw. Forsch. SH 17*, 60-82.
- SCHACHTSCHABEL, P., 1985: Beziehung zwischen dem durch K-Düngung erzielbaren Mehrertrag und dem K-Gehalt der Böden nach Feldversuchen in der Bundesrepublik Deutschland. *Z. Pflanzenern. Bodenkd.* **148**, 439-458.
- SCHACHTSCHABEL, P., W. KÖSTER, 1985: Beziehung zwischen dem Phosphatgehalt im Boden und der optimalen Phosphatdüngung in langjährigen Feldversuchen. *Z. Pflanzenern. Bodenkd.* **148**, 459-464.
- SCHÜLLER, H., 1969: Die CAL-Methode, eine neue Methode zur Bestimmung des pflanzenverfügbaren Phosphates in Böden. *Z. Pflanzenern. Bodenkd.* **123**, 48-63.
- SCHULTE, G., D. SCHRÖDER, 1996: P- und K-Extraktionsverfahren zur Kennzeichnung des Versorgungsgrades unterschiedlich lange ökologisch bewirtschafteter Böden in Rheinland-Pfalz. VDLUFA-Schriftenreihe **44**, Kongressband 1996, 437-440.
- SCHULZ, R., 2010: Dauerversuch zur P- und S-Düngung im Ökolandbau, 2002 – 2005. Institut f. Pflanzenernährung, Universität, Hohenheim, 3 Seiten, schriftl. Mitteilung.
- SCHWERDT, K., W. JESSEN, 1961: Die Höhe des Ertragszuwachses bei P-Steigerungsversuchen in Abhängigkeit vom Lactat-Wert und der Stellung in der Fruchtfolge bei Getreide. *Landw. Forsch. SH 14*, 148-159.
- SEEHUBER, C., 2015: Nährstoffversorgung zur Optimierung der N₂-Fixierung und Produktivität von Körnerleguminosen. Dissertation, Universität, Bonn.
- SEEHUBER, C., H. GOLDBACH, H. SCHERER, 2013: Nährstoffversorgung von Ackerbohnen im Ökologischen Landbau. Beiträge zur 12. Wis-

- senschaftstagung Ökologischer Landbau, Verlag Dr. Köster, Berlin, 210-213.
- SEUFERT, V., N. RAMANKUTTY, J.A. FOLEY, 2012: Comparing the yield of organic and conventional agriculture. *Nature* **485**, 229-232.
- SHWIEKH, R., J. SCHICK, S. KRATZ, D. RÜCKAMP, E. SCHNUG, 2015: Comparative investigation and inter-calibration of different soil P tests. *J. Kulturpflanzen* **67**, 61-72.
- SPIEGEL, H., P. CERMAK, J. de HAAN, G. FÜLEKY, C. GRIGNAN, T.D. D'HOSE, L.R. STAUGAITIENE, W. ZORN, G. GUZMAN, D. PIKULA, L. JORDAN-MEILLE, 2014: Düngeempfehlungen in Europa. VDLUFA-Schriftenreihe **70**, Kongressband 2014, 48-56.
- SPIEß, H., 2002: Zur Problematik der Kaliumversorgung im Ökologischen Landbau unter Berücksichtigung der Anwendung von Pflanzenextrakt. In: R. EINSIEDEL: XXV Fortbildungskurs Boden, Pflanze, Tier, Vermarktung, Heft 9. Sächsische Interessengemeinschaft Ökologischer Landbau (SIGÖL), Kossa, 79-92.
- SPIEß, H., 2003: Fingerhut verbessert Kaliwirkung. *Lebendige Erde*, Nr. 1, 44-49.
- SPIEß, H., Chr. MATTHES, 2010: Zur Wirkung der Düngung mit Holzhäcksel-Grümgut-Kompost im Vergleich sowie in Kombination mit Kalidüngung. Jahresbericht 2010, Forschungsring f. Biologisch-Dynamische Wirtschaftsweise, Bad Vilbel, 27-28.
- SPIEß, H., Chr. MATTHES, 2017: Kompost und Kaliversorgung. Düngungsstrategie zur Verbesserung des Nährstoff- und Humusstatus im biodynamischen Anbau mit Einsatz von Grünschnitt-Kompost und Kali. *Lebendige Erde*, Nr. 6, 36-40.
- SPIEß, H., Chr. MATTHES, H. HORST, H. SCHAAF, 2009: Präparatforschung und Kalidüngung. Jahresbericht 2010, Forschungsring f. Biologisch-Dynamische Wirtschaftsweise, Bad Vilbel, 20-22.
- STEFFENS, D., 2010: Einfluss von P-Düngung und P-Form auf die Erträge von Dinkel, Hafer und Weizen. Institut f. Pflanzenernährung, Universität, Gießen, 7 Seiten, schriftl. Mitteilung.
- STEFFENS, D., G. LEITHOLD, 2011: Wie Phosphor im Organischen Landbau zukünftig düngen? Wirkung von Phosphatdüngung und Phosphatform im Organischen Landbau. Beiträge zur 11. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Verlag Dr. Köster, Berlin, 189-192.
- STOCKDALE, E.A., M.A. SHEPHERD, S. FORTUNE, S.P. CUTTLE, 2002: Soil fertility in organic farming systems – fundamentally different? *Soil Use Management* **18**, 1, 301-308.
- VETTER, H., K. FRÜCHTENICHT, 1974: Wege zur Ermittlung des Düngebedarfs mit größerer Treffsicherheit. *Landw. Forsch. SH 31/1*, 290-320.
- VETTER, H., K. FRÜCHTENICHT, 1977: Untersuchungen zur Ermittlung des Phosphatdüngerbedarfs. *Landw. Forsch. SH 33/1*, Kongressband 1976, 134-168.
- WAGNER, E., 1970: Die Beeinflussung der P₂O₅-Bodenuntersuchungswerte durch einzelne Düngemitteltypen. *Landw. Forsch. SH 25/1*, 104-112.
- WATSON, C.A., D. ATKINSON, P. GOSLING, L.R. JACKSON, F.W. RAYNS, 2002: Managing soil fertility in organic farming systems. *Soil Use Management* **18**, 239-247.
- WENDT, J., 1991: Wirkung von Dünger- und Bodenphosphor auf die Phosphatversorgung von Ackerkulturen – Untersuchungen an mehrjährigen Feld- und Gefäßversuchen. Dissertation, Universität, Göttingen.
- WERNER, W., H. WIECHMANN, 1971: Vergleichende Untersuchungen zur Brauchbarkeit der CAL-Methode zur Kennzeichnung des pflanzenverfügbaren Bodenphosphats: *Landw. Forsch.* **24**, 285-293.
- WIESLER, F., Th. APPEL, K. DITTERT, Th. EBERTSEDER, T. MÜLLER, L. NÄTSCHER, H.-W. OLFS, M. REX, K. SCHWEITZER, D. STEFFENS, F. TAUBE, W. ZORN, 2018: Phosphordüngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf. VDLUFA-Standpunkt, Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA), Speyer. [online: https://www.vdlufa.de/Dokumente/Veroeffentlichungen/Standpunkte/2018_Standpunkt_P-Duen-gung.pdf]. Stand 01.09. 2018.
- WOLLMANN, I., K. MÖLLER, 2018: Phosphorus bioavailability of sewage sludge-based recycled fertilizers in an organically managed field experiment. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* **181**, 5, 760-767.
- WULFF, F., 1996: Umweltschonende Kalium- und Phosphatdüngung – Feldversuche, Bodenanalysen und Modellrechnungen zur Bestimmung des Düngebedarfs von Ackerkulturen auf Sandböden. Dissertation, Universität, Göttingen. Cuvillier Verlag, Göttingen.

© Der Autor/ Die Autorin 2019.

 Dies ist ein Open-Access-Artikel, der unter den Bedingungen der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (CC BY 4.0) zur Verfügung gestellt wird (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>).

© The Author(s) 2019.

 This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).