

Phosphor und Kalium im ökologischen Landbau – aktuelle Probleme, Herausforderungen, Düngungsstrategien

Hartmut Kolbe, Leipzig

1 Einleitung

Optimales pflanzliches Wachstum gewähren heißt für den ökologischen Landbau, die Selbstregulierungskräfte des Systems Boden-Pflanze zu erhöhen. Dies bedeutet für den Bereich Düngung und Nährstoffversorgung, dass zunächst die Fähigkeit der Pflanzen gestärkt werden soll, sich durch einen optimalen Bodenaufschluss mit Nährstoffen und allen anderen Wuchsstoffen zu versorgen. Grundlage für diese Vorgänge ist zudem eine sorgfältige Pflege des Bodenlebens zur Erhaltung und Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit.

Durch Verwitterung und Mineralisierung und die teilweise aktive Nährstoffmobilisierung durch Pflanzen und Bodenorganismen werden Prozesse unterstützt, die langfristig zu einer Erschließung der Bodenreserven an Nährstoffen führen. Diese Bodenreserven sind um ein Vielfaches höher als die in den Lagerstätten heute bekannten Nährstoffreserven der Welt (Tab. 1).

Tab. 1: Nährstoffgehalte und Mengen von Gesteinen und Sedimenten als Ausgangsmaterial der Bodenbildung (aus Schachtschabel et al. 1989)

Nährstoff	Ausgangsmaterial der Bodenbildung	
	Gehalte (%)	Mengen (kg/ha 1 m Tiefe)
Phosphor	0,04 – 0,13	6 600 – 18 500
Kalium	0,6 – 4,3	100 000 – 635 000

Dieser gewünschte Nährstoffaufschluss erfolgt nur dann in einem nennenswerten Ausmaß, wenn die im Boden gelösten Nährstoffe relativ niedrige Gehalte annehmen und wenn eine Nährstoff-Zufuhr in schwer verfügbarer Form vorgenommen wird. Der Grund liegt darin, dass die Pflanzen nur in diesen Fällen durch ein erhöhtes Wurzelwachstum den Boden in verstärktem Maße durchwurzeln und so z.B. auch den Unterboden besser erschließen können. Zudem können die Pflanzen nur bei niedrigen Nährstoffgehalten über die Bildung von Wurzelexudate (Ausscheidungen, z.B. org. Säuren) und einer günstigeren Organismen-Zusammensetzung der Rhizosphäre (z.B. Mykorrhiza) einen höheren Nährstoffaufschluss leisten.

Über die augenblickliche Situation und Entwicklungstendenzen der Nährstoffversorgung auf den Ökobetrieben liegen keine umfassenden Erkenntnisse vor. Nach einer aktuellen Untersuchung der Bodengehalte an Phosphor (P) und Kalium (K) der Ackerflächen der noch relativ jungen Ökobetriebe im Freistaat Sachsen wird bisher nur eine sehr geringe Anzahl an Ackerflächen in die VDLUFA-Versorgungsklasse A eingestuft (Abb. 1). Aus den hohen Anteilen an den Versorgungsstufen C – E kann ein allgemein verbreitetes relativ hohes Versorgungsniveau abgeleitet werden und es bestehen noch erhebliche Reserven, die zunächst genutzt werden können.

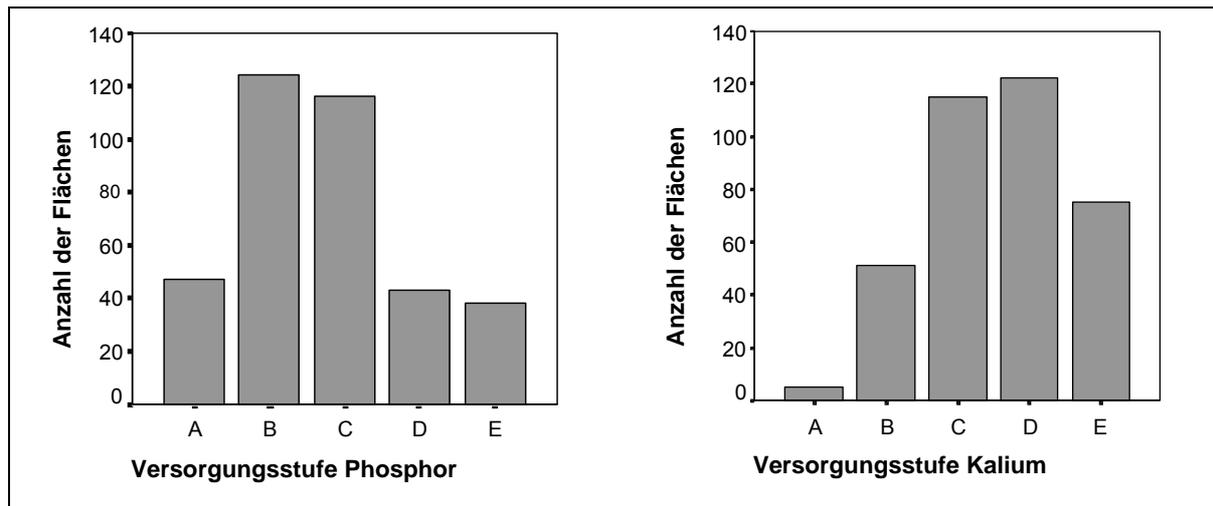


Abb. 1: P- und K-Versorgung der Ökobetriebe im Freistaat Sachsen (Ackerland)

Ergebnisse aus verschiedenen Schlag- bzw. Betriebsbilanzierungen zeigen auf, dass anscheinend dieses Abreicherungspotenzial auch genutzt wird. Gemischtbetriebe mit einer relativ hohen Viehhaltung weisen in der Regel ausgeglichene Nährstoffbilanzen auf. Intensive Marktfruchtbetriebe mit hohem Anteil an Hackfrüchten und Gemüse müssen dem gegenüber mit z.T. deutlich negativen Bilanzsalden rechnen (Alvermann 1990; Watson et al. 2002b). Auch aus flächenbezogenen Nährstoffbilanzen von 15 Ökobetrieben in Sachsen-Anhalt geht hervor, dass die P-Salden im Durchschnitt bei -6 (+26 bis -16) kg P/ha und Jahr und die K-Salden um -13 (+134 bis -64) kg K/ha und Jahr liegen (Harzer 2006).

Der Rahmen an Handlungsmöglichkeiten zur Düngung und Bodenfruchtbarkeit ist in der EU-Verordnung über den ökologischen Landbau festgeschrieben (Anon. 2007, 2008). Als Leitsatz gilt es, die Fruchtbarkeit und biologische Aktivität sowie die Humusgehalte des Bodens zu erhalten oder in geeigneten Fällen zu erhöhen. Auf Grund dieser allgemeinen Formulierung haben sich unterschiedliche Vorstellungen zur Grunddüngung und Bodenuntersuchung im Ökolandbau entwickelt (Watson et al. 2002a, 2008; Kolbe & Köhler 2008, u.a. Studien):

- **Kein Handlungsbedarf:** → Nährstoffmobilisierung und Verwitterung (u.a. Scheller 1999; Friedel 2008)
- **Fruchtfolgegestaltung:** → Fruchtwechsel (u.a. Tiefwurzler, bestimmte Pflanzenarten zur Nährstoffmobilisierung, Umsatz organischer Substanz, Gründüngung, etc.) (u.a. Kolbe 2006)
- **Bodenuntersuchung:** → + in Deutschland für einzelne Nährstoffe vor allem Methoden des VDLUFA (<http://www.vdlufa.de>) (auf Erfahrungen und Versuchsergebnissen des konventionellen Landbaus kann aufgebaut werden)
+ alternative (ganzheitliche) Verfahren u. a. von Balzer (2000) und Kinsey & Walters (1999) (es liegen kaum Erfahrungen und keine Versuchsergebnisse vor)
- **Nährstoffbilanzierung:** → Rückführung des Entzugs
- **Düngungssysteme:** → + Öko-Verordnung (Anon. 2008): Düngemittelliste, organische und mineralische Düngemittel erlaubt
+ u.a. weitere Düngemittel wie Bio-Super-Phosphat und neues TH-Phosphat werden geprüft (Müller et al. 2007)
+ Aufbauend auf konventionellen Erfahrungen und Methoden (vgl. Albert et al. 2008) wurden Düngungssysteme für den Ökolandbau entwickelt (u.a. Kolbe et al. 1999).

An die jeweiligen standörtlichen Verhältnisse gut angepasste Methoden und Düngungssysteme können nur auf Grund einer in ausreichender Kapazität zur Verfügung stehenden Experimentierbasis entstehen und gepflegt werden. Aus Ermangelung eigener Versuche im Ökolandbau, wurden daher in vielen Ländern der Europäischen Union für die Anpassungsarbeiten im Ökolandbau auf die vielfältigen, regional verfügbaren experimentellen Erfahrungen und Methoden zurückgegriffen, die in der konventionellen Landwirtschaft in den letzten Jahrzehnten entstanden sind (Watson et al. 2008; siehe auch Schmidt 2007).

Andere sog. ganzheitliche Methoden verschiedener Anbieter erfüllen in der Regel nicht diese hohen Voraussetzungen und Ansprüche für eine anwendungsfreundliche Nutzung in der breiten landwirtschaftlichen Praxis. Diese Verfahren wurden entweder für andere Standorte entwickelt, es sind keine Laborkapazitäten vorhanden oder es ist keine experimentell belegte Interpretation der Ergebnisse möglich (Kolbe 2009). In diesem Beitrag werden daher einige wichtige experimentell abgesicherte Elemente eines Systems zur P- und K-Grunddüngung für die Praxis des Ökolandbaus vorgestellt.

2 Material und Methoden

Untersuchungsmaterial:

- Ergebnisse aus P- und K-Düngungssteigerungs-Versuchen des Ökolandbaus (insbesondere aus dem AK der Versuchsansteller im Ökolandbau des VLK, Berlin)
- Veröffentlichte Ergebnisse aus 245 P-Dauer-Feldversuchen des konventionellen Ackerlandes mit 1087 Varianten aus Deutschland
- Veröffentlichte Ergebnisse aus 170 K-Dauer-Feldversuchen des konventionellen Ackerlandes mit 1050 Varianten aus Deutschland.

Faktoren:

- Erträge der Feldfrüchte, Nährstoff-Schlagbilanz, Düngemittelart und -Höhe, DL- bzw. CAL-lösliche Nährstoffgehalte, Bodenart, pH-Wert, Niederschlag, Temperatur, Fruchtfolge, u.a. Merkmale.

Statistische Auswertungsmethode:

- einfache und multiple Regressionsanalyse nach der Grundfunktion: $y = f(x_n)$
x = lineare Glieder, quadratische Glieder, einfache lineare Wechselwirkungsglieder (WW)
y = DL- u. CAL-lösl. Nährstoffgehalte (Differenz Versuchsbeginn und -Ende).

Methoden zur Bodenuntersuchung:

- pflanzenverfügbares Phosphat und Kalium: DL-Methode nach Egner & Riehm (1955), CAL-Methode nach Schüller (1969).

3 Ergebnisse

3.1 Bodenuntersuchung

Entsprechend den Erfahrungen in anderen Ländern (Watson et al. 2008), wurden von den Untersuchungsmethoden zum Nährstoffmanagement vor allem die in der landwirtschaftlichen Praxis in Deutschland weit verbreiteten Methoden des VDLUFA geprüft, ob sie auch unter ökologischen Anbauverfahren zu aussagefähigen Ergebnissen führen. Aus Düngungssteigerungsversuchen des konventionellen Landbaus, in denen auch die im Ökolandbau zugelassenen organischen und mineralischen Düngemittel geprüft worden sind, wurden die mittlere Ertragsreaktion sowie die Ergebnisse der Schlagbilanzierung in Beziehung gesetzt mit der Änderung der Nährstoffgehalte, die mit bestimmten Extraktionsverfahren im Boden erfasst werden können.

Aus diesen Untersuchungen konnte die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die hier vorgestellten Extraktions-Methoden für die überwiegende Anzahl der in der Praxis des ökologischen Landbaus vorkommenden Standorte bei Düngung mit den zugelassenen organischen und mineralischen Düngemitteln geeignet erscheinen (Kolbe & Köhler 2008). Einschränkungen bestehen auf Böden mit pH-Werten über 7 für die Phosphatdüngung sowie auf stark K-fixierenden Böden (hohe Tongehalte, Tonminerale Vermiculite, Illite, u.a.) für das K-Düngungsverfahren. Daher sind für nur schätzungsweise 10 – 20 % der Standorte die nachfolgend vorgestellten Verfahren bisher nicht oder nur eingeschränkt geeignet.

3.2 Bewertungssysteme für P und K

Als nächster Schritt war die Frage zu klären, welche Gehalte an löslichen Nährstoffen in der Bodenlösung für ökologische Anbaumethoden als optimal anzusehen sind. Nach LIEBIG'S bekanntem „Gesetz des Minimums“ ist der Faktor ertragsbegrenzend, der im Minimum vorliegt. Daraus wurde bisher abgeleitet, dass für die etwa 30 % geringeren Ertragserwartungen im ökologischen Landbau auch niedrigere Konzentrationen an Nährstoffen im Boden erforderlich sind als bei entsprechend höherem Ertragsniveau in der konventionellen Landwirtschaft. Deshalb wurde vorläufig angenommen, dass die Versorgungsklasse B im Allgemeinen für ökologische Anbauverfahren als ausreichend angesehen werden kann (Kolbe 2001).

Auf Grund der anbauspezifischen Besonderheiten konnte dieser Sachverhalt allerdings nur aus ökologischen Versuchsserien geklärt werden, in denen alle üblichen Fruchtarten sowie ein breites Standortspektrum abgedeckt werden. In der Zwischenzeit sind zu verschiedenen Fragestellungen entsprechende Ökoversuche angelegt worden, so dass erstmals eine gemeinsame Auswertung vorgenommen werden kann (Abb. 2).

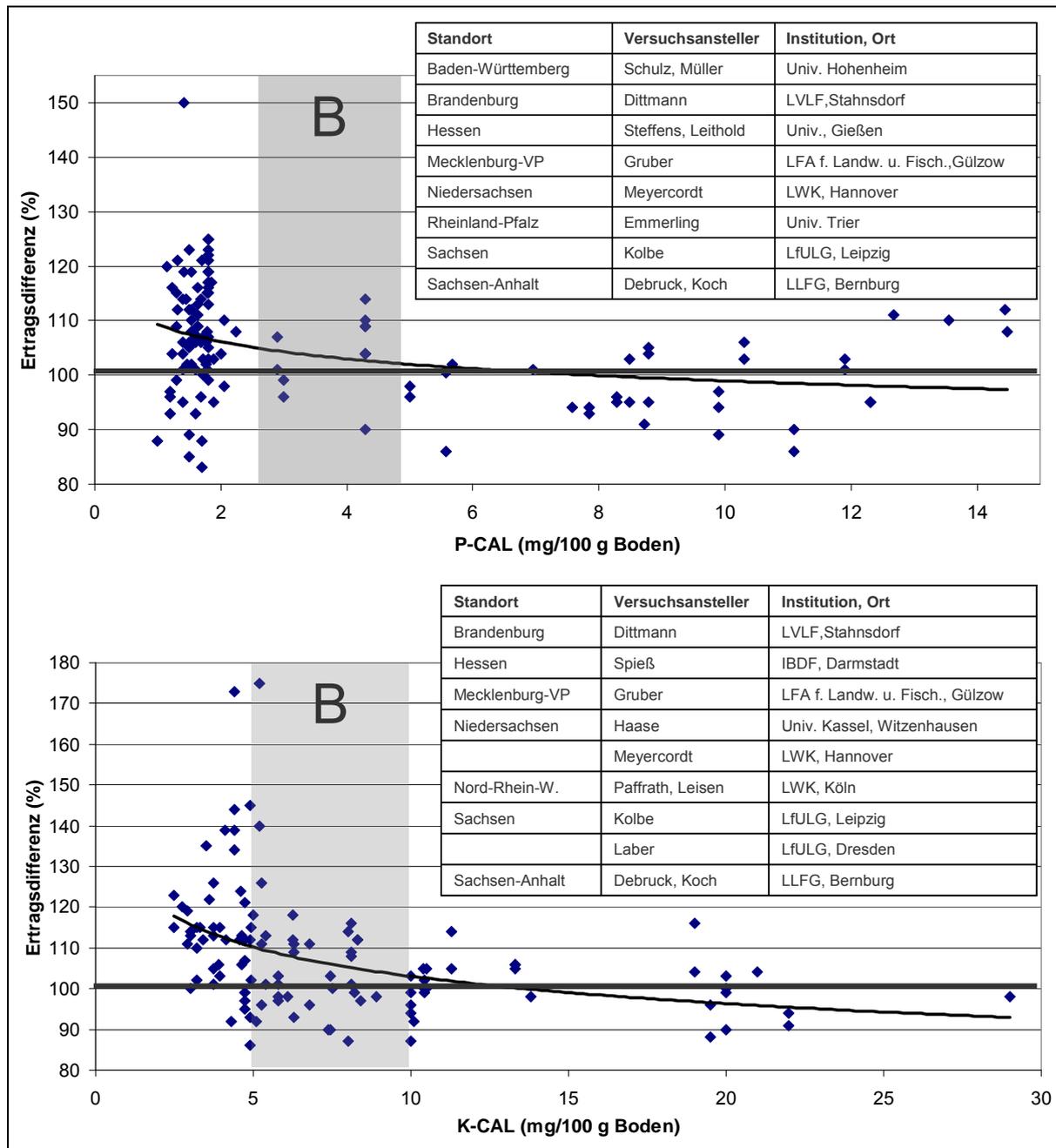


Abb. 2: Zusammenhang zwischen den durch mineralischer P- bzw. K-Düngung bedingten Ertragssteigerungen und den Gehalten an löslichen Nährstoffen im Boden ermittelt aus Ökoversuchen (Bereich d. VDLUFA-Versorgungsklasse B)

Aus diesen experimentellen Ergebnissen kann für die löslichen P- und K-Gehalte des Bodens im Wesentlichen bestätigt werden, dass bei Unterlassung der Düngung es lediglich zu deutlichen Mindererträgen kommen kann, wenn die Versorgungsklasse B unterschritten wird. Damit ist nun auch experimentell belegt, dass die Versorgungsklasse B als ausreichend für den Ökolandbau anzusehen ist (Tab. 2).

Tab. 2: Gehaltsklassen für lösliche Bodennährstoffe von Ackerland und Grünland sowie Handhabung für den ökologischen Landbau

Gehalts- klasse	Einstufung	Anmerkungen für ökologische Anbauverfahren
A Sehr niedrig	Ertrags- u. Qualitätsmängel, sehr guter Umwelt- u. Ressourcenschutz, geringe Effizienz bei singulärem Mangel	Zufuhr an Grundnährstoffen von außen in der Regel notwendig
B Niedrig	Optimal für ökologischen Landbau: Ertrag, Qualität, Umwelt- und Ressourcenschutz	Zufuhr an Grundnährstoffen von außen ggf. langfristig notwendig
C Mittel	Optimal für konventionellen Landbau: Ertrag, verringerter Umwelt- u. Ressourcenschutz	Zufuhr an Grundnährstoffen von außen begründungsbedürftig (z.B. intensiver Gemüsebau)
D Hoch	Maximaler Ertrag, Luxuskonsum, geringer Umwelt- u. Ressourcenschutz	Keine Zufuhr an Grundnährstoffen von außen
E Sehr hoch	Ertrags- u. Qualitätsdepressionen möglich, Luxuskonsum, kein Umwelt- u. Ressourcenschutz	Keine Zufuhr an Grundnährstoffen von außen (Vorsorge- u. Sanierungsmaßnahmen erwägen)

Das Nährstoffmanagement des Öko-Betriebes sollte daher darauf abgestimmt werden, in absehbarer Zeit die Versorgungsklasse B anzustreben und langfristig zu sichern. Hierdurch werden die Erfordernisse des Betriebes an das Ertragsniveau und die Qualität der Produkte sowie die erhöhten Ansprüche an den Umwelt- und Ressourcenschutz in der Regel sichergestellt. Ob auch für besonders empfindliche Fruchtarten (intensiver Gemüsebau, hohe Anteile an Hackfrüchten in der Fruchtfolge, Sonderkulturen) diese Versorgungsklasse als ausreichend angesehen werden kann, sollte in weiteren speziellen Versuchen geklärt werden.

3.3 Quantitative Zusammenhänge zwischen den Nährstoffbilanzen und der Veränderung der Bodengehalte an pflanzenverfügbaren Nährstoffen

Eine Auswertung von konventionellen und einigen wenigen ökologischen P- und K-Steigerungsversuchen ergab, dass die Nährstoff-Salden in einem ganz bestimmten Zusammenhang mit der Veränderung der Bodengehalte an löslichen Nährstoffen stehen. Auf diese Beziehungen haben weder verschiedene Düngemittel (mineralisch, organisch) noch unterschiedliche Anbausysteme einen deutlichen Einfluss (Kolbe & Köhler 2008). Daher war es möglich, durch entsprechende Auswertung von Ergebnissen aus einer hohen Anzahl an konventionellen Dauerversuchen der letzten Jahrzehnte, quantitative Beziehungen zwischen den Saldowerten und der Bodenänderung an diesen Nährstoffen zu ermitteln.

3.3.1 Phosphor

Durch eine multivariate statistische Auswertung von P-Steigerungsversuchen wurde ermittelt, dass die Schlagsalden für Phosphor den mit Abstand größten Einfluss auf die Veränderung der löslichen P-Gehalte des Bodens ausüben (Tab. 3). Mit steigenden P-Salden ist eine deutliche Zunahme der Bodengehalte verbunden, Wechselwirkungen mit anderen Faktoren sind dagegen nur sehr schwach ausgebildet. Andere Faktoren, wie die Temperatur und die Bodenart haben noch eine leicht positive Wirkung. Den Faktoren N-Mineraldüngung, Ausgangsgehalte an Phosphor im Boden sowie steigenden Niederschlägen kommt eine geringfügig negative Wirkung zu. Mit steigenden Humusgehalten kann eventuell noch eine geringe zunehmende Wirkung auf die P-Bodenwerte verzeichnet werden.

Tab. 3: Multiple Regressionsanalyse über den Einfluss von Standort- und Bewirtschaftungsfaktoren auf die jährliche Änderung der löslichen P-Gehalte (DL, CAL) aus konventionellen Dauerversuchen (Varianten-Anzahl = 349)

Faktor	Modell ohne WW-Glieder		Modell mit WW-Glieder	
	Achsenabschnitt A / Steigung B	Multpl. Bestimmtheitsmaß r^2 (%)	Achsenabschnitt A / Steigung B	Multpl. Bestimmtheitsmaß r^2 (%)
(Konstante, A)	-2,969		-0,227	
P-Saldo (kg/ha x a)	0,008111	41,2		
WW Saldo-Temperatur			0,001344	42,8
Temperatur (°C)	0,731	6,2	0,04267	4,0
Temperatur ² (°C)	-0,04310	1,5		
WW Saldo-N-Düngung			-0,00002927	1,8
N-Düngung (kg/ha)	-0,0006705	0,5		
N-Düngung ² (kg/ha)	0,00000287	6,1	0,000002522	7,1
WW Saldo-Humusgehalt (% TM)			0,0004152	0,2 n.s.
P-Gehalt Versuchsanfang ² (mg/100 g)	-0,0008262	4,8	-0,0008717	5,6
Bodenart *)	0,0157	0,8	0,0118	0,7
Niederschlag (mm)	-0,0001638	0,3 n.s.	-0,0002927	0,6
Summen		61,4		62,8

*) 1 = S; 2 = SI; 3 = IS; 4 = SL; 5 = sL; 6 = L; 7 = LT; 8 = T; 9 = M; Kein Einfluss: (Humusgehalt % TM), pH-Wert

Auf Grund dieser Auswertungen kann zusammenfassend angemerkt werden, dass der P-Saldo als einziges Merkmal anzusehen ist, das einen deutlichen, meistens linearen Einfluss auf die löslichen Gehalte an Phosphor im Boden ausübt. Andere bewirtschaftungs- und standortbedingte Faktoren haben dagegen keinen prägenden Einfluss, so dass sie zur Quantifizierung dieser Zusammenhänge nicht berücksichtigt werden müssen. Somit kann grundsätzlich die Vorgehensweise des VDLUFA zur Kennzeichnung der löslichen Bodengehalte an Phosphor (Kerschberger et al. 1997) durch die eigenen Auswertungen bestätigt werden.

Unter Einbeziehung einer großen Anzahl an Versuchen mit insgesamt 601 Varianten wurden die P-Salden den jährlichen Veränderungen der DL-löslichen P-Bodengehalte gegenüberge-

stellt (Abb. 3). In Bezug auf die CAL-löslichen Bodengehalte konnten Versuche mit insgesamt 159 Varianten ausgewertet werden. Hierbei wurde folgende Gleichung gefunden:

- Jährliche Änderung der CAL-löslichen P-Gehalte (mg/100 g) = $0,165 + 0,005865 \times \text{P-Saldo (kg/ha u. a)}$
($r^2 = 0,23^{**}$)
- $0,0 \text{ (mg P/100 g)} = -28,13 \text{ (kg P-Saldo/ha)}$.

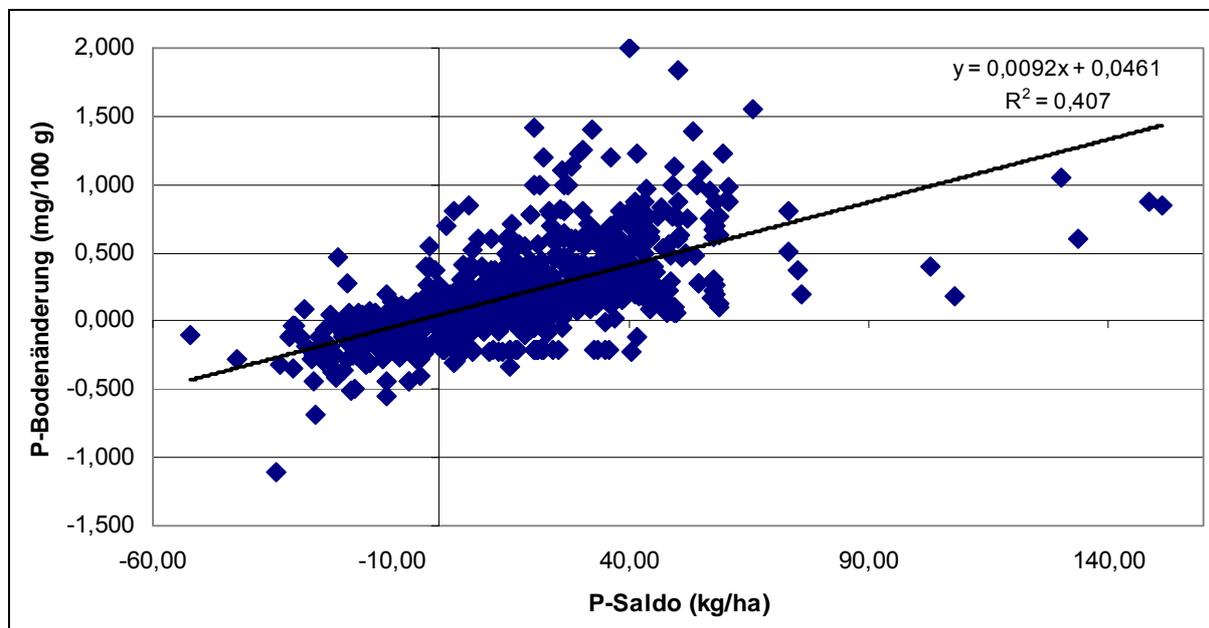


Abb. 3: Beziehungen zwischen den P-Salden und der jährlichen Veränderung der löslichen P-Gehalte des Bodens (konventionelle Dauerversuche, 601 Varianten)

Die Bewertung der DL-löslichen Bodengehalte beruht auf einer soliden Versuchsbasis. Bei einem durchschnittlichen P-Saldo um $-5,0 \text{ kg/ha}$ wird keine Bodenänderung registriert. Mit steigenden Salden ist eine fast doppelt so hohe Änderung zu erreichen, als bei den mit der CAL-Methode ermittelten Bodengehalten. Für den Aufbau des P-Düngungssystems wurde die Grundgesamtheit an Daten des Gebietes der neuen Bundesländer verwendet (Kerschberger & Marks 1974). Diese Daten beruhen auf vielen Dauerversuchen mit einer Variantenanzahl von 152 und einer hohen statistischen Sicherheit. Die Steigung B der Gleichung ist etwas geringer als die der größeren DL-Datengsamtheit (entsprechend Abb. 3) und kann daher auch als Kompromiss zwischen der DL- und CAL-Methode angesehen werden. Die Gleichung kann also für beide Methoden verwendet werden:

- Jährliche Änderung der DL-löslichen P-Gehalte (mg/100 g) = $0,013 + 0,0081 \times \text{P-Saldo (kg/ha u. a)}$ ($r^2 = 0,55^{***}$)
- $0,0 \text{ (mg P/100 g)} = -1,61 \text{ (kg P-Saldo/ha)}$.

3.3.2 Kalium

Durch die statistische Auswertung der K-Steigerungsversuche konnten folgende grundlegenden Ergebnisse etabliert werden (Tab. 4). Auch beim Kalium üben die Schlagsalden den größten Einfluss auf die Veränderung der löslichen K-Gehalte im Boden aus. Anders als beim Phosphor bestehen beim Kalium aber z.T. deutliche Einflüsse weiterer Faktoren, zudem sind Wechselwirkungen sowie nichtlineare Zusammenhänge zu beachten.

Tab. 4: Multiple Regressionsanalyse über den Einfluss von Standort- und Bewirtschaftungsfaktoren auf die jährliche Änderung der löslichen K-Gehalte (DL, CAL) aus Dauerversuchen (Varianten-Anzahl = 306)

Faktor	Modell ohne WW-Glieder		Modell mit WW-Glieder	
	Achsenabschnitt A / Steigung B	Multpl. Bestimmtheitsmaß r^2 (%)	Achsenabschnitt A / Steigung B	Multpl. Bestimmtheitsmaß r^2 (%)
(Konstante)	2,215		13,580	
WW Saldo-Bodenart			0,001330	33,3
K-Saldo (kg/ha x a)	0,003103	24,8	0,03558	1,1
K-Saldo ²			-0,000002873	18,0
Bodenart ^{*)}	0,07672	1,0	-0,268	0,3
Bodenart ² ^{*)}			0,04717	0,8
WW Saldo-Humusgehalt			0,001867	8,1
Humusgehalt (% TM)	0,183	9,9		
Humusgehalt ² (% TM)			0,009523	0,9
WW Saldo-Niederschlag			-0,00002561	7,2
Niederschlag (mm)	-0,001467	1,0	-0,001349	1,0
WW Saldo-Temperatur			-0,001691	1,4
Temperatur (°C)	-0,190	1,9	-2,723	10,4
Temperatur ² (°C)			0,145	1,1
WW Saldo-pH-Wert			-0,001615	0,5
pH-Wert ²			0,02909	0,9
K-Gehalt Versuchsanfang (mg/100 g)	-0,03119	2,7	-0,101	1,4
K-Gehalt Versuchsanfang ² (mg/100 g)			0,001666	0,9
Summe		41,3		87,3

^{*)} 1 = S; 2 = SI; 3 = IS; 4 = SL; 5 = sL; 6 = L; 7 = LT; 8 = T; 9 = M; Kein Einfluss: N-Düngung (kg/ha)

Die wichtigste Wechselwirkung besteht zwischen dem K-Saldo und der Bodenart, die bereits einen großen Anteil des Bestimmtheitsmaßes ausmacht. Mit steigenden K-Salden ist eine stetig geringer werdende Zunahme der Bodengehalte an Kalium zu erkennen (Abb. 4). Dies ist auf den leichten Böden besonders stark ausgeprägt. Ein ähnlicher Zusammenhang besteht auch zwischen den K-Salden und steigenden Niederschlägen auf die K-Bodengehalte. Aus Tabelle 4 kann darüber hinaus eine spezifische Wechselwirkung zwischen den K-Salden und den Gehalten an Humus abgeleitet werden. Mit steigenden Humusgehalten nimmt die jährliche Änderung der K-Gehalte zu.

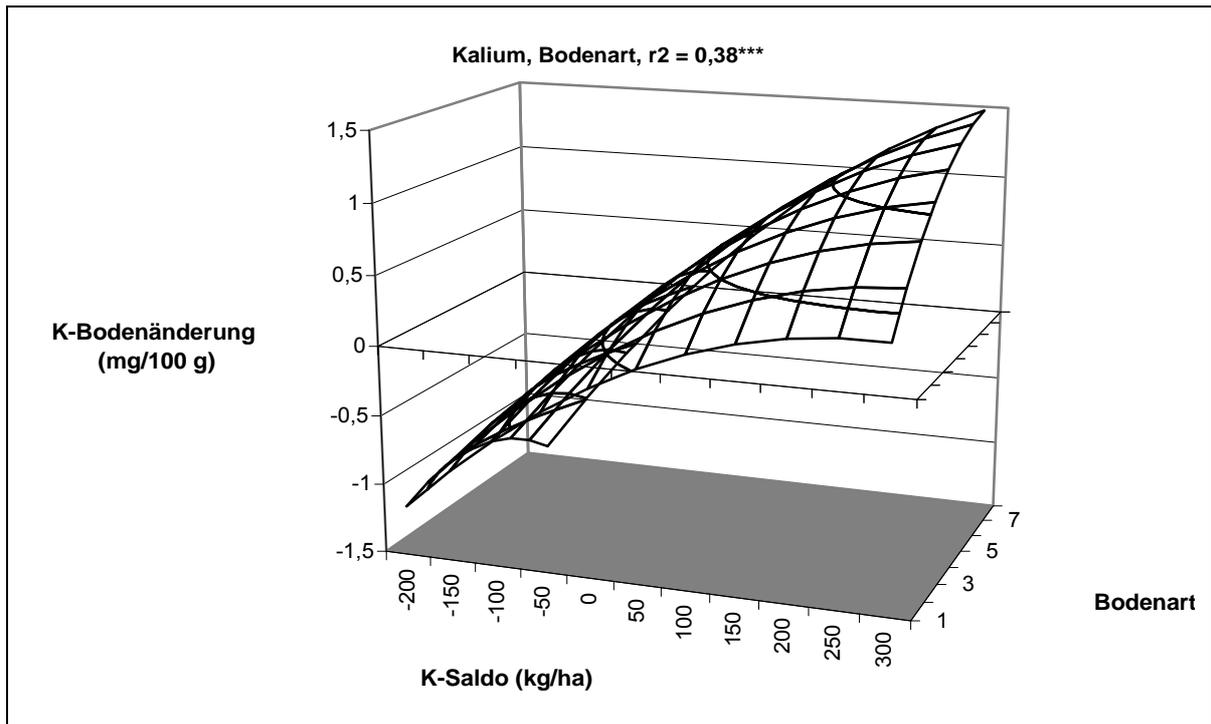


Abb. 4: Einfluss von K-Schlagbilanz und Bodenart auf die jährliche Veränderung der löslichen K-Gehalte im Boden (Bodenarten: 1 = S; 2 = SI; 3 = IS; 4 = SL; 5 = sL; 6 = L; 7 = LT; 8 = T; 9 = M)

Demzufolge ist es nicht verwunderlich, dass eine enorme Streuung der Werte vorliegt, wenn ohne weitere Differenzierung die Datengesamtheit an K-Salden den K-Gehalten des Bodens gegenübergestellt wird (Abb. 5). Der Streubereich liegt hier ungefähr zwischen -200 kg und +200 kg K-Saldo/ha. Folglich kann auf dieser Basis kein quantitatives Modell erstellt werden. Aus Tabelle 4 war bereits abzuleiten, dass eine Berücksichtigung weiterer Faktoren wichtig erscheint. Ein zweiter Hauptfaktor stellt hiernach die Bodenart dar. Dieser Faktor wird bereits mit Erfolg von dem VDLUFA verwendet, um eine bessere Differenzierung der Werte an löslichen K-Gehalten des Bodens zu erhalten (Baumgärtel et al. 1999, Albert et al. 2008). Auch diese Vorgehensweise kann jetzt durch die hier vorliegenden Auswertungen bestätigt werden.

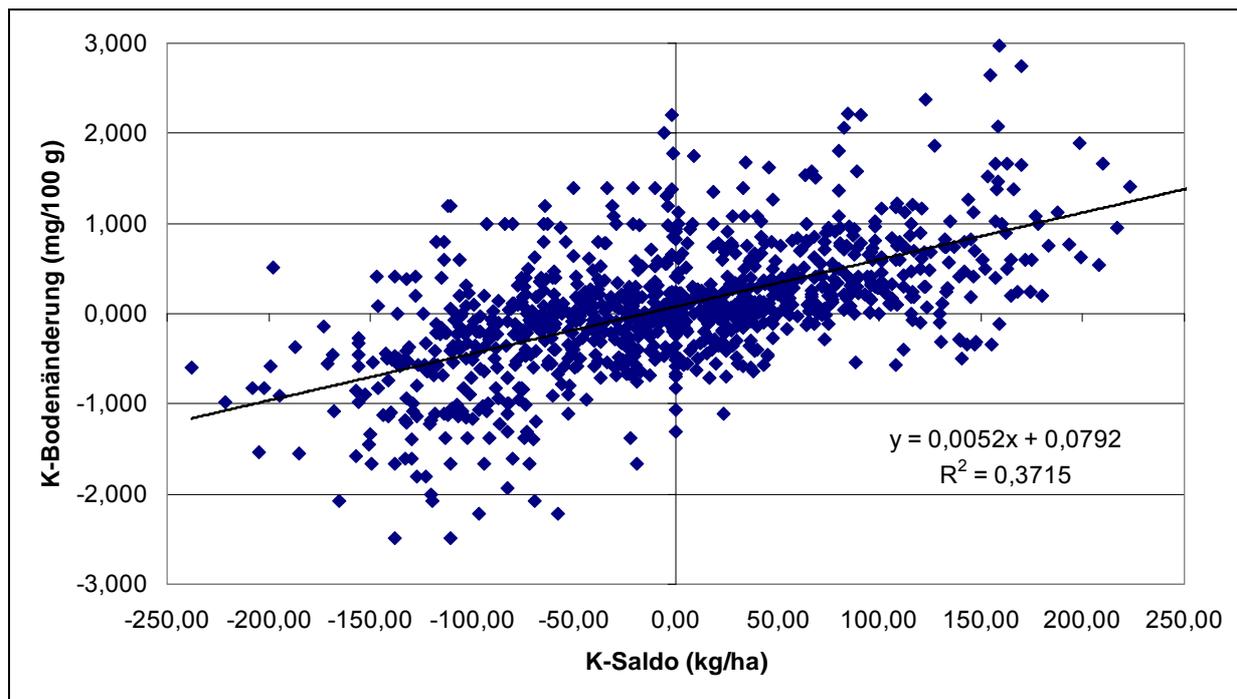


Abb. 5: Beziehungen zwischen den K-Schlagbilanzen und der jährlichen Veränderung der löslichen K-Gehalte des Bodens (konventionelle Dauerversuche, 1033 Varianten)

Tab. 5: Merkmale der linearen und quadratischen Gleichungen zwischen den K-Schlagbilanzen (kg/ha u. a) und der jährlichen Veränderung der löslichen K-Gehalte des Bodens (mg/100 g) in Abhängigkeit von der Bodenart

Bodenart	Achsenabschnitt A	Steigung B	Multipl. Bestimmtheitsmaß r^2 (%)	K-Saldo (kg/ha) bei K-Bodenänderung = 0	Varianten-Anzahl
Sand	-0,2117	0,0054x	40,4***	39	229
	-0,0754	0,0075x -0,00003x ²	52,1***	10	
anlehm. Sand, lehm. Sand	-0,0437	0,003	24,3**	15	139
	-0,0216	0,003x -0,000005x ²	24,6**	7	
stark lehm. Sand, sand. Lehm	0,2959	0,0068	45,5***	-44	348
	0,1601	0,0064x 0,00001x ²	48,8***	-26	
Lehm	0,1421	0,005	46,5***	-29	238
	0,1324	0,005x 0,000001x ²	46,6***	-27	
lehm. Ton, Ton	0,2076	0,0061	41,2***	-34	79
	0,314	0,0066x -0,000009x ²	45,2***	-45	

Durch die nach den Bodenarten getrennte Auswertung wird eine Differenzierung in der K-Dynamik des Bodens sichtbar (vgl. Tab. 5 u. Abb. 4). Zur Aufrechterhaltung der Gehalte (Bodenänderung = 0) ist ein positiver Saldo zwischen 10 kg (quadratischer Ansatz) und 39 kg K/ha (linearer Ansatz) auf Sand (siehe Abb. 6, oben) und zwischen 7 kg und 15 kg K/ha auf den anderen leichten Böden erforderlich. Nach diesen Auswertungen reicht auf den mittleren Böden dagegen bereits ein Saldo zwischen -44 und -26 kg/ha aus, um die K-Gehalte des Bodens in gleicher Höhe zu halten. Bei den schweren Böden können Werte um -28 kg auf Lehm (siehe Abb. 6, unten) und zwischen -45 kg und -34 kg K/ha auf Ton an negativen Salden vorliegen, ohne dass sich die Bodengehalte ändern. Auf den verschiedenen Bodenarten bestehen hiernach unterschiedliche Relationen zwischen den Saldowerten und der Bodenänderung, die auf nachfolgend genannten Ursachen beruhen.

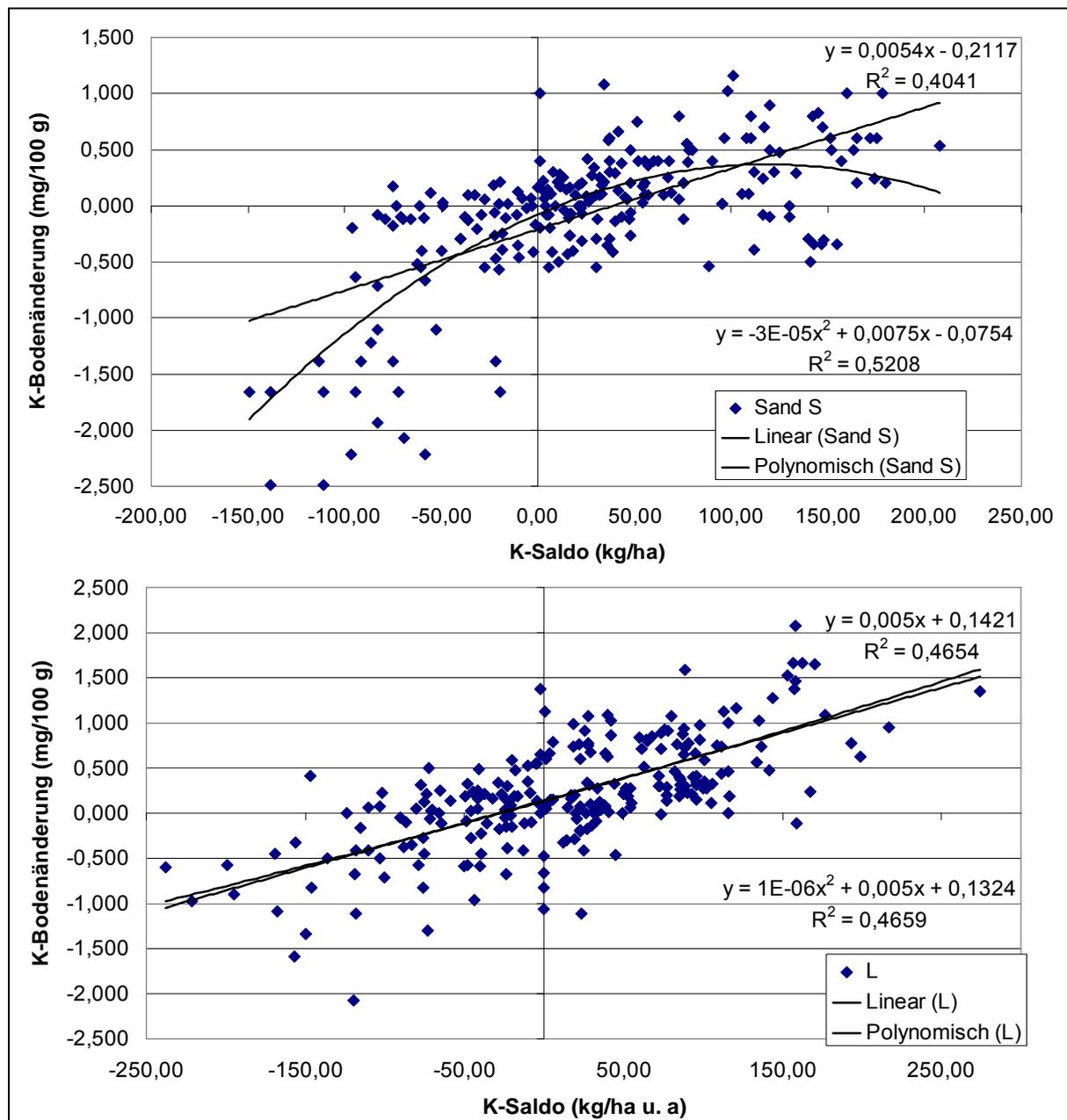


Abb. 6: Einfluss der K-Bilanz auf die jährliche K-Bodenänderung auf Sandböden (oben: konventionelle Dauerversuche, 229 Varianten) und Lehmböden (unten: konventionelle Dauerversuche, 238 Varianten)

Abbildung 7 zeigt Regressionsbeziehungen zwischen der langjährigen K-Bilanz und der jährlichen Änderung der Gehalte an pflanzenverfügbarem Kalium in einem Sandboden. Es ist zu erkennen, dass sich mit steigenden Saldowerten die Bodenänderungen ebenfalls in einem bestimmten Verhältnis verändern. Bei einem positiven Saldo von ca. 50 kg K/ha findet über die Zeit keine Änderung der Bodengehalte mehr statt (Abb. 7, rechte Gerade). Hieraus wird ersichtlich, dass auf diesem Sandboden eine erhebliche Menge an Nährstoffen durch Verlagerung und Auswaschung den Bodenhorizont verlässt.

Werden diese Nährstoffverluste experimentell ermittelt und von den Saldowerten abgezogen, so ergibt sich eine zweite Gerade, die nach links verschoben ist (Abb. 7). Es ist nun zu erkennen, dass die Salden auf diesem leichten Boden um durchschnittlich 10 – 15 kg K/ha je Jahr negative Werte annehmen können, ohne dass die Bodengehalte sich verändern. Diese Nährstoffmengen stammen sowohl aus der Nachlieferung des Bodens als auch aus noch anderen Quellen, wie der Nährstoff-Deposition die mit den Niederschlägen in jedem Jahr auf die Fläche eingetragen wird. Im Allgemeinen können daher diejenigen Saldo-Werte, bei denen keine Bodenänderungen mehr stattfinden (Bodenänderung = 0), als Nährstoff-Summen der Komponenten Auswaschung, Nachlieferung, Festlegung und Deposition angesehen werden.

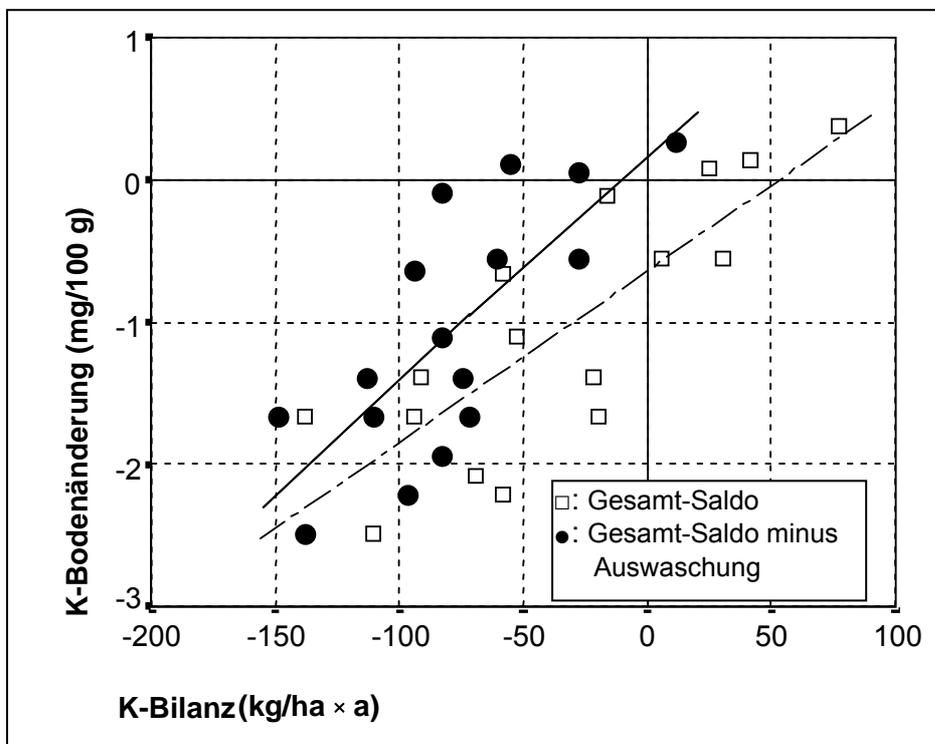


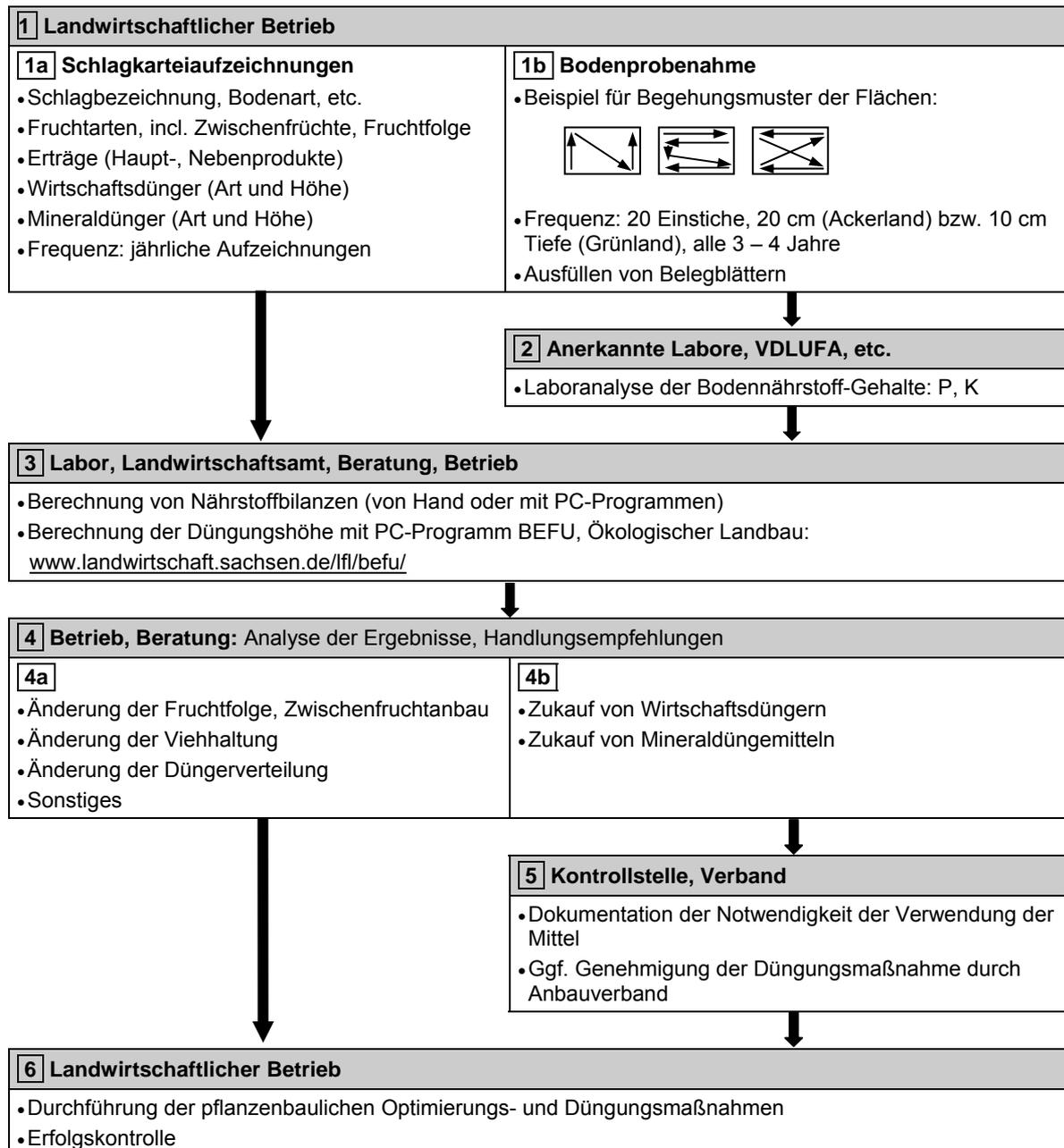
Abb. 7: Einfluss der K-Bilanz (linke Gerade: nach Abzug der Auswaschung vom Saldo; rechte Gerade: incl. Auswaschung) auf die jährliche Änderung der Bodengehalte an Kalium auf Sandböden (Daten aus Schulz 1994)

Beim Nährstoff Kalium sind diese charakteristischen Bilanz-Salden stark abhängig von der Bodenart und von dem Niveau der aufrecht zu erhaltenden Nährstoffgehalte in den Böden. Auf einem Sandboden überwiegt in der Regel die Auswaschung, es müssen also positive Bilanzsalden in einer bestimmten Höhe vorliegen, damit die gleichen Bodengehalte aufrechterhalten werden können. Auf einem Lehmboden überwiegt dagegen die Nachlieferung an Kalium. Hierbei können auch langfristig negative Schlagbilanzen vorliegen, ohne dass sich die Gehalte in der Bodenlösung ändern. Bei der Aufrechterhaltung vergleichsweise hoher Bodenwerte sind die Verluste (Auswaschung) größer und die Nachlieferung geringer (kaum Mobilisierung) zu veranschlagen, so dass die Nährstoffsalden höhere (positive) Werte annehmen müssen als bei Aufrechterhaltung entsprechend niedrigerer Bodenwerte.

3.4 Checkliste zur Bodenuntersuchung und Düngung

Um ein höheres Maß an Sicherheit auf dem Gebiet der Grunddüngung in der Praxis des ökologischen Landbaus zu erreichen, wird folgender Verfahrensweg vorgeschlagen (Tab. 6). Als erster Schritt ist die Durchführung von Schlagkarteiaufzeichnungen über die Kulturarten und Zwischenfrüchte der Fruchtfolge sowie die Erträge und Düngungsmaßnahmen für jede Fläche des Betriebes erforderlich. Diese Aufzeichnungen sind oft schon aus gesetzlichen Erfordernissen vorgeschrieben oder sie werden empfohlen (Schmidt & Klöble 2007).

Tab. 6: Checkliste zur Grunddüngung im ökologischen Landbau



3.4.1 Nährstoffbilanzierung

Auf Grund dieser Aufzeichnungen ist es dann möglich, eine Nährstoffbilanz zu erstellen (Punkt 3, Tab. 6). Der Vorteil der Nährstoffbilanzierung liegt auch darin, dass sie verhältnismäßig einfach von Hand ermittelt werden kann. Zur Eignung verschiedener Bilanzierungsformen wurden Anleitungen ausgearbeitet (Kolbe & Köhler, 2008). Damit verlässliche Werte erhalten werden, sollten grundsätzlich Bilanzen für wenigstens eine Fruchtfolge-Rotation ermittelt werden. Es können aber auch Bewertungen für die Fruchtarten in den einzelnen Fruchtfolgejahren vorgenommen werden (Tab. 7). Bei der Bilanzierung ist allerdings darauf zu achten, dass die Nährstoffe in den Materialien vollständig angerechnet werden, weil auf lange Sicht von einer annähernd 100%igen Wirkung der Nährstoffe ausgegangen werden kann.

Tab. 7: Schema zur Berechnung der Fruchtfolge-Schlagbilanz

Nährstoff-Zufuhr	Substratmenge	Nährstoffgehalte (Tabellenwerte)	Nährstoffmenge
• Vorfrüchte (Haupt-, Zwischenfrüchte, Nebenprodukte, Gründüngung)	X	=
• Wirtschaftsdünger	X	=
• Mineral-Düngemittel (Haupt- und Nebenbestandteile)	X	=

↓

Nährstoff-Abfuhr/-Entzug	Substratmenge	Nährstoffgehalte (Tabellenwerte)	Nährstoffmenge
• Hauptfrüchte (Aufwuchs bzw. Abfuhr von Haupt- und Nebenprodukten)	X	=
• Zwischenfrüchte (Aufwuchs bzw. Abfuhr)	X	=

↓

Schlagbilanz	Nährstoff-Zufuhr - Nährstoff-Abfuhr =	± Saldo (1 bis n Jahre, Fruchtfolge)
---------------------	---------------------------------------------	---------------------------------------------

Wie aus den Auswertungen zu den Dauerversuchen hervorging, können aus den Ergebnissen der Bilanzierungen bereits Hinweise für das Nährstoffmanagement entnommen werden. So kann für Phosphor empfohlen werden, dass die Salden im Betriebsdurchschnitt bzw. möglichst auf jedem Schlag mindestens einen ausgeglichenen Wert erreichen sollten. In Ausnahmen können bis zu -5 kg P/ha auf Grund weiterer P-Quellen (u.a. Deposition) toleriert werden, ohne dass im Durchschnitt eine deutliche Bodenänderung der löslichen P-Gehalte zu verzeichnen ist. Die K-Salden müssen im Zusammenhang mit der Bodenart interpretiert werden. Auf den leichten Böden sollten positive Salden von mindestens 10 – 20 kg vorliegen. Auf den schweren Böden können auch bis zu -40 kg K/ha und Jahr unter der Prämisse akzeptiert werden, dass auf Dauer keine Änderung der löslichen K-Gehalte des Bodens eintreten soll.

3.4.2 Durchführung der Grunddüngung

Auch für die Berechnung der Grunddüngung ist die lückenlose Führung von Schlagkarteiaufzeichnungen eine wichtige Voraussetzung (siehe Punkt 1a, Tab. 6). Weiterhin ist eine periodisch durchzuführende Untersuchung aller Acker- und Grünland-Schläge auf die löslichen P- und K-Gehalte des Bodens erforderlich (Punkt 1b u. 2, Tab. 6). Als nächster Schritt erfolgt die Berechnung der Düngungshöhe mit Hilfe des PC-Programms BEFU, Teil Ökologischer Landbau (www.landwirtschaft.sachsen.de/befu/). Die Düngungshöhe wird ermittelt, in dem eine Bodenausgleichsdüngerhöhe berechnet wird, von der der Nährstoffsaldo der Schlagbilanz abgezogen wird (Einzelheiten siehe Tab. 8).

Am Beispiel des Nährstoffs Phosphor soll das Prinzip des Berechnungsweges zur Ermittlung der resultierenden Düngermengen aufgezeigt werden. Auf der Grundlage der DL-Methode wurde z. B. ein Gehalt von 3 mg P/100 g auf einer Fläche ermittelt. Der Zielgehalt beträgt 4,7 mg/100 g (= Mitte der Versorgungsstufe B). Die Differenz zur Angleichung des Gehaltes auf das Niveau der Versorgungsstufe B beträgt bei einem Ansatz von 10 Jahren zur Erreichung dieses Ziels (Δy):

$$\Delta y = 4,7 - 3,0 = 1,7 \text{ mg P/100 g in 10 Jahren}$$

$$1,7 / 10 = 0,17 \text{ mg P/100 g Boden x Jahr}$$

Durch nachfolgende Gleichung kann die zu düngende P-Menge ermittelt werden:

$$\frac{\Delta y - 0,013}{0,0081} = x \text{ (kg P/ha x a)}$$

$$0,0081 = 19,4 \text{ kg P/ha x a.}$$

Diese erhaltene Menge wird mit dem Ergebnis der betreffenden Schlagbilanz verrechnet, um die jährlich zu düngende Menge an P-Düngemitteln zu erhalten (angenommenes P-Saldo = -5,0 kg/ha):

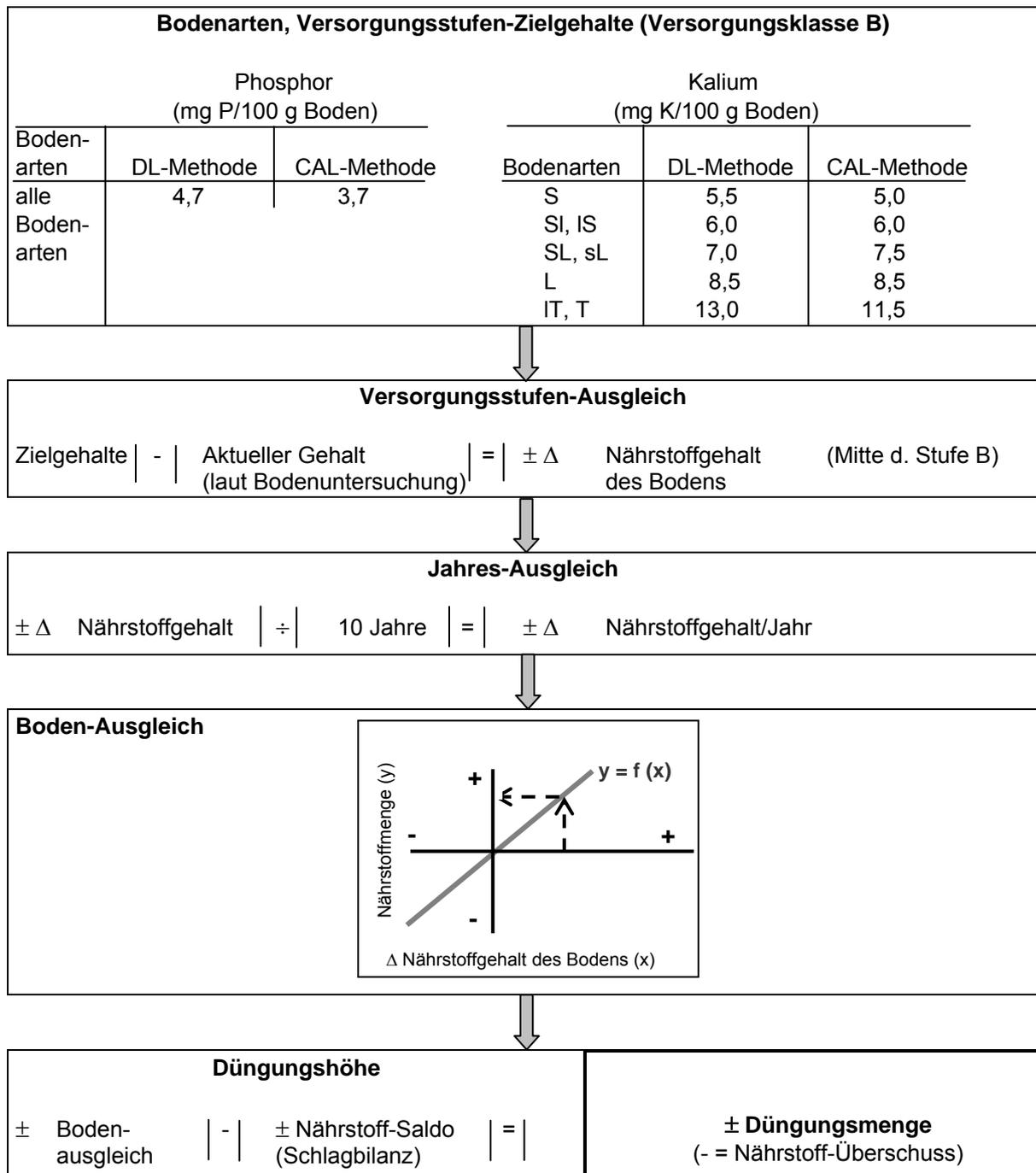
$$19,4 + 5,0 = 24,4 \text{ kg P/ha x a.}$$

Als nächster wichtiger Schritt erfolgt die Analyse der erhaltenen Untersuchungsergebnisse, die die Betriebsleitung ggf. mit Hilfe der Beratung vornehmen sollte (siehe Punkt 4, Tab. 6). Sind hohe Düngungsbeträge ausgewiesen worden, so sollte zunächst überlegt werden, ob mit gezielten innerbetrieblichen Maßnahmen eine Abhilfe erreicht werden kann (Punkt 4a, Tab. 6). So könnte z.B. mit einem intensiv betriebenen Zwischenfrucht- und Gründüngungsprogramm versucht werden, das Aufschließungspotenzial des Bodens zu verbessern.

Erst nachdem alle acker- und pflanzenbaulichen Verbesserungsmöglichkeiten ausgeschöpft worden sind, sollten Düngungsmaßnahmen mit betriebsexternen Mitteln erwogen werden (Punkt 4b, Tab. 6). Hierbei ist zunächst zu fragen, ob dies durch Zukauf von organischen Düngemitteln möglichst von anderen Öko-Betrieben geschehen kann. Erst als letzte Möglichkeit sollte ein Zukauf von mineralischen Düngemitteln ins Auge gefasst werden. Ein Zukauf ist dann in Form der zugelassenen Düngemittel entsprechend der EU-Öko-Verordnung (siehe Anon. 2008) genau zu dokumentieren, ggf. auch über den Anbau-Verband, in dem der Betrieb Mitglied ist, anzuzeigen und genehmigen zu lassen (Punkt 5, Tab. 6).

Entsprechend Punkt 6 der Checkliste sind als nächste Schritte die vereinbarten Verbesserungs- und Düngungsmaßnahmen durchzuführen. Die zusätzlichen Düngungsmaßnahmen sollten wiederum gezielt in der Fruchtfolge vorgenommen werden. Alle Hackfrüchte, besonders Kartoffeln, Feldgemüse aber auch Mais sowie Futterleguminosen-Bestände erfordern eine gute Versorgung mit Grundnährstoffen, so dass eine Düngung in einer Gabe oder in zweckmäßiger Aufteilung zu diesen Kulturen bevorzugt verabreicht werden sollte. Die Erfolgskontrolle erfolgt über eine intensive Beobachtung der Kulturbestände im Verlauf der Fruchtfolge und durch erneute Ziehung von Bodenproben und Nährstoffuntersuchungen in Abständen von 3 – 4 Jahren.

Tab. 8: Schema zur Berechnung des Boden-Ausgleichs und der Düngungshöhe



4 Schlussfolgerungen und Ausblick

- Nährstoffbilanzen und Bodengehalte von Ökobetrieben weisen oft einen negativen Trend für P und K auf
- Bei hohen Nährstoffreserven kann zunächst ein Überhang abgeschöpft werden
- Bei knappen Boden-Reserven besteht Handlungsbedarf zur Sicherung der Nachhaltigkeit
- Ein reichhaltiger Schatz an Düngungsversuchen sowie experimentell erprobten Methoden der Bodenuntersuchung und des Nährstoffmanagements stehen aus der konventionellen Landwirtschaft zur Verfügung
- Einige Methoden wurden an Hand von Versuchen für die Bedingungen des Ökolandbaus abgestimmt und weiterentwickelt:
 - + Hoftor- und Schlagbilanzierung
 - + Düngungsbemessungsverfahren
 - + System der VDLUFA-Versorgungsklassen
- Die organisch gebundenen Nährstoffe und deren Dynamik sollten zukünftig bei der Methodenentwicklung stärker berücksichtigt werden.

5 Literatur

- Albert, E., G. Baumgärtel, A. Gransee, H.-H. Kowalewsky, F. Lorenz, G. Pasda, M. Rex & H.U. von Wulffen (2008): Grunddüngung effizient gestalten. DLG-Merkblatt 349, DLG, Frankfurt/Main, http://www.dlg.org/fileadmin/downloads/merkblaetter/dlg-merkblatt_349.pdf.
- Alvermann, G. (1990): Muss ich dem Boden etwas zurückgeben? Bioland Nr. 5, 6 – 7.
- 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.
- Anonym (2008): Verordnung (EG) Nr. 889/2008 der Kommission mit Durchführungsvorschriften zur Verordnung (EG) Nr. 834/2007 des Rates über die ökologische/biologische Produktion und die Kennzeichnung von ökologischen/biologischen Erzeugnissen hinsichtlich der ökologischen/biologischen Produktion, Kennzeichnung und Kontrolle. Amtsblatt der Europäischen Union L250 vom 18.09.2008, 1 – 84.
- Balzer, F.M. (2000): Ganzheitliche standortgemäße dynamische Bodenbeurteilung. Verlag Ehrenfried-Pfeiffer, Ellenberg.
- Baumgärtel, G., K. Früchtenicht, U. Hege, J. Heyn & K. Orlovius (1999): Kalium-Düngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf. Richtwerte für die Gehaltsklasse C. Standpunkt. VDLUFA, Darmstadt, <http://www.vdlufa.de/joomla/Dokumente/Standpunkte/0-8-kalium.pdf>.
- Egner, H. & H. Riehm (1955): Die Doppellactatmethode. In: R. Thun et al.: Methodenbuch I. Neumann Verlag, Berlin.
- Friedel, J.K. (2008): Aktive Nährstoffmobilisierung und ihre Bedeutung für die Düngungspraxis im Biologischen Landbau. Umweltökologisches Symposium, Lehr- u. Forschungszentrum f. Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, Irdning, Österreich, 35 – 39.
- Harzer, N. (2006): Humus- und Nährstoffhaushalt ökologischer Betriebe und Systemversuche im Land Sachsen-Anhalt. Diplomarbeit. Universität, Halle.

- Kerschberger, M. & G. Marks (1974): Beitrag zur Ermittlung des P-Düngerbedarfs und des pflanzenverfügbaren Phosphats in Ackerböden der DDR. Dissertation A, Berlin.
- Kerschberger M., U. Hege & A. Jungk (1997): Phosphordüngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf. Standpunkt. VDLUFA, Darmstadt, <http://www.vdlufa.de/joomla/Dokumente/Standpunkte/0-4-phosphor.pdf>.
- Kinsey, N. & C. Walters (1999): Neal Kinsey's Hands-On Agronomy. Acres, Austin, USA.
- Kolbe, H. (2001): Grundlagen und praktische Anleitung zur P-, K- und Mg-Düngung im Ökologischen Landbau. Broschüre, Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Dresden, <http://www.smul.sachsen.de/landwirtschaft/download/Grundduengung.pdf>.
- Kolbe, H. (2006): Fruchtfolgegestaltung im ökologischen und extensiven Landbau: Bewertung von Vorfruchtwirkungen. Pflanzenbauwissenschaften 10, 2, 82 – 89.
- Kolbe, H. (2009): Standarduntersuchungsprogramm zu Bodenfruchtbarkeit und Nährstoffmanagement im Ökolandbau. Tagung des Arbeitskreises Versuchsansteller im Ökologischen Landbau, Uelzen, <http://orgprints.org/16444/>.
- Kolbe, H. & B. Köhler (2008): Erstellung und Beschreibung des PC-Programms BEFU, Teil Ökologischer Landbau. Verfahren der Grunddüngung, legumen N-Bindung, Nährstoff- und Humusbilanzierung. Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Heft 36, 1 - 253, <http://orgprints.org/15101/>.
- Kolbe, H., F. Rikabi, A. Albert, H. Ernst & F. Förster (1999): Ansätze zur PK-Düngungsberatung im Ökologischen Landbau. VDLUFA-Schriftenreihe 52, Kongreßband 1999, 223 – 226.
- Müller T., I. Jaffer, D. Steffens & R. Schulz (2007): Erhöht die Granulierung von Rohphosphaten mit Schwefel (Bio-Superphosphat) die P-Verfügbarkeit in Böden mit hohen pH-Werten? Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 110, 373 – 374.
- Schachtschabel, P., H.-P. Blume, G. Brümmer, K.-H. Hartge & U. Schwertmann (1989): Lehrbuch der Bodenkunde. 12. Auflage, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- Scheller, E. (1999): Pflanzenernährung und Düngung im organischen Landbau. In: I. Lünzer & H. Vogtmann: Ökologische Landwirtschaft. Pflanzenbau – Tierhaltung – Management. Springer Loseblattsysteme, med-inform Verlagsgesellschaft, Düsseldorf, 02.02, 1 – 21.
- Schmidt, H. (2007): Vergleich von Analyseergebnissen und Düngungsempfehlungen nach VDLUFA und nach Kinsey Agricultural Services. In: H. Schmidt: Untersuchung ackerbaulicher Probleme langjährig ökologisch wirtschaftender Betriebe; Kooperationsmodell Praxis – Beratung – Wissenschaft, 229 - 237. <http://orgprints.org/15767/>.
- Schmidt, R. & U. Klöble (2007): Kennzahlen für die Kontrolle im ökologischen Landbau. KTBL-Schrift 455, KTBL, Darmstadt.
- Schüller, H. (1969): Die CAL-Methode, eine neue Methode zur Bestimmung des pflanzenverfügbaren Phosphates in Böden. Z. Pflanzenern. Bodenkde. 123, 48 – 63.
- Schulz, V. (1994): Pflanzenverfügbares Kalium in norddeutschen Sandböden als Grundlage umweltschonender Kalium-Düngung von Ackerkulturen. Dissertation, Göttingen.
- Watson, C.A., D. Atkinson, P. Gosling, L.R. Jackson & F.W. Rayns (2002a): Managing soil fertility in organic farming systems. Soil Use and Management 18, 239 – 247, <http://orgprints.org/8060/>.
- Watson, C.A., H. Bengtsson, M. Ebbesvik, A.-K. Loes, A. Myrbeck, E. Salomon, J. Schroder & E.A. Stockdale (2002b): A review of farm-scale nutrient budgets for organic farms as a tool for management of soil fertility. Soil Use and Management 18, 264 – 273.
- Watson, Chr., E. Stockdale & L. Philipps (2008): Research review: Laboratory mineral soil analysis and soil mineral management in organic farming. Institute of Organic Training & Advise, Shropshire, United Kingdom, <http://orgprints.org/5981/>.