

Wie ist es um die Bodenfruchtbarkeit im Ökolandbau bestellt: Nährstoffversorgung und Humusstatus?

Dr. Hartmut Kolbe, Nossen

1. Einleitung

Die Bodenfruchtbarkeit basiert auf biologischen (Bodenleben), physikalischen (Bodengefüge) und chemischen Eigenschaften und Kennwerten des Bodens. Nur bei optimaler Ausgestaltung dieser drei Säulen der Bodenfruchtbarkeit kann das Ertragspotenzial eines Standortes voll ausgeschöpft werden. Sind einzelne Bereiche, wie die Bodenstruktur nicht in Ordnung, so hat dies auch deutlich negative Auswirkungen auf andere Kennwerte, wie z.B. eine ausreichende Nährstoffversorgung (siehe Kaselowsky 1990, BAD 2003), die ja zu den chemischen Eigenschaften der Bodenfruchtbarkeit gezählt wird.

Somit können deutliche Wechselwirkungen zwischen den Einflussgrößen auf Liebig's Gesetz vom Minimum einwirken, wonach der Ertrag von dem Faktor begrenzt wird, der am geringsten vorhanden ist. Von einer optimalen Funktionsweise und Zusammensetzung der Bodenfruchtbarkeit profitieren Anbauverfahren des Ökolandbaus in besonderem Maße, da ein Großteil der Ertragsbildung über den Umsatz der organischen Substanz getätigt wird (siehe Watson et al. 2002), Ausgleichsmaßnahmen über Gaben von leicht löslichen Düngemitteln in der Regel nicht erlaubt sind und eine Gefährdung anderer Umweltbereiche ausgeschlossen werden muss.

Laut EU-Verordnung über den Ökologischen Landbau (Anon. 2007, 2008) muss das nachhaltige Ertragsvermögen des Bodens durch lang- und kurzfristige anbautechnische Maßnahmen gesichert werden, indem die Fruchtbarkeit des Bodens erhalten bleibt und in geeigneten Fällen gesteigert wird durch:

- Förderung des Bodenlebens und der biologischen Vielfalt
- Verhinderung von Bodenverdichtungen und Erosion
- Versorgung der Pflanzen mit Nährstoffen, hauptsächlich über den Boden
- Minimierung der Verwendung von nicht erneuerbaren Ressourcen und außerbetrieblichen Produktionsmitteln
- Wiederverwertung von Abfallstoffen und Nebenerzeugnissen der pflanzlichen und tierischen Produktion
- Bevorzugung vorbeugender, regional und standortangepasster Maßnahmen.

In der praktischen Beratung und Schulung wird daher heute auf den Betrieben die Anwendung eines breiten Spektrums an Untersuchungsmethoden empfohlen, damit sowohl Aspekte der biologischen und physikalischen Eigenschaften des Bodens als auch die chemischen Eigenschaften des Nährstoffmanagements erfasst werden (siehe Kolbe & Schuster 2011; Berner et al 2012).

In den letzten Jahrzehnten wurden umfangreiche Vergleichsuntersuchungen zwischen konventionellem und ökologischem Landbau durchgeführt, in denen auch die Fruchtbarkeit des Bodens eine zentrale Stellung einnimmt (z.B. Niggli et al. 2008; Gattinger et al. 2012). Auf dem Gebiet der chemischen Eigenschaften soll an dieser Stelle zunächst auf einige zeitlich ältere Studien über Ergebnisse zur Nährstoffbilanzierung und Bodenuntersuchung aus Deutschland und dem europäischen Ausland hingewiesen werden (Diez & Weigelt 1986; Gehlen 1987; Schulte 1996; Loes & Ogaard 1997, 2003; Kolbe 2000; Lindenthal 2000; Loes 2000; Vetter et al. 2000; Watson et al. 2002; Berry et al. 2003; Quirin et al. 2006; Haas 2010; Larsson & Granstedt 2010; Friedel 2012).

In diesem Beitrag werden Ergebnisse über die Nährstoff- und Humusversorgung der Betriebe im Ökologischen Landbau aus verschiedenen Regionen Deutschlands durch Zusammenfassung vorhandener Studien mit Schwerpunkt aus den letzten 10 – 15 Jahren mitgeteilt.

2. Material und Methoden

Die Untersuchungen wurden als Betriebserhebungen, auf Dauertestflächen und anderen Flächen des Acker- und Grünlandes (ohne Unterglasanbau des Gartenbaus) incl. Verwendung von betrieblichen Aufzeichnungen aus Schlagkarteien und Stallbüchern durchgeführt. Der Untersuchungsumfang umfasste auf Flächenebene in der Regel 3 bis 6 Jahre, möglichst mindestens eine vollständige Fruchtfolgerotation oder auf Betriebsebene mindestens zwei volle Anbaujahre. Bei unvollständigen Folgen und zu geringem Datenmaterial können deutliche Ungleichgewichte in den ermittelten Nährstoffbilanzen entstehen, wodurch die betriebliche Wirklichkeit dann unvollständig abgebildet wird.

Methoden der Bodenuntersuchung:

- N_{\min} 0 – 60 cm bzw. bis 90 cm Bodentiefe (Wehrmann & Scharpf 1979)
- pH-Wert in 0,01 molarer Calciumchlorid-Lösung ($CaCl_2$) (Kerschberger et al. 2000)
- DL- bzw. CAL-lösliches Phosphat (P) und Kalium (K) (Egner & Riehm 1955; Schüller 1969)
- $CaCl_2$ -verfügbares Magnesium (Mg) (Schachtschabel 1956)
- C_{org} mit Elementaranalyse (DIN ISO 10694).

Methoden der Bilanzierung:

- legume N-Bindung: spezielle Methoden zur Eignung im Ökolandbau, weit verbreitete einfache Methoden der Ländereinrichtungen sind ungeeignet (Kolbe 2009)
- (aggregierte) Schlag-Bilanzen bzw. Hoftorbilanzen für die Nährstoffe Stickstoff (N), Schwefel (S), Phosphor (P), Kalium (K), Magnesium (Mg), entsprechend PARCOM-Richtlinie incl. Deposition an Nährstoffen (N, S) über die Atmosphäre, eventuell incl. nichtlegume N-Bindung, 100 % Anrechnung organischer Dünger, bei Hoftorbilanz eventuell abzüglich N-Stallverluste (PARCOM 1993; Kolbe & Köhler 2008), Angaben nach VDLUFA-Standpunkt sind nicht ausreichend (Baumgärtel et al. 2007), Ergebnisse bei denen die Bilanz-Komponenten nicht eindeutig dokumentiert oder zugeordnet werden konnten, sind nicht berücksichtigt worden (z.B. Schmid et al. 2012)
- Humus bzw. organische Substanz mit verschiedenen Methoden (Leithold et al. 1997; Körschens et al. 2004; Kolbe 2011)
- Anwendung von PC-Programmen zur Berechnung von legumer N-Bindung, Bilanzierung und Düngungsbemessung: BEFU, Teil ökologischer Landbau (Kolbe & Köhler 2008) oder andere Modelle und Methoden z.B. REPRO (Hülsbergen 2003).

Methoden der Ergebnisbewertung:

- Brutto-Bewertung der N- und S-Bilanzierung (incl. Deposition, etc.)
- VDLUFA-Klassifikationssystem A – E, numerische Skala: A = 1, B = 2, C = 3, D = 4, E = 5
- Ausweisung von Wertebereichen der Unterversorgung, der optimalen Versorgung und der Überversorgung (eventuell mit Handlungsbedarf).

Als ausreichend bzw. optimal wurden nachfolgende Bereiche der erfassten Merkmale angesehen:

- Leguminosenanteil in der Fruchtfolge: 25 – 35 % (Kolbe 2006)
- Humusbilanz und pH-Wert: Klasse C (Humussaldo von ± 0 bis +300 Humusäquivalente (HÄQ), Ebertseder et al. 2014), zur Orientierung können Ergebnisse von Methoden mit einer verhältnismäßig hohen Genauigkeit mit einem Faktor von HÄQ in Differenz C_{org} -Gehalt Boden (spezif. Gewicht 1,5, 0,30 m Ackerkrume) nach 20 – 30 Jahren andauernder entsprechender Bewirtschaftung umgerechnet werden: $C_{org} (\% TM) = HÄQ (kg/ha) \times 0,0005672$ (Kolbe 2013)

- Stickstoff (N): ± 0 bis +50 kg N/ha (siehe Abb. 3)
- P: -2 bis +5 kg P/ha (alle Bodenarten), und
- K: ± 0 bis +30 kg K/ha (leichte) und ± 0 bis -40 kg K (mittlere und schwere Böden) (Kolbe & Köhler 2008; Kolbe & Schuster 2011).

Vertiefte Analyse von Ergebnissen im Rahmen des F/E-Projekts „Intensivierung des Nährstoffmanagements in Ökobetrieben Sachsens“ (Schmidtke et al. in Vorbereitung):

- 32 ökologisch wirtschaftende Betriebe, 6740 ha (= ca. 36 %), 810 Ackerschläge, 393 Grünlandschläge, 6 Jahre (2006 – 2011)
- Zusätzlich: Auswertung von Rücklaufdaten von ca. 2008 Acker- und Grünlandschlägen zur Nutzung des Programms BEFU für die Bestimmung der Grunddüngung und Kalkung in Sachsen.

Verwendete Symbole und Abkürzungen:

- Länderschlüssel: BW Baden-Württemberg, BY Bayern, HE Hessen, MV Mecklenburg-Vorpommern, NRW Nordrhein-Westfalen, SA Sachsen-Anhalt, SH Schleswig-Holstein, SN Sachsen, TH Thüringen, D Deutschland
- MW Mittelwert, MIN Minimum, MAX Maximum
- Symbol ~ kennzeichnet methodenbedingte Ungenauigkeiten, Werte in Klammern () wurden zur Mittelwertbildung in den Tabellen nicht verwendet
- VDLUFA-Versorgungsklassen: A sehr niedrig, B niedrig, C mittel, D hoch, E sehr hoch.

Methoden des Nährstoffmanagements bedürfen in der Regel einer Anpassung an die spezifischen Bedingungen im Ökolandbau (siehe Kolbe & Köhler 2008). Im Bereich der Grundnährstoffe konnte an einer Serie von Versuchen aufgezeigt werden, dass auch unter den Bedingungen dieses Anbausystems verhältnismäßig enge korrelative Beziehungen bestehen zwischen den ermittelten P-, K- und Mg-Schlagsalden und der Veränderung dieser löslichen Nährstoffe im Boden. Außerdem konnte auf diesem experimentellen Wege nachgewiesen werden, dass im Allgemeinen die Versorgungsklasse B für die Erzeugung eines optimalen Ertragsniveaus ausreicht (Kolbe 2010).

Für die Nährstoffe Humus und Stickstoff werden an dieser Stelle entsprechende experimentelle Arbeiten angeführt. So konnte an einem Satz von 39 konventionellen und ökologischen Dauerversuchen aufgezeigt werden, dass zwischen den ermittelten Humussalden mit der Methode STAND und der Veränderung der C_{org} -Gehalte in den Dauerversuchen eine den Grundnährstoffen vergleichbare verhältnismäßig enge positive Korrelation besteht (Abb. 1). Die Enge der Beziehung ist dabei allerdings stark von dem Genauigkeitsniveau der verwendeten Methode abhängig (siehe Kolbe 2012a).

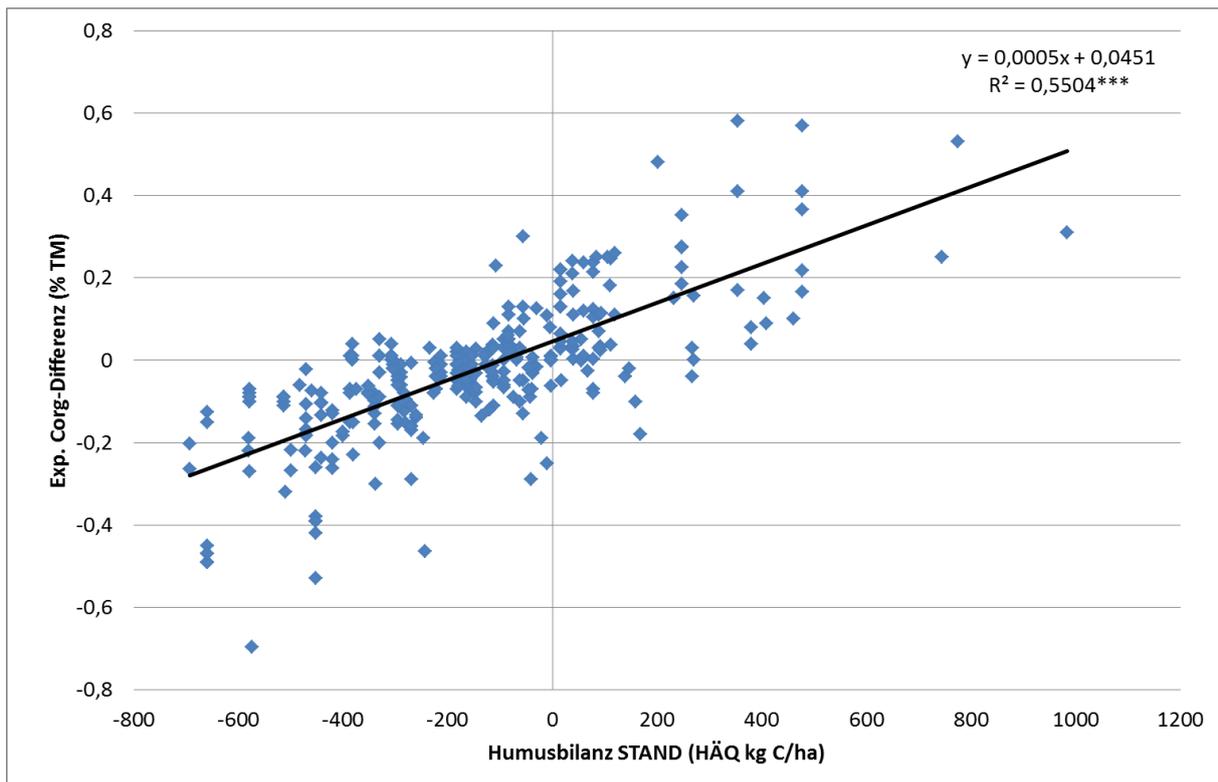


Abb. 1: Beziehung zwischen den Ergebnissen der Humusbilanzierung (Methode STAND) und den C_{org} -Gehalten ermittelt an 39 ökologischen und konventionellen Dauerversuchen (Kolbe 2012a)

Auch die Erreichung und Sicherung eines ausreichend hohen Ertragsniveaus ist abhängig von der verwendeten Methode zur Humusbilanzierung (Abb. 2). So wird bei Anwendung der VDLUFA-Methode (mittlere, obere Werte der Fruchtartenkoeffizienten) sowie von REPRO-verwandten Verfahren ein weitgehend maximales Ertragsniveau in Versorgungsgruppe C erreicht, während bei Verwendung der unteren Werte der VDLUFA- sowie der STAND-Methode ein optimales Ertragsniveau gesichert werden kann, dass heute weitgehend als anerkanntes Zielmerkmal anzusehen ist.

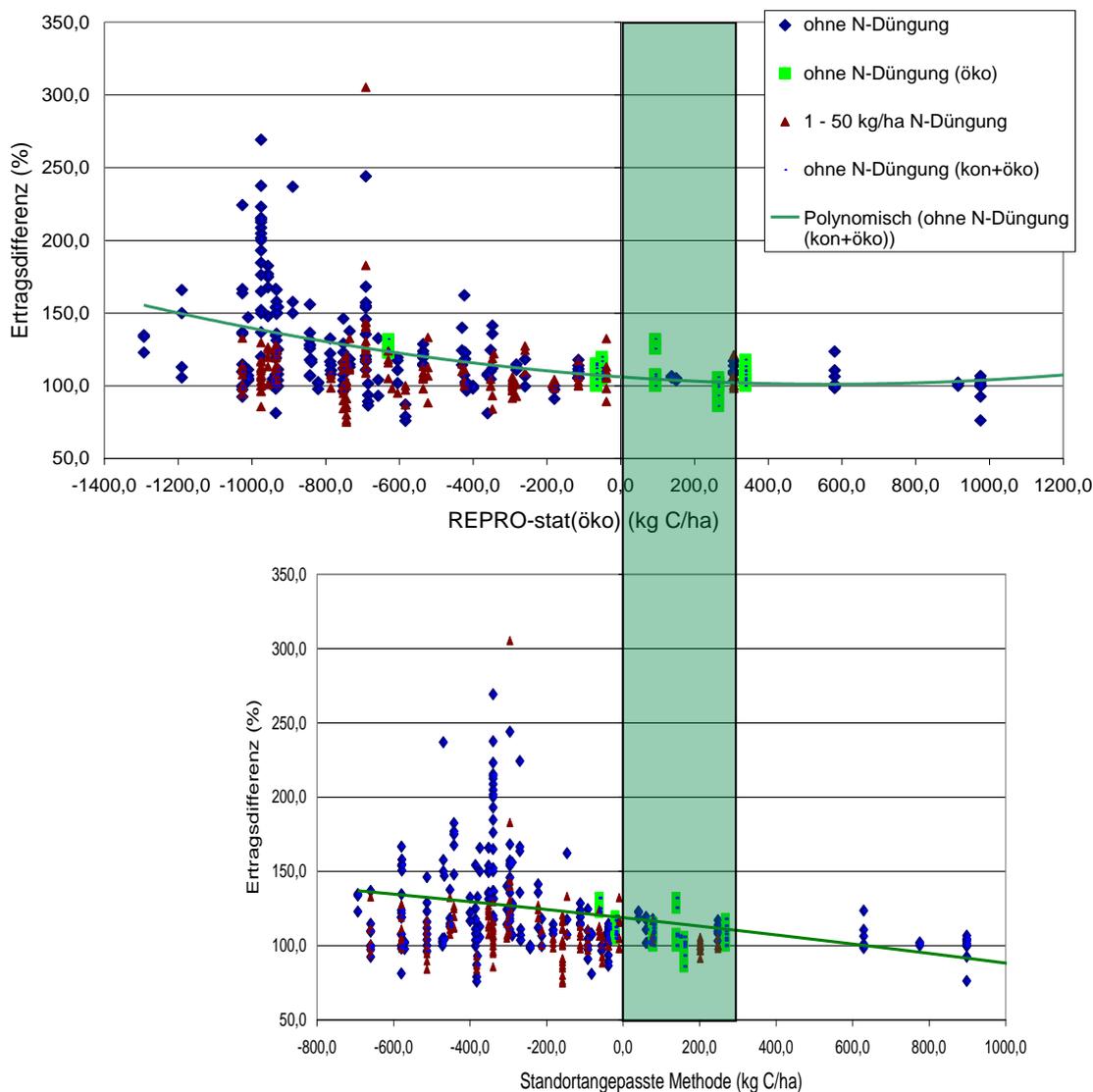


Abb. 2: Einfluss der Ergebnisse der Humusbilanzierung auf die ermittelten Ertragsdifferenzen aus 39 ökologischen und konventionellen Dauerversuchen in Versorgungsgruppe C (grün) nach Kolbe (2012a): maximales Ertragsniveau bei Anwendung der Methoden VDLUFA mittlere u. obere Werte, REPRO-stat, REPRO-dyn (geringe Genauigkeit); optimales Ertragsniveau bei Anwendung der Methoden VDLUFA untere Werte, STAND-Methode (mittlere bis hohe Genauigkeit)

Werden die erlangten Ertragsdifferenzen aus speziell ausgesuchten Dauerversuchen, die für einen Vergleich mit ökologischen Anbauverfahren geeignet sind, den berechneten N-Bruttosalden dieser Versuche gegenüber gestellt, so kann als Orientierung ebenfalls ein optimales Ertragsniveau gewährleistet werden, wenn die N-Salden in etwa in einem Bereich von 0 – 50 kg/ha liegen (Abb. 3). Bei Erlangung negativer Salden führt jede zusätzliche Düngung zu Ertragserhöhungen. Bleibt eine Düngung aus, so entstehen z.T. deutliche Ertragsverluste, während bei N-Salden von über 50 kg/ha keine Ertragsreaktionen mehr zu verzeichnen sind, die über der Versuchsstreuung liegen.

Aus diesen experimentellen Arbeiten kann zusammenfassend verdeutlicht werden, dass bei Unterschreitung dieser als ausreichend oder optimal angesehenen Versorgungsbereiche zur

Sicherung der Bodenfruchtbarkeit (Humus und pH-Wert: Klassen B und A; Grundnährstoffe: Klasse A), die Wahrscheinlichkeit deutlich ansteigt, dass empfindliche Ertragseinbußen entstehen. Das (ggf. angepasste) VDLUFA-Bewertungssystem kann daher auch mit Erfolg im Ökolandbau angewendet werden.

Erstmals kann auch eine Gegenüberstellung von experimentell ermittelten und mit dem Modell BEFU berechneten N-Salden präsentiert werden (Abb. 4). Die korrelativen Zusammenhänge zwischen ermittelten und berechneten Bilanzen liegen für die Nährstoffe N, P, K und Mg in ähnlicher Höhe (Meyer et al. in Vorbereitung). Im Teil Ökolandbau des Programms sind speziell für dieses Anbausystem zusammengestellte Parametersätze z.B. für die legume N-Bindung (Kolbe 2009), die Nährstoffgehalte der Fruchtarten (Köhler & Kolbe 2007) und organischen Düngern (Meyer et al. 2011) hinterlegt, die zunehmend in den Ländereinrichtungen angewendet werden (z.B. Albert et al. 2007; Zorn et al. 2007). Es wird deutlich, dass auch für die Erstellung von repräsentativen Nährstoffbilanzen auf die Verwendung von Programmen mit entsprechender Eignung geachtet werden sollte.

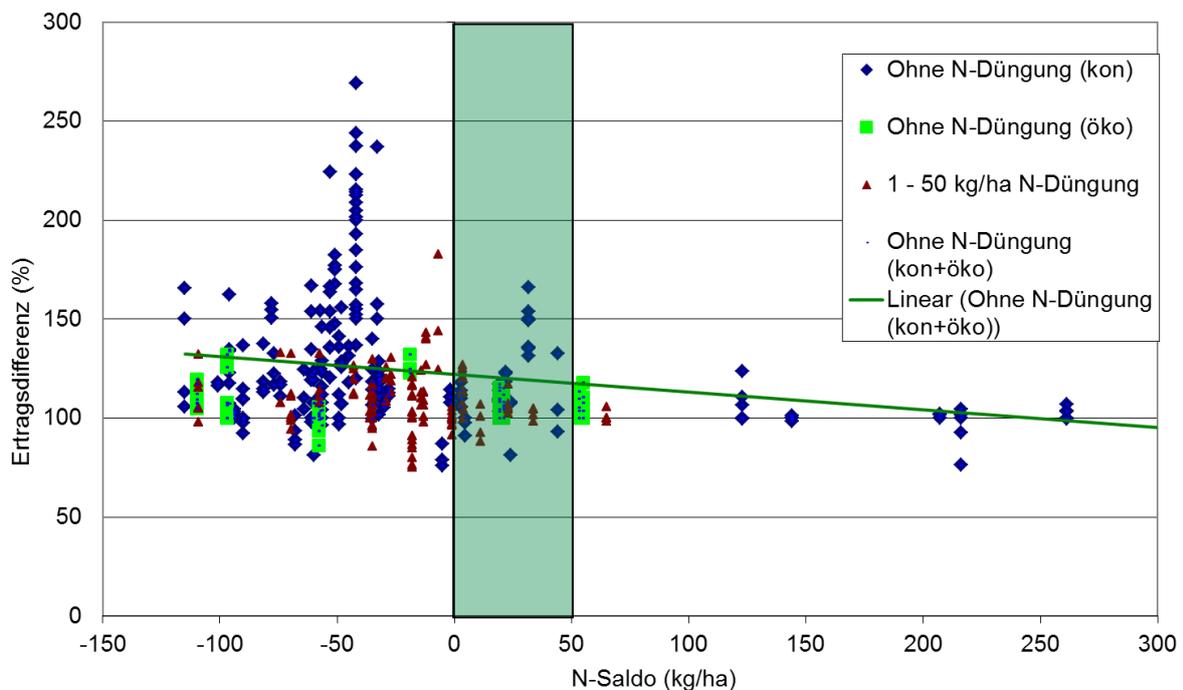


Abb. 3: Einfluss der Ergebnisse der N-Bilanzierung auf die ermittelten Ertragsdifferenzen aus 39 Dauerversuchen mit Ausweisung eines Saldobereichs zur Erzielung eines optimalen Ertragsniveaus (grün) nach Kolbe (2012a)

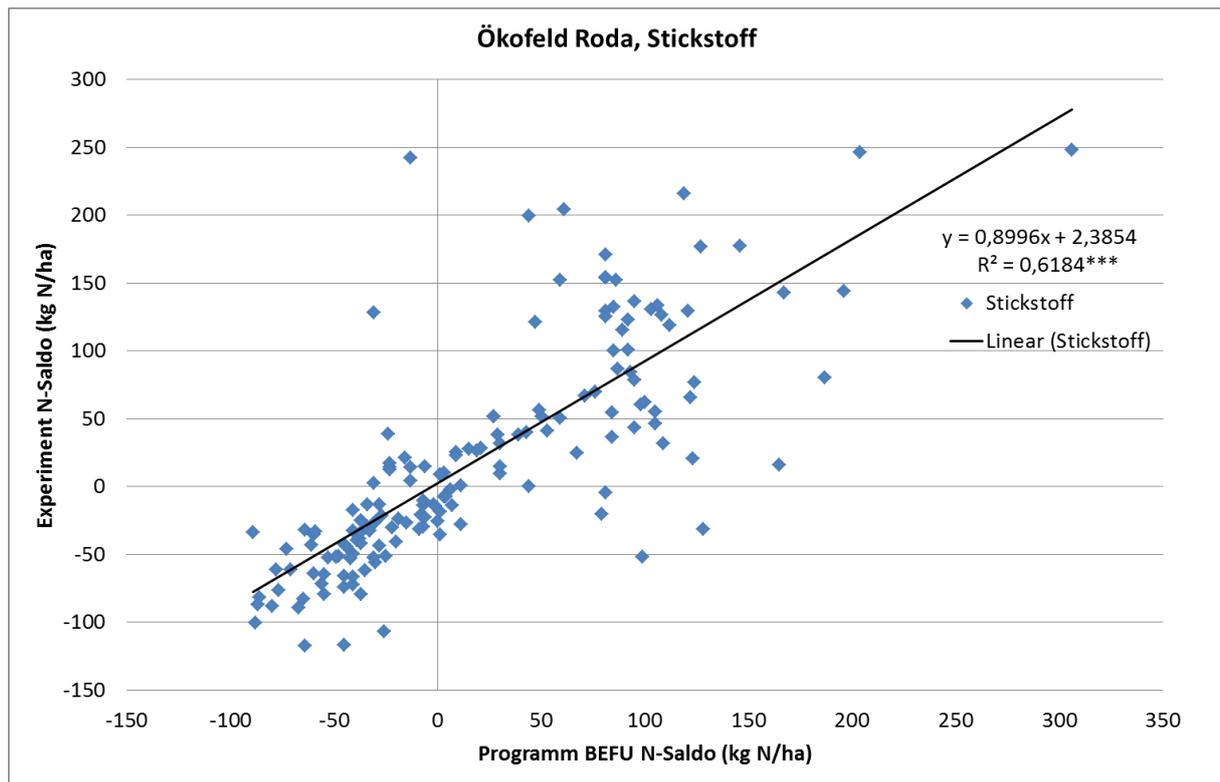


Abb. 4: Beziehungen zwischen experimentell ermittelten und mit dem Programm BEFU berechneten N-Salden am Beispiel des Ökofeldes Roda (Meyer et al. in Vorbereitung)

3. Ergebnisse

3.1 Überblick Deutschland

3.1.1 Stickstoff und organische Substanz (Humus)

Die Fruchtfolgegestaltung ist eine wichtige Basis des Nährstoffmanagements im Ökolandbau (Kolbe 2006). Dies gilt besonders für den Umfang des Leguminosenanbaus, da es eine wichtige Quelle für eine Nettozuführung von Stickstoff (N) im Ökobetrieb ist. In Deutschland liegen hierzu einige Untersuchungen vor (Tab. 1). Der Anteil an Leguminosen (Körner- und Futterleguminosen ohne Zwischenfrüchte) liegt hiernach in weiten Grenzen zwischen 13 % und 60 % der gesamten Fruchtfolgen und weist mit 33 % einen verhältnismäßig hohen Mittelwert auf. Die ermittelten absoluten Schwankungsbreiten sollten jedoch nicht überbewertet werden, da nicht aus jeder Studie klar zu erkennen war, ob die Untersuchungen jeweils genau eine typische Fruchtfolgerotation der untersuchten Flächen und Betriebe umfassen.

Tab. 1: Legume N-Bindung, organische Düngung und N-Salden (Schlag-, Hoftor-Bilanzen)

Land		BW	BY	HE	NRW	SA	SH	SN	TH	D	D	Mittelwert
Betriebe (B), Dauertestflächen (DTF), Schläge (SL) (n)		14 B (Hof-tor)	8 B (Hof-tor) 411 SL	15 B	12 B (Hof-tor)	15 B	16 B (Hof-tor)	32 B 38 DTF	25 DTF	39 B	28 B	
Legumi-nosen i. d. Fruchtfolge (%)	MW			34		26	27	38			40	33
	MIN			14		13	14	18				13
	MAX			43		35	60	55				60
Legume N-Bindung (kg N/ha u. Jahr)	MW	59	49		52	28	71	57	(~18)	50	46	52
	MIN	32	26		27	18	17	7		11	25	7
	MAX	77	114		70	53	136	100		105	114	136
Organische Dünger (kg N/ha u. Jahr)	MW	18	87		27	36	44	22	40		62	42
	MIN	0	30		10	0	0	0			3	0
	MAX	65	166		51	163	112	59			166	166
N-Saldo (kg N/ha u. Jahr)	MW	40	30	29	45	17	38	29	~13	15	10	27
	MIN	13	14	-3	8	-23	-22	-10	(-27)	-19	-13	-23
	MAX	85	65	76	82	137	104	68	40)	55	51	137
N _{min} -Differenz zu konvent. Landbau (kg N/ha)	Frühjahr							-2	-7			-5
	Nach Ernte								-26			-26
	Herbst							-22	-11			-17

Quellen: **BW:** Haas et al. (2007); **BY:** Gutser et al. (2002), Fischer (2013); **HE:** Brock et al. (2013); **NRW:** Haas et al. (2007); **SA:** Harzer (2006); **SH:** Kelm et al. (2007); **SN:** Schmidtke et al. (in Vorbereitung); Reinicke & Wurbs (2012); **TH:** TLL (2010); **D:** Hülsbergen & Schmid (2010), Schmid et al. (2013)

Die N₂-Bindung durch die angebauten Leguminosen stellt die bedeutendste N-Quelle der Betriebe dar. Die berechneten Mengen der legumen N-Bindung durch die angebauten Haupt- und Zwischenfrüchte schwanken jedoch mit 7 - 136 kg N/ha und Jahr erheblich. Auch die mittlere Zufuhr an Stickstoff schwankt bei den 8 anrechenbaren Studien zwischen 28 kg und 59 kg N (Mittelwert 52 kg N/ha und Jahr).

Als zweitwichtigste N-Quelle ist die Zufuhr an organischen Düngemitteln ermittelt worden. Je nach Betriebstyp sind hierdurch N-Zufuhren zwischen 0 kg und 166 kg N/ha zu verzeichnen. Als Mittelwert konnte eine Zufuhr von 42 kg N/ha berechnet werden. Weitere N-Quellen, wie die N-Deposition über die Atmosphäre sowie Zufuhren über Saat- und Pflanzgut, sollten nicht unerwähnt bleiben, da sie in der Regel 20 – 40 kg N/ha und Jahr ausmachen können (in Tab. 1 nicht extra ausgewiesen, aber im Saldo enthalten).

Für die Berechnung des N-Saldos konnte eine verhältnismäßig hohe Anzahl von 10 Studien aus vielen Bundesländern berücksichtigt werden, so dass ein relativ belastbares Zahlenmaterial zur Bewertung der Versorgungslage mit dem Nährstoff Stickstoff vorliegt. Die absolute Schwankung kann mit -23 kg bis +137 kg N/ha ausgewiesen werden. Die mittlere Schwankung der Studien umfasst zwischen 13 kg und 45 kg N/ha (Mittelwert 27 kg N/ha) durchgehend positive Werte, die im optimalen Versorgungsbereich für Stickstoff zu beziffern sind (siehe Kap. 2).

Im Durchschnitt von zwei Untersuchungen kann zudem angeführt werden, dass im Vergleich zur Versorgungslage im konventionellen Landbau die N_{\min} -Werte im Frühjahr lediglich um 5 kg/ha im Ökolandbau niedriger liegen, während die gemessenen N_{\min} -Mengen für die Zeit nach der Ernte und im Spätherbst, die für den Wasserschutz eine höhere Bedeutung haben, mit -26 kg bzw. -17 kg N/ha deutlich niedriger liegen als in konventionellen Vergleichsflächen.

Die Versorgung mit organischer Substanz bzw. mit Humus ist als ein wichtiger Indikator der Bodenfruchtbarkeit anzusehen, da sowohl biologische, physikalische und chemische Eigenschaften in quantitativ bedeutendem Umfang berührt werden (Kolbe 2012a). Besonders im Ökolandbau ist der Umsatz an organischer Substanz als wichtiges Regulativ für die Ertragsbildung anzusehen. Im Gegensatz zur direkten Verwendung der Humusgehalte des Bodens ist die Berechnung von Humusbilanzen zudem als ein wesentlich geeigneteres Merkmal anzusehen, um die Versorgungslage mit umsetzbarer organischer Substanz auf den Ackerflächen zu erfassen.

In Tabelle 2 sind 4 verschiedene Studien zur Humusbilanzierung aus den letzten 10 Jahren zusammengefasst worden. Auch unter Beachtung, dass die Analysen mit z.T. deutlich unterschiedlichen Methoden durchgeführt worden sind, kann wiederum eine enorme Streubreite der Ergebnisse abgeleitet werden. Da aber die Erfassungsgenauigkeit der Fruchtfolgesequenzen nicht abschließend beurteilt werden kann, sollte auch hier die absolute Streubreite nicht überbewertet werden. Als mittlere Werte sind demzufolge nur positive Salden mit einem Gesamtmittelwert von 142 Humusäquivalenten (HÄQ) berechnet worden, was im mittleren Bereich der optimalen Versorgungsstufe C liegt (siehe Kap. 2).

Gegenüber einem standorttypisch durchschnittlichen Niveau an Vorbewirtschaftung kann hierdurch dann ein Trend in der Veränderung der Humusgehalte von ungefähr +0,08 % C_{org} berechnet werden (siehe Kap. 2). Bisherige experimentelle Analysen zwischen konventioneller und ökologischer Bewirtschaftung kommen unter den Verhältnissen der praktischen Landwirtschaft mit +0,07 % C_{org} (+0,03 % bis +0,14 %) zu ähnlich hohen Werten. Mit fortschreitender Dauer ökologischer Bewirtschaftung nimmt der Abstand im C_{org} -Gehalt sowie in verwandten Poolgrößen des C- und N-Umsatzes anscheinend noch etwas zu (Friedel & Gabel 2001).

Aus der relativen Zuordnung der Versorgungstufen geht hervor, dass 45 % der Flächen bzw. der Betriebe eine optimale Versorgung mit organischer Substanz aufweisen. Ergebnisse mit deutlicher Unter- und Überversorgung mit organischer Substanz kommen nur selten vor. Insgesamt ist die Versorgungslage daher als recht gut anzusehen.

Tab. 2: Humus-Schlagbilanzen und Versorgungsstufen mit organischer Substanz

Land		BY	HE	SN	SN	D	D	Mittelwert
Betriebe (B), Dauertestflächen (DTF) (n)		79 DTF	15 B	28 DTF	32 B	49 B	28 B	
Humus-Saldo (kg HÄQ/ha u. Jahr)	MW		~104	138	217		~109	142
	MIN		-191	-71	-111		-340	-340
	MAX		635	817	502		925	925
Versorgungs- stufen Humusbilanz (%)	A		0	10	2	0		3
	B		9	18	6	2		9
	C		48	42	49	39		45
	D		33	19	25	49		31
	E		10	11	18	10		12
C_{org}-Differenz zu konvent. Landbau (% TM)		+0,06 +0,14		+0,03 +0,05				+0,07
Quellen: BY: Capriel (2006, 2010); HE: Brock et al. (2013); SN: Kolbe (2012b); Schmidtke et al. (in Vorbereitung); D: Breitschuh & Gernand (2010), Schmid et al. (2013)								

3.1.2 Grundnährstoffe P, K und Mg

Im letzten Jahrzehnt hat sich der Analysenumfang auf den Betrieben verbessert, so dass auf Grund der Anzahl an Untersuchungen eine verhältnismäßig sichere Einschätzung der Versorgungslage mit Grundnährstoffen des Acker- und auch des Grünlandes gelingen kann. Für den Nährstoff Phosphor liegen bis zu 7 Studien über Arbeiten zur P-Bilanzierung und zur Bodenuntersuchung an DL- oder CAL-löslichem Phosphat vor (Tab. 3).

Tab. 3: P-Bilanzen und -Bodenversorgungsklassen

Land		BW	BY	BY	MV	NRW	SA	SN	TH	TH	Mittelwert
Betriebe (B), Dauertestflächen (DTF), Schläge (SL) (n)		14 B (Hofator)	8 B (Hofator)	33 B	ca. 3033 SL	12 B (Hofator)	15 B	32 B	15 DTF	15 DTF	
		131 SL	411 SL			80 – 99 B					
Ackerland	MW	-3	-8	-4		-2	-6	-9			-5
P-Saldo (kg P/ha u. Jahr)	MIN	-14	-10	-15		-6	-16	-16			-16
	MAX	4	-2	8		1	26	2			26
Ackerland	A	30	7		7	5		11	17	14	13
Klassen P-Gehalt (%)	B	25	25		38	18		37	21	25	27
	C	39	46		34	46		26	29	30	36
	D	4	14		15	28		19	21	13	16
	E	2	8		6	3		7	12	18	8
Grünland	A				17	3		44			21
Klassen P-Gehalt (%)	B				40	20		25			28
	C				20	58		11			30
	D				12	18		9			13
	E				11	1		11			8

Quellen: **BW:** Haas et al. (2007), Mokry & Recknagel (2013); **BY:** Gutser et al. (2002), Hege et al. (2003), Fischer (2013); **MV:** Kape 2015; **NRW:** Haas et al. (2007), Leisen (2013); **SA:** Harzer (2006); **SN:** Schmidtke et al. (in Vorbereitung); **TH:** Zorn (2007), Wagner & Zorn (2013)

Bei den P-Salden liegt die absolute Schwankungsbreite zwischen -16 kg und +26 kg P/ha und Jahr. Alle mittleren Werte der Bundesländer liegen im negativen Bereich zwischen -9 kg und -2 kg P/ha (Mittelwert -5 kg P/ha und Jahr). Da im Ökolandbau in der Regel die Versorgungsklasse B für Acker- und Grünland als optimal auszuweisen ist (siehe Kap. 2) ist die durchschnittliche Versorgungslage mit pflanzenverfügbarem Phosphat noch als relativ günstig anzusehen. Auf Grund der hohen Anteile der Klassen C - E zwischen 50 % und 60 % kann auf vielen Flächen für Acker- und Grünland noch ein bedeutender Teil an Bodennährstoffen aus der vorausgehenden konventionellen Aufdüngungs-Phase abgeschöpft werden.

An den verhältnismäßig hohen Anteilen der Gehaltsklasse A zwischen 13 % auf Ackerschlägen und von sogar 21 % auf Grünland kann jedoch aufgezeigt werden, dass Ertragsausfälle auf Grund einer zu niedrigen P-Versorgung bereits relativ weit verbreitet sein müssen. Besonders der hohe Anteil von 30 % der bisher untersuchten Ackerschläge in Klasse A im Bundesland Baden-Württemberg (BW) ist hierbei bedenkenswert.

Die erfassten Grünlandflächen des Landes Nordrhein-Westfalen (NRW) stammen anscheinend aus überwiegend relativ intensiv geführten Betrieben mit verhältnismäßig hohen Anteilen in den Klassen B bis D, während in Sachsen (SN) ein eher extensiv geführtes Grünland (z.B. mit Mutterkuhhaltung) mit hohen Anteilen in der Klasse B und sogar mit 44 % in der Klasse A auszuweisen sind. Aus

Mecklenburg-Vorpommern (MV) wurden nur die Schläge auf Mineralböden eingerechnet. Der Datenumfang auf Moorböden beträgt weitere 475 Schläge auf denen ebenfalls ein hoher Anteil von 36 % eine sehr niedrige Versorgung der Klasse A aufweisen (36 % B, 19 % C). Auf Grund einer relativ ungünstigen Versorgungslage und den durchweg z.T. deutlich negativen P-Salden kann eine weitere Abnahme der Bodenversorgung mit P vorausgesagt werden.

Auch die K-Versorgung der landwirtschaftlichen Betriebe kann auf einer Basis von jeweils 7 Studien recht gut eingeschätzt werden (Tab. 4). Aus einem Unterschied in den absoluten Werten zwischen dem kleinsten und dem größten Saldo von über 200 kg K/ha und der Mittelwerte der Länder zwischen -38 kg K/ha und +2 kg K/ha und Jahr kann zunächst wiederum eine verhältnismäßig heterogene Versorgungslage abgelesen werden. Da die meisten Untersuchungen von Regionen mit mittleren bis schwereren Böden stammen, liegt sowohl der Schwankungsbereich als auch der Mittelwert auf Ackerland von -14 kg K/ha im optimalen Versorgungsbereich, da auf diesen Böden eine erhebliche Nachlieferung zu verzeichnen ist (Kolbe 2010). Aus den wenigen vorliegenden Analysen auf den leichteren Böden hingegen führen aber negative Saldowerte mit der Zeit zu einer Abnahme des pflanzenverfügbaren Kaliums im Boden, weil einerseits eine geringe Nachlieferung und andererseits eine erhöhte Verlagerung und Auswaschung zu erwarten sind.

Aus der relativen Verteilung der Gehaltsklassen kann bisher eine sehr gute Versorgungslage mit DL- bzw. CAL-löslichem Kalium fixiert werden, was z.T. auf die geogen bedingten reichhaltigen K-Gehalte der besseren Böden und eine Jahrzehnte andauernde Aufdüngung mit Kalium zurückgeführt werden kann. So liegen die Anteile der Klassen C – E auf Ackerland bei über 65 % und auf Grünland sogar bei 70 % der gesamten Flächen. Dagegen sind die mittleren Werte der Versorgungsklasse A mit 7 % (Ackerland) und 8 % (Grünland) als noch relativ unbedeutend anzusehen. Lediglich für Baden-Württemberg (BW) wurden ein Anteil von 28 % der Flächen in Klasse A und nur sehr geringe Anteile in Klassen D und E ausgewiesen, was wahrscheinlich auf Ökobetriebe mit relativ langer Laufzeit und/oder auf leichtere Bodenarten hinweist. Ebenfalls in Mecklenburg-Vorpommern (MV) liegt der A-Anteil auf Grünland der Mineralböden bereits bei 19 %. Auf Moorböden des Grünlandes liegt dieser Anteil sogar bei 53 % in Klasse A, 24 % in Klasse B und 13 % in Gehaltsklasse D (in Tab. 4 nicht aufgeführt).

Tab. 4: K-Bilanzen und -Bodenversorgungsklassen

Land		BW	BY	BY	MV	NRW	SA	SN	TH	TH	Mittelwert	
Betriebe (B), Dauertestflächen (DTF), Schläge (SL) (n)		14 B (Hofator)	8 B (Hofator)	33 B	ca. 3033 SL	12 B (Hofator)	15 B	32 B	15 DTF	15 DTF		
		131 SL	411 SL			80 – 99 B						
Ackerland	MW	2	-17	-18		-1	-13	-38			-14	
	K-Saldo (kg K/ha u. Jahr)	MIN	-8	-46	-56		-13	-64	-84			-84
		MAX	15	11	11		10	134	28			134
Ackerland	A	28	2		6	1		10	0	3	7	
	Klassen K-Gehalt (%)	B	33	13		29	23		29	33	26	27
		C	32	51		41	59		29	21	29	37
		D	4	23		21	16		24	17	20	18
		E	3	11		3	1		8	29	22	11
Grünland	A				19	0		4			8	
	Klassen K-Gehalt (%)	B			23	11		32			22	
		C			27	60		29			38	
		D			21	28		22			24	
		E			10	1		13			8	

Quellen: BW: Haas et al. (2007), Mokry & Recknagel (2013); BY: Gutser et al. (2002), Hege et al. (2003), Fischer (2013); MV: Kape 2015; NRW: Haas et al. (2007), Leisen (2013); SA: Harzer (2006); SN: Schmidtke et al. (in Vorbereitung); TH: Zorn (2007), Wagner & Zorn (2013)

Im Bereich der Magnesiumversorgung liegt bisher nur eine Studie aus Sachsen vor, in der eine Mg-Bilanzierung durchgeführt worden ist (Tab. 5). Der Bilanzbereich auf den Flächen schwankt zwischen -10 kg und +90 kg Mg/ha und es konnte ein Mittelwert von 11 kg Mg/ha und Jahr ausgewiesen werden. Oft beruhen verhältnismäßig hohe Zufuhren auf Maßnahmen zur Kalkung mit Mg-haltigen Kalkdüngemitteln. Die Versorgung des Bodens mit CaCl₂-löslichem Magnesium ist nach den vorliegenden Ergebnissen aus 6 Studien bisher auf Acker- und Grünland als sehr gut zu bezeichnen, da eine Unterversorgung kaum eine Rolle spielt und im Ökolandbau ebenfalls nach bisherigen Erkenntnissen die Klasse B als optimal anzusehen ist. Lediglich auf den (leichteren) Böden Mecklenburg-Vorpommerns (MV) sind bereits etwas erhöhte Werte in der Gehaltsklasse A im Acker- und Grünland zu registrieren. In Sachsen (SN) und Mecklenburg-Vorpommern (Moorböden) werden demgegenüber mit 76 % sehr hohe Anteile in Gehaltsklasse E ausgewiesen.

Tab. 5: Mg-Bilanzen und -Bodenversorgungsklassen

Land		BW	MV	NRW	SN	TH	TH	Mittelwert
Betriebe (B), Dauertestflächen (DTF), Schläge (SL) (n)		131 SL	ca. 3033 SL	80 – 99 B	32 B	15 DTF	15 DTF	
Ackerland	MW				11			11
Mg-Saldo (kg Mg/ha u. Jahr)	MIN				-10			-10
	MAX				90			90
Ackerland Klassen Mg-Gehalt (%)	A	1	13	0	3	0	0	1
	B	28	37	3	10	13	5	12
	C	46	26	22	15	17	16	23
	D	17	14	44	26	12	20	24
	E	8	10	31	46	58	59	40
Grünland Klassen Mg-Gehalt (%)	A		9	3	1			4
	B		31	14	1			15
	C		18	31	3			18
	D		16	23	19			19
	E		26	29	76			44

Quellen: BW: Mokry & Recknagel (2013); MV: Kape 2015; NRW: Leisen (2013); SN: Schmidtke et al. (in Vorbereitung); TH: Zorn (2007), Wagner & Zorn (2013)

3.1.3 pH-Wert und Kalkversorgung

Auch dem pH-Wert und der Kalkversorgung des Bodens kommt, ähnlich dem Humus, eine quasi übergeordnete Bedeutung zu, da ebenfalls viele Eigenschaften der Bodenfruchtbarkeit betroffen sind (siehe Stöven & Schnug 2005). Daher wird auch im Ökolandbau die Bodengehaltsklasse C als optimal angesehen. Über den pH-Wert des Bodens liegen 7 Studien aus verschiedenen Bundesländern vor, so dass auch zu diesem Merkmal eine verhältnismäßig verlässliche Bewertung der Versorgungslage ermöglicht wird (Tab. 6).

Aus den Ergebnissen der Bodenuntersuchung lässt sich zunächst ableiten, dass 41 % der Acker- und 34 % der Grünlandflächen über optimale pH-Werte verfügen. Zwischen 26 % und 35 % der Flächen weisen sogar über hohe bis sehr hohe Werte auf. Im Gegensatz hierzu betragen die Anteile mit niedrigen (Klasse B) bis sehr niedrigen (Klasse A) pH-Werten auf Ackerland 33 % und auf Grünland 31 %. In Nordrhein-Westfalen (NRW) liegt dieser Anteil auf Ackerland sogar bereits bei fast 70 % der untersuchten Flächen bzw. Betriebe.

Auf Grund dieser Untersuchungsergebnisse können negative Auswirkungen auf etliche Bereiche der Bodenfruchtbarkeit, wie der Bodengare und der Verfügbarkeit an bestimmten Nährstoffen, erwartet werden, so dass bereits auf einem verhältnismäßig großen Flächenanteil die Ertragsstabilität der Fruchtarten gefährdet erscheint. Entlastend kann jedoch vermerkt werden, dass der Anteil mit sehr niedrigen pH-Werten der Klasse A mit 5 % noch verhältnismäßig gering ist.

Tab. 6: pH-Wert und -Versorgungsklassen

Land		BW	BY	MV	NRW	SN	TH	TH	Mittelwert
Betriebe (B), Dauertestflächen (DTF), Flächen (FL) (n)		131 SL	411 SL (viehlos)	Ca. 3033 FL	80 – 99 B	32 B	15 DTF	15 DTF	
Ackerland	A	5	} 26	1	17	3	4	1	5
	B	29		22	52	30	21	16	28
	C	53	31	41	29	54	42	40	41
	D	13	} 43	22	1	13	25	29	20
	E	0		14	1	0	8	16	6
Grünland	A			1	10	4			5
	B			19	31	28			26
	C			35	35	32			34
	D			17	18	33			23
	E			28	6	3			12

Quellen: BW: Mokry & Recknagel (2013); BY: Fischer (2013); MV: Kape 2015; NRW: Leisen (2013); SN: Schmidtke et al. (in Vorbereitung); TH: Zorn (2007), Wagner & Zorn (2013)

3.2 Vertiefung am Beispiel Sachsen

3.2.1 Aggregierte Schlagbilanzen

In den untersuchten 32 landwirtschaftlichen Betrieben aus dem Bundesland Sachsen wurden an insgesamt 1200 Acker- und Grünlandschlägen sowohl die Nährstoffbilanzen als auch die Nährstoffversorgung des Bodens untersucht (Schmidtke et al. In Vorbereitung). Als aggregierte Schlagbilanzen gewährleisteten die Untersuchungen einen Überblick über die Zufuhren, Abfuhren und Salden für die Nährstoffe N, P, K, Mg und erstmals auch für S, sowie eine Aufschlüsselung der Ergebnisse der Humusbilanzierung in die Zufuhrgrößen an organischen Düngemitteln und die Summen aus den Humusmehrern und –zehrern der angebaute Fruchtarten der Fruchtfolgen. Da die sonstigen Zufuhren über die Deposition etc. für die Nährstoffe P, K und Mg nur im Bereich 1 – 3 kg Reinnährstoff je Hektar anzusiedeln sind, wurden diese Zufuhrgrößen außeracht gelassen, da sie zur Beurteilung der Bilanzen kaum ins Gewicht fallen.

Nach diesen Ergebnissen kann z.B. für den Nährstoff Stickstoff aufgeführt werden, dass auf Grund der relativ hohen Bedeutung der sonstigen Zufuhren kaum negative Salden berechnet werden. Dieses Ergebnis ist umso bedeutender, da in der Regel die N-Versorgung auch im Ökolandbau für die Ertragsbildung als weitgehend begrenzender Nährstofffaktor anzusehen ist (Berry et al. 2002). Die auf Grundlage dieser Angaben berechneten mittleren Nährstoffeffizienzen (ohne N-Bodenänderung) aus den aggregierten Schlagbilanzen kann im Ackerbau unter Einschluss aller Betriebe mit einem relativ hohen Wert von 75 % beziffert werden, der auch in anderen Arbeiten oft als typisch für die ökologische Wirtschaftsweise umschrieben wurde (Kolbe, 2000). Bei überwiegender Milchviehhaltung konnten durch die Untersuchungen von HAAS et al. (2007) und Vetter et al. (2007)

mit ca. 45 % an N-Effizienz entsprechend der Hoftorbilanz das andere Ende der N-Verwertung im ökologischen Landbau fixiert werden.

Die auf diesem Weg berechneten Effizienzwerte für die anderen Nährstoffe bedürfen einer individuellen Betrachtung, die an dieser Stelle nur angedeutet werden kann. So werden für K durch z.B. die nicht angerechneten Zufuhren aus dem Bodenfonds extrem hohe Werte von weit über 100 % oder für Mg bzw. S durch Zufuhren über Düngemittel für die Kalkung (Mg) bzw. in Form einer Zufuhr als Deposition (S) stark erniedrigte Effizienzwerte berechnet. Die positiven Nährstoffsalden für S sind in der Vergangenheit weitgehend von den S-Zufuhren über die Atmosphäre abhängig gewesen. Diese Zufuhren sind mit der Zeit aber so deutlich zurückgegangen, so dass heute in Verbindung mit der relativ hohen S-Auswaschung im Ökolandbau zunehmend negative Salden und bei sensiblen Fruchtarten (Raps, Futterleguminosen) S-Mangel verstärkt auftreten können (Eriksen 2010; Becker et al. 2011, 2013).

Insgesamt wird aus diesen Untersuchungen deutlich, dass die Nährstoffe durch ganz individuelle Zufuhr-Abfuhr-Kombinationen gekennzeichnet sind, so dass jedem Nährstoff eine eigene Betrachtung und Beurteilung zukommen muss. Lediglich ein Vergleich des Nährstoffs Stickstoff mit den Ergebnissen der Humusbilanzierung deutet auf eine gleichgesinnte oder ähnliche Wirkungsweise hin. Aus beiden Ergebnissen können eine Versorgungslage im optimalen Bereich zur Erzeugung angemessen hoher Erträge sowie positive Wirkungen auf die Bodenfruchtbarkeit, Nachhaltigkeit und auch im Umweltschutz abgeleitet werden.

Tab. 7: Aggregierte Acker-Schlagbilanzen von 32 Ökobetrieben aus Sachsen (kg Reinnährstoffe bzw. Humusäquivalente (HÄQ) je ha u. Jahr)

	N	P	K	Mg	S	HÄQ
Zufuhr						
Organische und mineralische Düngung	22	6	33	20	4	80
Symbiotische N-Bindung	54					
Sonstige Zufuhr Deposition, asymbiotische N-Bindung, Saat- und Pflanzgut	40				8	
Summe Humusmehrer und -zehrer						137
Abfuhr						
Ernteprodukte	87	14	71	9	5	
Saldo						
Mittelwert	29	-9	-38	11	7	217
Minimum	-10	-16	-84	-10	0	-111
Maximum	68	2	28	90	16	502

Diese Verbundenheit zwischen beiden Merkmalen geht auch aus den nachfolgend aufgeführten Diagrammen hervor (Tab. 7, Abb. 5). Zu den Ergebnissen tragen maßgebend der Umfang im Leguminosenanbau (insbesondere an Futterleguminosen) bei, die als ausgesprochene Humusmehrer

auszuweisen sind, wodurch die Summen aus Humuszehrern und –mehrern dann deutlich positive Werte annehmen. Daher werden einerseits verhältnismäßig enge Beziehungen zwischen den Ergebnissen der Humusbilanzierung und andererseits den N-Salden und mit einem Korrelationskoeffizient von 0,6*** eine unter Beachtung der praktischen Erhebungsbedingungen sehr enge positive Beziehung zwischen Humusbilanz und N₂-Bindung der Leguminosen ermittelt.

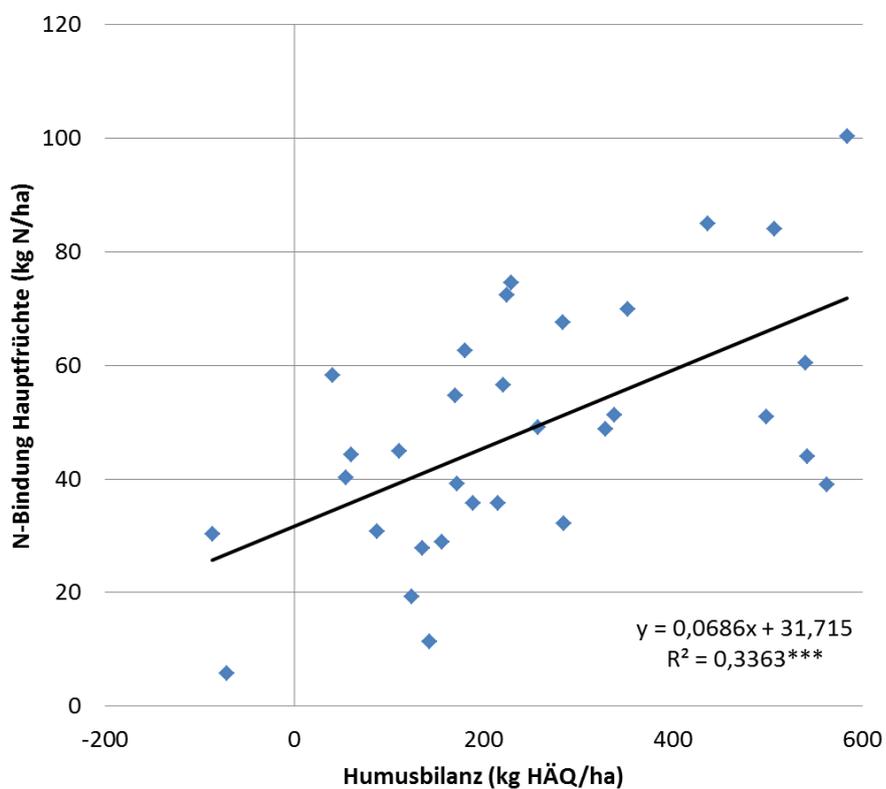
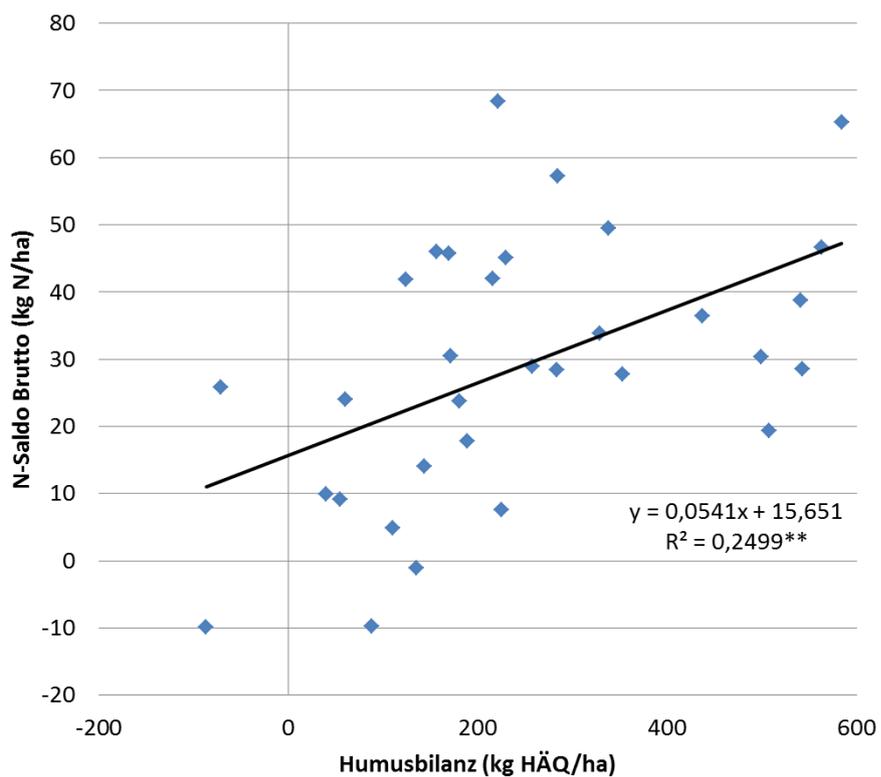


Abb. 5: Beziehungen zwischen Humusbilanz und N-Saldo (oben) bzw. Humusbilanz und legumer N-Bindung (unten) von 32 Ökobetrieben in Sachsen

3.2.2 Futterbau-, Feldgemüse- und Marktfrucht-Betriebe

Durch eine entsprechende Sortierung der Betriebe nach ihrer spezifischen Ausrichtung und Spezialisierung können die besonderen Vor- und Nachteile der Betriebstypen im Nährstoffmanagement und zur Sicherung der Bodenfruchtbarkeit aufgezeigt werden (Tab. 8). Nach diesen Ergebnissen wird Feldgemüse in verhältnismäßig großen Betrieben angebaut. Im Vergleich zu den anderen Betriebstypen werden hier mit 22 % der Ackerfläche der größte Anbauumfang an Körnerleguminosen, an Gesamtleguminosen sowie die höchste legume N-Bindung realisiert. Darüber hinaus weisen die Feldgemüsebetriebe eine bessere Versorgungslage mit fast allen Nährstoffen auf.

Ein etwas anderes Bild kann bei den hier nicht behandelten Betrieben mit Unterglasanbau aufgezeigt werden. Bei diesen Betrieben kommt es durch die z.T. hohe Zufuhr unterschiedlicher organischer Düngemittel zu deutlich unausgeglichene Nährstoffbilanzen, wodurch mit der Zeit es zu einer stark unterschiedlichen Anreicherung mit bestimmten Bodennährstoffe (besonders P) kommen kann (Möller 2014; Zikeli et al. 2015).

Tab. 8: Kennzeichen von Ökobetrieben mit Spezialisierung auf Feldgemüse, Marktfrucht und Futterbau in Sachsen

Betriebstyp	Anzahl Betriebe	Gesamtfläche (ha)	Viehbesatz (DE/100 ha AL+GL)	Grünlandanteil (% Ges.-Betrieb)	Körnerlegum.-Anteil (% Ackerfläche)	Futterlegum.-Anteil (% Ackerfläche)	Legum.-Anteil (gesamt) (% Ackerfläche)	Legume N-Bindung (kg N/ha)	Zufuhr organische Düngemittel		
									N (kg/ha)	P (kg/ha)	K (kg/ha)
Feldgemüse	7	318	3	8	22	19	41	61	23	6	32
Marktfrucht	9	181	4	11	11	24	36	51	9	3	14
Futterbau	10	115	44	35	7	29	36	54	34	9	54
Betriebstyp	Schlagbilanz				Bewertung (A=1, E=5)						
	N (kg/ha)	P (kg/ha)	K (kg/ha)	Humus (kg HÄQ/ha)	Humusbilanz	P-Gehalt Boden	K-Gehalt Boden	pH-Wert Boden			
Feldgemüse	40	-7	-25	270	3,3	3,0	3,3	2,9			
Marktfrucht	25	-9	-39	147	2,9	2,6	2,6	2,5			
Futterbau	30	-6	-35	337	3,6	2,5	3,0	2,6			

Einen Schwerpunkt im Futterbau wird in Sachsen eher in kleineren Betrieben gesetzt, die sowohl einen relativ hohen Umfang an Grünland als auch eine Viehhaltung (meistens Rinder) von 44 DE/100 ha Gesamtfläche bzw. von 74 DE/100 ha Ackerland aufweisen. Die Ergebnisse der Humusbilanzierung liegen mit 337 HÄQ in diesen Betrieben bereits in der Versorgungsklasse D. Die klassischen Marktfruchtbetriebe sind dagegen gekennzeichnet durch mittelgroße Betriebe mit ausgesprochen geringer Tierhaltung und Grünlandanteilen und einer sehr niedrigen Zufuhr an organischen Düngemitteln. Diese typische Betriebskonstellation weist daher im Vergleich zu den anderen Betriebstypen jeweils die niedrigsten Werte in den Nährstoffsalden und in der Humusbilanz auf, wodurch die speziell bewerteten Bodengehalte (siehe Kap. 2) bei fast allen Nährstoffen und in der Humusbilanz die geringsten Werte annehmen.

Ein berechneter Wert von 2,5 bedeutet am Beispiel der pH-Werte, dass die mittleren pH-Werte genau zwischen der Klasse B und C anzusiedeln sind. Ein großer Anteil weist daher bereits pH-Werte unterhalb der optimalen Klasse C auf. Bei Fortführung dieses Trends ist daher besonders auf den Marktfruchtbetrieben mit einer gewissen Gefährdung der Nachhaltigkeit und der Bodenfruchtbarkeit zu rechnen.

Kelm et al. (2007) kommen zu ähnlichen Ergebnissen allerdings mit stärkerer Differenzierung bei der Unterscheidung zwischen Marktfrucht- und Futterbaubetrieben in Schleswig-Holstein:

- Legume N-Bindung Marktfrucht 64 kg N/ha und Futterbau 78 kg N/ha
- N-Saldo Marktfrucht 23 kg N/ha und Futterbau 52 kg/ha
- Zufuhr organische Dünger Marktfrucht 18 kg N/ha und Futterbau 70 kg N/ha.

3.2.3 Entwicklung der Grundnährstoffe und pH-Werte im Zeitverlauf

Aus den Nährstoffanalysen des Bodens zu verschiedenen Zeitabschnitten kann ein Trend in der Entwicklung der relativen Klassen-Anteile abgeschätzt werden, wenn dem Untersuchungs-Umfang eine ausreichende Größe zugrunde liegt. In den nachfolgenden Abbildungen wurden diese entsprechenden Analysen und Einstufungen aus drei Untersuchungsperioden zusammengefasst, die eine Bewertung in einem Zeitabschnitt von 15 – 20 Jahren erlaubt. Am Beispiel der löslichen P-Gehalte des Bodens kann jedoch kein eindeutiger Trend in der Entwicklung der bewerteten Bodengehalte auf den Ökobetrieben in Sachsen erkannt werden (Abb. 6). Dagegen ist eine Umschichtung der Klassen bei den K-Gehalten und den pH-Werten des Bodens eindeutig gegeben (Abb. 7, Abb. 8).

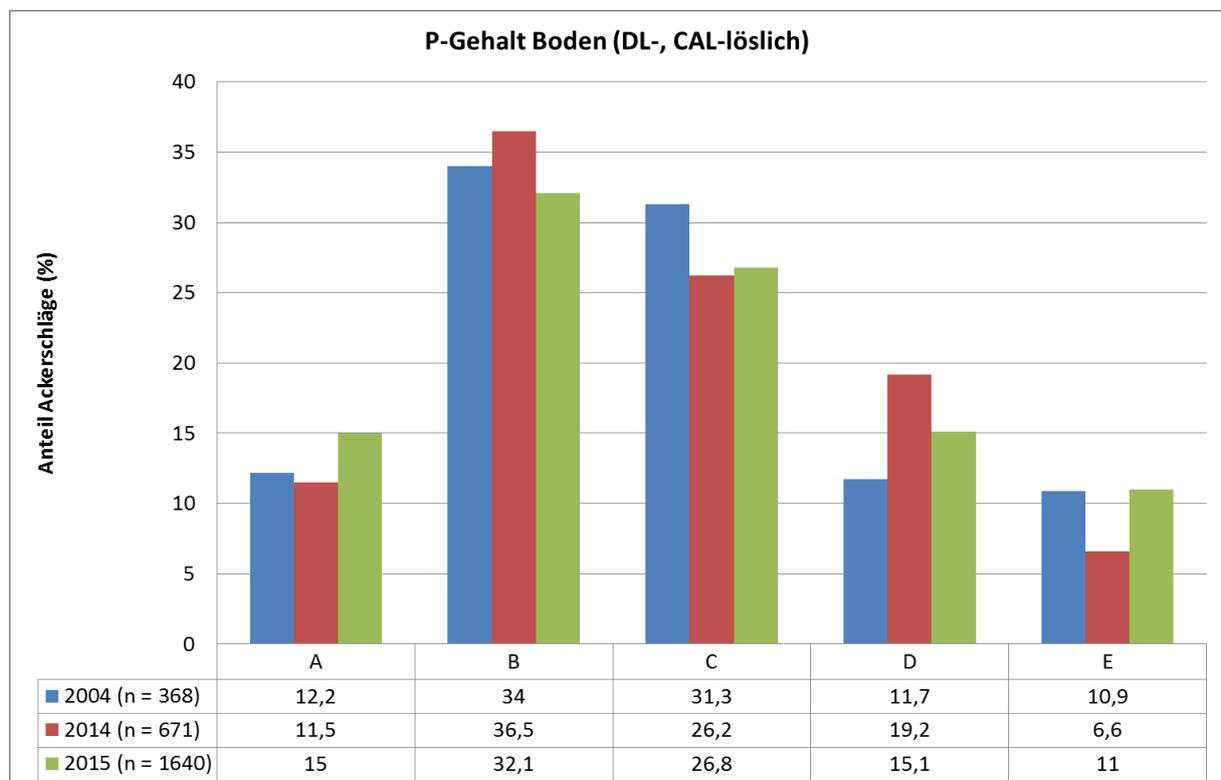


Abb. 6: Entwicklung der P-Bodengehalte auf Ackerland in Sachsen

Auf der einen Seite ist bei den löslichen K-Gehalten des Bodens im Untersuchungszeitraum eine deutliche Abnahme der C-E-Klassenanteile eingetreten. So haben sich die Flächen mit Gehaltsklasse D um ca. ein Drittel und die Anteile mit Klasse E um ca. 50 % reduziert. Auf der anderen Seite haben sich die Anteile der optimalen Versorgungsklasse B mehr als verdoppelt, aber auch die Klasse A hat sich stark erhöht, bleibt aber insgesamt noch weit unterhalb von 10 % im Vergleich zu den anderen Klassen. In Mecklenburg-Vorpommern sind die Anteile der Gehaltsklassen B für Phosphat und Kalium innerhalb von ca. 10 Jahren um 10 – 11 % angestiegen, während die Anteile der Klassen D und E um jeweils 3 – 9 % reduziert worden sind (Kape 2015).

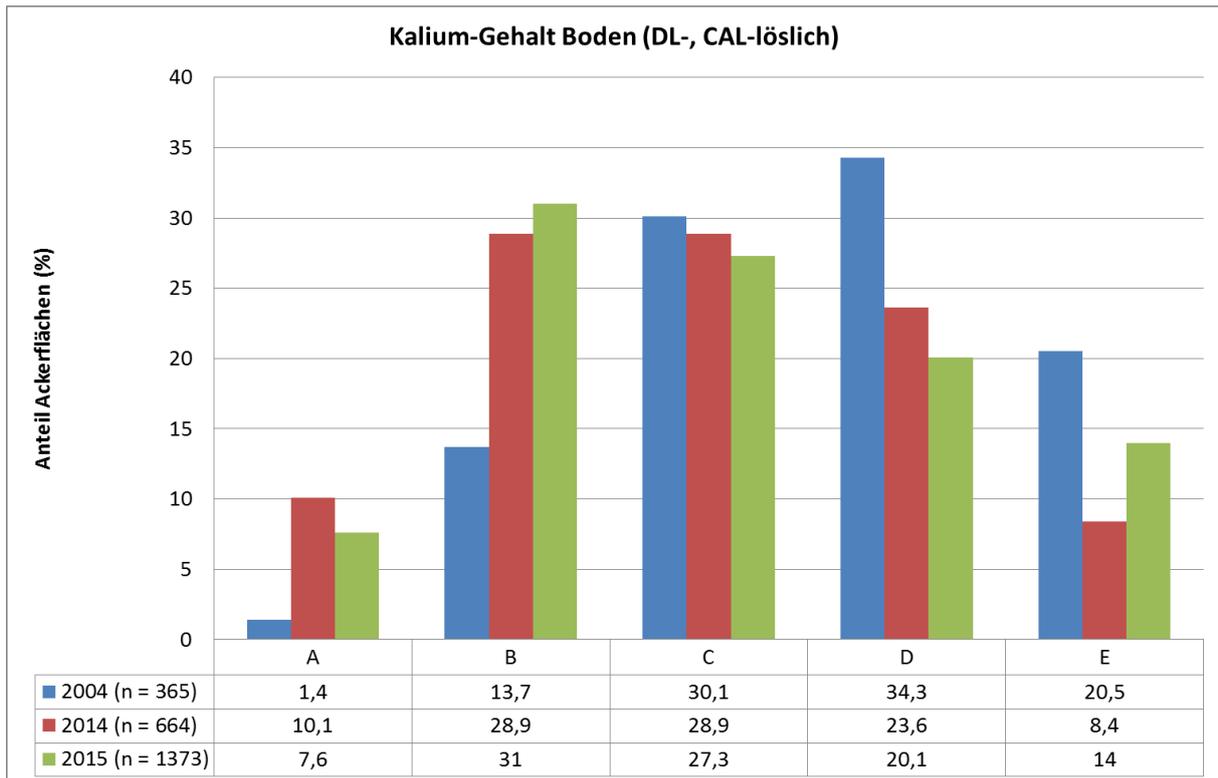


Abb. 7: Entwicklung der K-Bodengehalte auf Ackerland in Sachsen

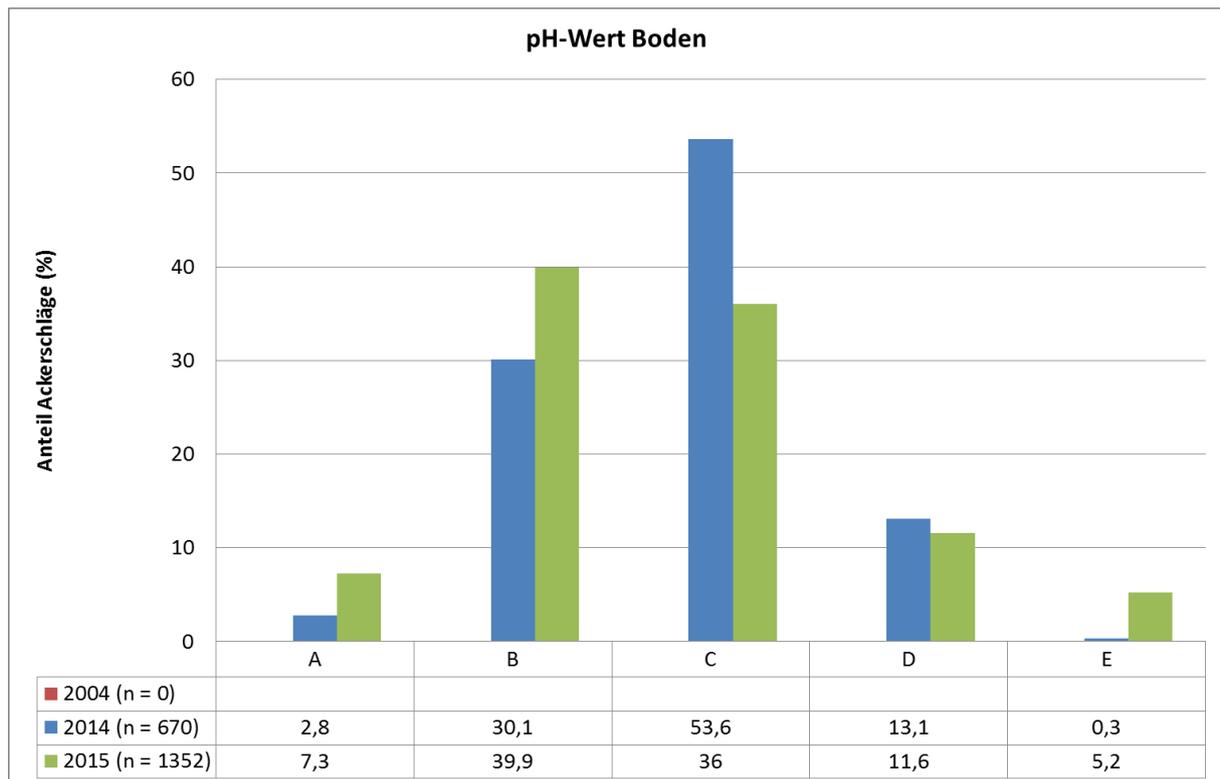


Abb. 8: Entwicklung der pH-Werte auf Ackerland in Sachsen

4. Schlussfolgerungen

In den letzten 10 – 15 Jahren sind eine Reihe von Studien zum Nährstoffmanagement durchgeführt worden, deren Ergebnisse in dieser Arbeit zusammengefasst worden sind. Es liegen Auswertungen von insgesamt 23 Studien mit Daten aus 360 Öko-Betrieben und/oder ca. 7460 Acker- und Grünlandschlägen vor. Der Umfang an Daten aus ökologisch wirtschaftenden landwirtschaftlichen Betrieben oder Flächen des Acker- und Grünlandes erlaubt daher erstmals eine verhältnismäßig genaue Beschreibung der Situation in vielen Regionen und Bundesländern und im Durchschnitt von Deutschland.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass durch die Abfuhr von landwirtschaftlichen Produkten Nährstoffverluste entstehen, die auf Grund der gegebenen unterschiedlich hohen Nährstoffzufuhren zu z.T. ungünstigen Nährstoffsalden und über diesen Weg auf Dauer zu einer spezifischen Veränderung der Nährstoffgehalte im Boden führen (Abnahme der Klassen C – E, Zunahme der Klassen A – B). Hiervon sind die untersuchten Nährstoffe in unterschiedlichem Umfang betroffen.

Für den Bereich der Versorgung mit organischer Substanz (Humusbilanz) und mit Stickstoff bestehen nach diesen Ergebnissen keine großen Ungleichgewichte. Die Versorgungslage ist auf den meisten Betrieben ausreichend zur Gewährleistung optimaler Erträge und zur Sicherung der Bodenfruchtbarkeit. Der verhältnismäßig hohe Anteil an Leguminosen in den Fruchtfolgen könnte jedoch auf Dauer zu Problemen bei der Einhaltung der notwendigen Anbaupausen führen (Leguminosenmüdigkeit).

Die Versorgung ist im Bereich der Grundnährstoffe Phosphor und Kalium und den pH-Werten, sowie in Regionen mit nur noch geringer Zufuhr über die Atmosphäre auch beim Schwefel, z.T. deutlich negativer zu beurteilen. Nach Ergebnissen von Leisen (2013) und eigenen Auswertungen fallen in einem Zeitrahmen von 10 Jahren z.B. die pH-Werte um ca. 0,1 - 0,2 Einheiten sowie die Gehalte an pflanzenverfügbarem Phosphor um ca. 0,5 – 1,0 mg P/100 g Boden im Durchschnitt der untersuchten

Regionen ab. Das trifft z.B. ganz gut mit den ermittelten P-Salden zwischen -2 kg bis -9 kg P/ha und Jahr überein, denn es sind erfahrungsgemäß Mengen aus organischen oder mineralischen Quellen um 100 kg P/ha erforderlich, um den löslichen P-Gehalt des Bodens um 1,0 mg/100 g Boden anzuheben.

Bei den Grundnährstoffen und der Kalkversorgung zeigt sich deshalb immer deutlicher, dass die Nährstoffkreisläufe nicht geschlossen sind (Abb. 9, Nr. 1). Um gravierende Nachteile in der Bodenfruchtbarkeit und Ertragsfähigkeit im ökologischen Landbau zu verhindern, ist die Zeit gekommen, Anstrengungen zu unternehmen, um auf lange Sicht zu möglichst geschlossenen Nährstoffkreisläufen zu kommen.

Auf Grund der angestregten Situation im Bereich der endlichen Ressourcen und deren „Reinheit“, was nicht nur auf die Situation beim Nährstoff Phosphor zutrifft (Kratz & Schnug; 2005), sind daher in Zukunft andere Quellen für eine Nettozuführung von Nährstoffen zu erschließen (Abb. 9, Nr. 2). Hierzu zählt in erster Linie eine Aufbereitung von speziellen Düngemitteln aus dem umfangreichen Bereich der Abwässer und Bioabfälle in einer Weise, dass sie auch im Ökolandbau akzeptiert, zugelassen und angewendet werden können (Müller & Römheld 2005; Römer 2013; Kehres 2014; Jedelhauser et al. 2015).

Hierzu ist in den letzten Jahren eine Trendwende eingetreten. Einerseits sind verstärkte Bemühungen zur Suche, Testung und Produktion von neuen „sauberen“ Düngemitteln aus dem Bereich der Aufbereitung und Recyclierung z.B. von Bioabfallkomposten und Klärschlämmen zu verzeichnen. Andererseits ist auch im Bereich des Ökolandbaus auf Verbandsebene und auf den Betrieben die Einsicht gestiegen, dass auf Betriebsebene eine Intensivierung des Nährstoffmanagements erforderlich ist (Abb. 9, Nr. 3). Neben einer ausreichenden Versorgung mit Stickstoff und organischer Substanz trifft das insbesondere auf den Bereich der Grundnährstoffe und Kalkversorgung durch entsprechende periodische Maßnahmen zur Bodenuntersuchung, Bilanzierung und Düngung zu.

Schon durch eine verhältnismäßig geringe zusätzliche Zufuhr z.B. an P-haltigen Düngemitteln von ca. 5 kg P/ha und Jahr kann auf vielen Betrieben der negative Trend zu abnehmenden Bodengehalten deutlich reduziert werden. So wird diese Menge inclusive der anzurechnenden anderen Nährstoffe bereits durch eine Gabe von nicht mal 50 dt/ha Stalldung, 30 dt/ha Bioabfallkompost oder durch 10 m³/ha Rindergülle je Jahr abgedeckt. Zusätzliche Maßnahmen zur Düngung könnten in Zukunft auch für den Nährstoff Stickstoff z.B. in Verbindung mit einer eventuell notwendig werdenden Rücknahme des Umfangs im Leguminosenanbau an Bedeutung gewinnen.

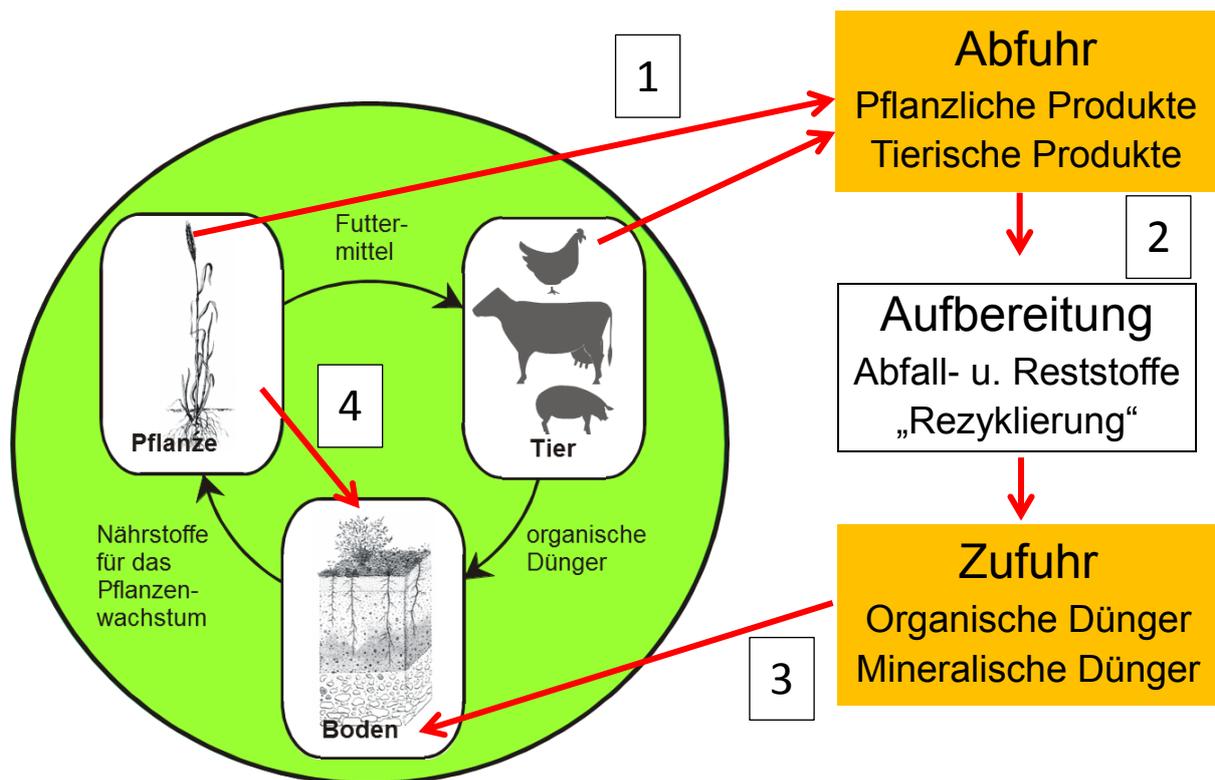


Abb. 9: Symbolische Darstellung des Nährstoffkreislaufs (Erklärung siehe Text)

Dem Ziel der Erreichung und Sicherung eines hohen Status in der Bodenfruchtbarkeit dient allerdings nicht nur die Schließung des „großen“ Nährstoffkreislaufes. Gerade im Ökolandbau dienen Maßnahmen zur Intensivierung des „inneren“ Stoffkreislaufs für die Erzielung einer möglichst hohen Nährstoffeffizienz (Abb. 9, Nr. 4). Hierbei sollten u.a. folgende Maßnahmen auch in Zukunft nicht vernachlässigt werden:

- Abwechslungsreiche Fruchtfolgen
- Anbau tiefwurzelnder Pflanzenarten
- Zwischenfrüchte
- Gründüngung
- „Grüne Welle“ durch stetigen Bodenbewuchs
- Gestaltung einer reichhaltigen Landschaft.

5. Zusammenfassung

In diesem Beitrag ist eine Auswertung von vielen Erhebungen und Studien aus den letzten 10 – 15 Jahren über die Situation der ökologischen landwirtschaftlichen Betriebe auf dem Gebiet der Nährstoff- und Humusversorgung durchgeführt worden. Auf Grund des Zahlenumfangs aus vielen Bundesländern kann die Versorgungslage und der Trend für nachfolgend erfasste direkte und indirekte Merkmale der Bodenfruchtbarkeit recht gut eingeschätzt werden:

Humus und Stickstoff:

- ausreichende bis gute Versorgungslage, Mangel und Überfluss nur auf wenigen Betrieben
- insgesamt sind günstige Wirkungen auf Bodenfruchtbarkeit und Umweltschutz zu erwarten
- aggregierte Schlagbilanzen weisen oft N-Effizienzen von 75 % auf

- hoher Leguminosenanteil der Fruchtfolgen könnte auf Dauer Probleme bereiten (Verletzung der Anbaupausen, Leguminosenmüdigkeit).

Phosphor:

- weit verbreitete negative P-Salden (unter -5 kg/ha) führen zur Abnahme der P-Gehalte im Boden (ca. 0,5 – 1,0 mg P/100 g Boden in 10 Jahren)
- bei Zunahme der Gehaltsklasse A insbesondere auf „alten“ Ökobetrieben sind Ertragsausfälle zu erwarten: → Handlungsbedarf!

Kalium und Magnesium:

- auf mittleren bis schweren Böden können negative Salden (bis -40 kg K/ha) akzeptiert werden (hohe Nachlieferung!)
- auf leichten Böden nehmen bei negativen Salden die K- und Mg-Gehalte im Boden ab (Zunahme der Klasse A und Ertragsausfälle): → Handlungsbedarf!

pH-Wert und Kalkversorgung:

- 33 % der Acker- und 31 % der Grünlandschläge weisen zu niedrige pH-Werte auf: → dringender Handlungsbedarf zur Kalkung!
- Kalkbemessungsverfahren (vgl. Kerschberger et al. 2000) müssen noch an Bedingungen des Ökolandbaus angepasst werden, da zumindest für die schweren Böden oft zu hohe Kalkmengen bemessen werden.

Die Ergebnisse lassen folgende Schlussfolgerungen zu:

- Nährstoffbilanzen und Bodengehalte der Acker- und Grünlandschläge weisen oft einen negativen Trend auf.
- Nicht nur in Marktfruchtbetrieben und auf leichten Böden sind daher die Nährstoffkreisläufe z.T. weit geöffnet.
- Bei guter Nährstoffversorgung kann zunächst ein Überhang abgeschöpft werden (z.B. Bodenversorgungs-Klassen D, E).
- Bei knappen Boden-Reserven (Klassen A, z.T. B) besteht Handlungsbedarf zur Sicherung der Bodenfruchtbarkeit und Nachhaltigkeit der Betriebe.
- Die weitgehende Schließung von Nährstoffkreisläufen ist eine gesamt-gesellschaftlich wichtige Aufgabe. Das Angebot an mineralischen (Recycling)-Düngern und organischen Düngemitteln muss daher weiter verbessert werden!
- In Forschung und auf Verbandsebene sind in den letzten Jahren verstärkte Aktivitäten zur Erstellung, Prüfung und Zulassung von besonders „sauberen“ Düngemitteln zu verzeichnen.
- Auf den Betrieben muss in Zukunft noch deutlicher auf ein umfassendes Nährstoffmanagement durch regelmäßige Bodenuntersuchung, Bilanzierung und Düngung geachtet werden!

6. Quellen

Albert, E., F. Förster, H. Ernst, H. Kolbe, B. Dittrich, H. Laber, M. Handschack, G. Krieghoff, T. Heidenreich, G. Riehl, S. Heinrich, & W. Zorn (2007): Umsetzung der Düngeverordnung. Hinweise und Richtwerte für die Praxis. Broschüre. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Dresden.

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.
- BAD (2003): Phosphat und Kali - Bausteine nachhaltiger Ertragsbildung. Broschüre, Bundesarbeitskreis Düngung, Frankfurt am Main.
- Baumgärtel, G., G. Breitschuh, T. Ebertseder, H. Eckert, R. Gutser, U. Hege, L. Herold, F. Wiesler, W. Zorn, (2007): Nährstoffbilanzierung im landwirtschaftlichen Betrieb. Standpunkt, VDLUFA, Speyer.
- Becker, K., S.A. Fischinger & G. Leithold (2011): Einfluss von Schwefel- und Stickstoffdüngung auf den Kornertrag von Winterraps in ökologischem Anbau. Beiträge zur Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau 11, Bd. 1, 310 – 311.
- Becker, K., S. Heilmann, A. Riffel, G. Leithold, & S.A. Fischinger (2013): Wirkung einer Schwefel- und Gölledüngung auf den Trockensubstanz- und Stickstofftrag eines Futterleguminosenbestandes. Beiträge zur Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau 12, 220 – 221.
- Berner, A., H. Böhm, R. Brandhuber, J. Braun, U. Brede, J.-L. Colling-Von Roesgen, M. Demmel, H. Dierauer, B. Ewald, A. Fliessbach, J.G. Fuchs, A. Gattinger, J. Hess, K.-J. Hülsbergen, M. Köchli, H. Kolbe, M. Koller, P. Mäder, A. Von Müller, N. Patzel, L. Pfiffner, H. Schmidt & M. Wild (2012): Grundlagen zur Bodenfruchtbarkeit. Die Beziehung zum Boden gestalten. Forschungsinstitut für biologischen Landbau, Frick, Schweiz. <http://orgprints.org/21814/>
- Berry, P.M., R. Sylvester-Bradley, L. Philipps, D.J. Hatch, S.P. Cuttle, F.W. Rayns & P. Gosling (2002): Is the productivity of organic farms restricted by the supply of available nitrogen? Soil Use and Management 18, 248 – 255.
- Berry P.M., E.A. Stockdale, R. Sylvester-Bradley, L. Philipps, K.A. Smith, E.I. Lord, C.A. Watson & S. Fortune (2003): N, P and K budgets for crop rotations on nine organic farms in the UK. Soil Use and Management 19, 112 – 118.
- Breitschuh, Th. & U. Gernand (2010): Humusbilanzierung in landwirtschaftlichen Betrieben. In: Engels, C. et al.: Humusbilanzierung landwirtschaftlicher Böden – Einflussfaktoren und deren Auswirkungen. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben. VDLUFA, Speyer, 280 – 313.
- Brock, Chr., M. Oltmanns & A.-K. Spiegel (2013): Humusmanagement und Humusbilanz hessischer Öko-Betriebe. Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen (LLH), Kassel.
- Capriel, P. (2006): Standorttypische Humusgehalte von Ackerböden in Bayern. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft 16, Freising.
- Capriel, P. (2010): Standorttypische Humusgehalte von Ackerböden in Bayern. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft 5, Freising.
- Diez, T. & H. Weigelt (1986): Vergleichende Bodenuntersuchungen von konventionell und alternativ bewirtschafteten Betriebsschlägen. Einführung, Untersuchungskonzept, spatendiagnostische und chemische Untersuchungen. Bayer. Landw. Jahrb. 63, 979 - 991.
- Ebertseder, T., C. Engels, J. Heyn, J. Reinhold, C. Brock, F. Fürstenfeld, K.-J. Hülsbergen, K. Isermann, H. Kolbe, G. Leithold, H. Schmid, K. Schweitzer, M. Willms & J. Zimmer (2014): Humusbilanzierung. Eine Methode zur Analyse und Bewertung der Humusversorgung von Ackerland. Standpunkt, VDLUFA, Speyer.
- Egner, H. & H. Riehm (1955): Die Doppellactatmethode. In: R. Thun et al.: Methodenbuch I. Neumann Verlag, Berlin.
- Eriksen, J. (2010): Sulphur cycling in agroecosystems. Faculty of Agricultural Science, Aarhus University, Tjele, Danmark.

- Fischer, A. (2013): Auswertung der Standard-Bodenuntersuchungs-Datenbank 2007 – 2012 für Gesamt-Bayern. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising, schriftl. Mitteilung.
- Friedel, K. & D. Gabel (2001): Nitrogen pools and turnover in arable soils under different durations of organic farming: I: Pool sizes of total nitrogen, microbial biomass nitrogen, and potentially mineralizable nitrogen. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 164, 415 – 419.
- Friedel, J.K. (2012): HUMUS – Datengrundlage für treibhausrelevante Emissionen und Senken in landwirtschaftlichen Betrieben und Regionen Österreichs. Endbericht, Department für Nachhaltige Agrarsysteme, Institut für Ökologischen Landbau, Universität für Bodenkultur, Wien, Österreich.
- Gattinger, A., A. Müller, M. Haeni, C. Skinner, A. Fließbach, N. Buchmann, P. Mäder, M. Stolze, P. Smith, N. El-Hage Scialabba & U. Niggli (2012): Enhanced top soil carbon stocks under organic farming. *PNAS* 109, 18226 – 18232.
- Gehlen, P. (1987): Bodenchemische, bodenbiologische und bodenphysikalische Untersuchungen konventionell und biologisch bewirtschafteter Acker-, Gemüse- und Weinflächen. Dissertation, Institut für Bodenkunde der Universität, Bonn.
- Gutser, R., H.J. Reents, I. Rühling, H. Schmid, & K.H. Weinfurtner (2002): Flächen- und betriebsbezogene Indikatoren auf der Grundlage des Langzeitmonitorings. Forschungsverbund Agrarökosysteme München, Jahresbericht 2002, 147 - 159.
<http://www.pe.wzw.tum.de/publikationen/pdf/sd583.pdf>
- Haas, G. (2010): Wasserschutz im Ökologischen Landbau: Leitfaden für Land- und Wasserwirtschaft. Agraringenieurbüro Dr. habil. Guido Haas, Bad Honnef. <http://orgprints.org/16897/>
- Haas, G., C. Deittert & U. Köpke (2007): Farm-gate nutrient balance assessment of organic dairy farms at different intensity levels in Germany. *Renewable Agriculture and Food Systems* 22, 223 – 232.
- Harzer, N. (2006): Humus- und Nährstoffhaushalt ökologischer Betriebe und Systemversuche im Land Sachsen-Anhalt. Diplomarbeit. Universität, Halle-Wittenberg.
- Hege, U., A. Fischer, & K. Offenberger (2003): Nährstoffsalden und Nitratgehalte des Sickerwassers in ökologisch und üblich bewirtschafteten Ackerflächen. In: *Forschung für den ökologischen Landbau in Bayern*. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft 3, 7 – 13.
- Hülsbergen, K.-J. (2003): Entwicklung und Anwendung eines Bilanzierungsmodells zur Bewertung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Systeme. Shaker Verlag, Aachen.
- Hülsbergen, K.-J. & H. Schmid (2010): Emissionen landwirtschaftlich genutzter Böden. *KTBL Schrift* 483, 229 – 483.
- Jedelhauser, M., M. Aschenbrenner, L. Vjestica, V. Wierer, S. Fischinger & C.R. Binder (2015): Kriterien für die Akzeptanz von recyceltem Phosphatdünger aus Abwasser und Klärschlamm – Ergebnisse einer Praxisbefragung von ökologisch wirtschaftenden Landwirten. In: Häring, A.M. et al.: *Beiträge zur Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau 13*. Verlag Dr. Köster, Berlin, 694 – 697.
- Kape, H.-E. (2015): Nährstoffversorgung Ökobetriebe in MV. Schriftliche Mitteilung, LMS Agrarberatung, Rostock.
- Kaselowsky, J. (1990): Wirkung von Lagerungsdichte und Wassergehalt des Bodens auf die Verfügbarkeit von Phosphat und Kalium sowie das Nährstoffaneignungsvermögen von Pflanzen. Dissertation, Institut für Agrilkulturchemie der Universität, Göttingen.
- Kehres, B. (2014): Biogutkompost im Ökolandbau. *H&K Humuswirtschaft & Kompost aktuell*, Nr. 12, 1 – 3.

- Kelm, M., H. Hüwing & N. Kemper (2007): COMPASS Vergleichende Analyse der pflanzlichen Produktion auf ökologischen und konventionellen Praxisbetrieben in Schleswig-Holstein. Endbericht, Christian-Albrechts-Universität, Kiel.
- Kerschberger, M., B. Deller, U. Hege, J. Heyn, H.-E. Kape, O. Krause, J. Pollehn, M.J. Rex & K. Severin (2000): Bestimmung des Kalkbedarfs von Acker- und Grünlandböden. Standpunkt, VDLUFA, Darmstadt
- Köhler, B. & H. Kolbe (2007): Nährstoffgehalte der Fruchtarten im Ökologischen Landbau. In: Berichte aus dem Öko-Pflanzenbau. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Heft 9, 1 – 21.
- Körschens, M., J. Rogasik, E. Schulz, H. Böning, D. Eich, R. Ellerbrock, U. Franko, K.-J. Hülsbergen, D. Köppen, H. Kolbe, G. Leithold, I. Merbach, H. Peschke, W. Prystav, J. Reinhold & J. Zimmer (2004): Humusbilanzierung. Methode zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland. Standpunkt, VDLUFA, Bonn.
- 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 & Verlag, Leipzig.
- Kolbe, H. (2006): Fruchtfolgegestaltung im ökologischen und extensiven Landbau: Bewertung von Vorfruchtwirkungen. Pflanzenbauwissenschaften 10, 82 – 89.
- Kolbe, H. (2009): Vergleich von Methoden zur Berechnung der biologischen N_2 -Fixierung von Leguminosen zum Einsatz in der landwirtschaftlichen Praxis. Pflanzenbauwissenschaften 13, 23 – 36.
- 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.
- Kolbe, H. (2011): Site-adjusted organic matter-balance method for use in arable farming systems. J. Plant Nutr. Soil Sci. 173, 678 – 691.
- Kolbe, H. (2012a): Zusammenführende Untersuchungen zur Genauigkeit und Anwendung von Methoden der Humusbilanzierung im konventionellen und ökologischen Landbau. In: Bilanzierungsmethoden und Versorgungsniveau für Humus. Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Heft 19, 4 – 85.
- Kolbe, H. (2012b): Untersuchungen zum Niveau der Humusversorgung in Sachsen. In: Bilanzierungsmethoden und Versorgungsniveau für Humus. Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Heft 19, 86 – 108.
- Kolbe, H. (2013): Standortangepasste Humusbilanzierung im ökologischen Landbau. Informationen für Praxis, Beratung und Schulung. Broschüre, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.
- 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. & M. Schuster (2011): Bodenfruchtbarkeit im Öko-Betrieb. Untersuchungsmethoden. Broschüre, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.
- Kratz, S. & E. Schnug (2005): Schwermetalle in P-Düngern. Landbauforschung Völkenrode, Special Issue 286, 37 – 45.

- Larsson, M. & A. Granstedt (2010): Sustainable governance of the agriculture and the Baltic Sea – Agricultural reforms, food production and curbed eutrophication. *Ecological Economics* 69, 1943 – 1951.
- Lindenthal, Th. (2000): Phosphorvorräte in Böden, betriebliche Phosphorbilanzen und Phosphorversorgung im Biologischen Landbau. Dissertation, Universität für Bodenkultur, Wien, Österreich.
- Leisen, E. (2013): Veränderung der Mineralstoffgehalte in Böden und Pflanzen von Öko-Milchviehbetrieben in den letzten 15 Jahren. *Leitbetriebe Ökologischer Landbau in Nordrhein-Westfalen, Versuchsbericht 2013*, 220 – 226.
- Loes, A.-K. (2000): Phosphorus and potassium concentrations in soil after long-term organic farming. *Proceedings IFOAM Scientific Conference* 13, 25.
- Loes, A.-K & A.F. Ogaard (1997): Changes in the nutrient content of agricultural soil on conversion to organic farming in relation to farm-level nutrient balances and soil contents of clay and organic matter. *Acta Agric. Scand. Sect. B Soil and Plant Sci.* 47, 201 – 214.
- Loes, A.-K. & A.F. Ogaard (2003): Concentrations of soil potassium after long-term organic dairy production. *International Journal of Agricultural Sustainability* 1, 14 – 29.
- Meyer, D., B. Dittrich, B. Köhler & H. Kolbe (2011): Nähr- und Schadstoffgehalte von Wirtschaftsdüngern des ökologischen Landbaus in Sachsen. In: *Berichte aus dem Ökolandbau. Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Heft 6*, 16 – 32.
- Meyer, D., H. Kolbe, N. Grandner & M. Schuster (in Vorbereitung): Ökofeld Roda: Ergebnisse zur langjährigen Bewirtschaftung von Feldversuchsflächen der Versuchsstation Roda in Sachsen. *Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden*.
- Möller, K. (2014): Nährstoffstatus und Nährstoffbilanzen im Ökologischen Gemüsebau. Vortrag, KTBL-Fachgespräch, Fulda.
https://www.ktbl.de/fileadmin/user_upload/Allgemeines/Download/Handelsduenger/Naehrstoffstatus-Naehrstoffbilanzen.pdf
- Mokry, M. & J. Recknagel (2013): Nährstoffversorgung-Boden ökologisch wirtschaftender Betriebe in BW. In: J. Breuer: *Bodenuntersuchungen und Bodenfruchtbarkeit in Ökobetrieben in Baden-Württemberg. Vortrag, 6. Wintertagung Ökologischer Landbau, Landwirtschaftliches Technologiezentrum (LTZ), Augustenberg*.
- Müller, T. & V. Römheld (2005): Stickstoff- und Phosphorversorgung in ökologisch wirtschaftenden Betrieben – Ein Problem? *Landinfo Nr. 4*, 12 – 16.
- Niggli, U., O. Schmid, M. Stolze, J. Sanders, Chr. Schader, A. Fließbach, P. Mäder, P. Klocke, G. Wyss, O. Balmer, L. Pfiffner & E. Wyss (2008): *Gesellschaftliche Leistungen der biologischen Landwirtschaft. Fakten und Hintergründe zu den Leistungen des Biolandbaus. Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL), Frick, Schweiz*.
- PARCOM (1993): *PARCOM guide lines for calculating mineral balances. Meeting of the ad hoc working group on measures to reduce the nutrient load from agriculture 3, The Hague, The Netherlands*.
- Quirin, M., C. Emmerling & D. Schröder (2006): Phosphorgehalte und –bilanzen konventionell, integriert und biologisch bewirtschafteter Acker- und Grünlandflächen und Maßnahmen zum Phosphorabbau hoch versorgter Flächen. *Pflanzenbauwissenschaften* 10, 60 – 65.
- Reinicke, F & D. Wurbs (2012): *Erfassung und Auswertung langjähriger Messreihen von Dauermonitoringflächen. Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Heft 40, Dresden*.

- Römer, W. (2013): Phosphor-Düngewirkung von P-Recyclingprodukten. KA Korrespondenz Abwasser, Abfall, Nr. 3, 202 – 215.
- Rogasik, J., P. Kurtinecz, K. Panten, U. Funder, H. Rogasik, S. Schroetter & E. Schnug (2005): Kalkung und Bodenfruchtbarkeit. In: Landbauforschung Völkenrode, Special Issue 286, 71 - 81.
- Schachtschabel, P. (1956): Die Magnesiumversorgung nordwestdeutscher Böden und seine Beziehungen zum Auftreten von Mangelsymptomen an Kartoffeln. Z. Pflanzenern. Bodenkde. 74, 202 – 219.
- Schmid, H., M. Braun & K.-J. Hülsbergen (2012): Klimawirksamkeit und Nachhaltigkeit von bayerischen landwirtschaftlichen Betrieben. In: Angewandte Forschung und Beratung für den ökologischen Landbau in Bayern. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft 4, 137 – 143.
- Schmid, H., M. Braun & K.-J. Hülsbergen (2013): Treibhausgasbilanzen und ökologische Nachhaltigkeit der Pflanzenproduktion – Ergebnisse aus dem Netzwerk der Pilotbetriebe. In: Hülsbergen, K.-J. & G. Rahmann: Klimawirkungen und Nachhaltigkeit ökologischer und konventioneller Betriebssysteme – Untersuchungen in einem Netzwerk von Pilotbetrieben. Thünen Report 8, 259 – 293.
- Schmidtke, K., B. Wunderlich, J. Lauter, Y. Wendrock & H. Kolbe (in Vorbereitung): Nährstoff- und Humusbilanz sowie Nährstoffversorgung im Boden von langjährig ökologisch bewirtschafteten Acker- und Grünlandflächen im Freistaat Sachsen. Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.
- Schüller, H. (1969): Die CAL-Methode, eine neue Methode zur Bestimmung des pflanzenverfügbaren Phosphates in Böden. Z. Pflanzenern. Bodenkde. 123, 48 – 63.
- Schulte, G. (1996): Bodenchemische und bodenbiologische Untersuchungen ökologisch bewirtschafteter Böden in Rheinland-Pfalz unter besonderer Berücksichtigung der Nitratproblematik. Dissertation, Fachbereich VI, Geographie/Geowissenschaften der Universität, Trier.
- Stöven, K. & E. Schnug (2005): Kalkung und Bodenleben. In: Landbauforschung Völkenrode, Special Issue 286, 113 – 119.
- TLL (2010): Untersuchung von N_{\min} -Gehalt und N-Bilanz in Fruchtfolgen im Rahmen des N_{\min} -Monitorings auf Dauertestflächen. Ergebnisse der Jahre 2005 bis 2009 und langjährige Betrachtungen. Themenblatt-Nr.: 21.13.210 / 2010, Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena.
- Vetter, R., M. Miersch, J. Weissbart, B. Freyer & K. Rennenkampff (2000): Stickstoffversorgung und –dynamik in Fruchtfolgen vieharmen Betriebe des ökologischen Landbaus. Abschlussbericht, ITADA-Sekretariat, Colmar, Frankreich.
- Wagner, S. & W. Zorn (2013): Nährstoffversorgung von Böden und Pflanzen im ökologischen und konventionellen Ackerbau. In: Ökolandbau in Thüringen 2013 „Entwicklung und Ergebnisse“. Schriftenreihe Landwirtschaft und Landschaftspflege in Thüringen, Heft 5, 86 – 95.
- 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.
- 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.
- Wehrmann, J., & H. C. Scharpf (1979): Der Mineralstickstoffgehalt des Bodens als Maßstab für den Stickstoffdüngbedarf (N_{\min} -Methode). Plant and Soil 52, 109 – 126.

Zikeli, S., L. Deil & K. Möller (2015): Nährstoffmanagement in ökologisch bewirtschafteten Gewächshäusern in Südwest-Deutschland: Bedingt der Anbauverband die Düngestrategie? In: Häring, A.M. et al.: Beiträge zur Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau 13, 280 – 283.

Zorn, W. (2007): Vergleich der Nährstoffversorgung ökologisch und konventionell bewirtschafteter Ackerflächen – Konsequenzen für die Düngung. In: Ökolandbau in Thüringen. Schriftenreihe Landwirtschaft und Landschaftspflege in Thüringen, 53 – 55.

Zorn, W., W. Hess, E. Albert, H. Kolbe, M. Kerschberger, & G. Franke (2007): Düngung in Thüringen 2007 nach „Guter fachlicher Praxis“. Schriftenreihe Landwirtschaft und Landschaftspflege in Thüringen, H. 7. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena.

Adresse:

Dr. Hartmut Kolbe

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Referat Pflanzenbau

Waldheimer Str. 219

01683 Nossen

Hartmut.Kolbe@smul.sachsen.de