



Berichte über Landwirtschaft

Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft

BAND 99 | Ausgabe 2

Agrarwissenschaft
Forschung

Praxis

Schlaggenaue Analyse von 32 Betrieben des ökologischen Landbaus im Freistaat Sachsen: Nährstoff- und Humusmanagement

Von Hartmut Kolbe, Dietmar Meyer

1 Einleitung und Problemstellung

Sowohl die bewirtschaftete landwirtschaftliche Nutzfläche als auch die Anzahl der Betriebe des Ökologischen Landbaus sind in den letzten Jahrzehnten stetig angestiegen, im Jahr 2020 wurde eine Fläche von rd. 1,7 Mio. ha Flächenanteil 10,3%, von 35.396 Betrieben (13,5% der landwirtschaftlichen Betriebe) ökologisch in Deutschland bewirtschaftet (ökolandbau.de). Oft war der Anstieg der Produktionsfläche jedoch nicht ausreichend, um die schnell wachsende Nachfrage nach Bio-Produkten aus inländischer Produktion abzudecken. Hierzu trug sicher auch bei, dass die Erträge aus ökologischer Produktion weitgehend stagnieren, bei einigen Kulturen sogar leicht gesunken sind, während im konventionellen Ackerbau ein jährlicher Zuwachs um 2 % erzielt worden ist (MAYER & MÄDER, 2016).

Die Ursachen für diese Stagnation sind vielfältig. In jüngster Zeit häufen sich Berichte über Anbaufehler und suboptimales Nährstoffmanagement. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Nährstoffzufuhren in diesen Betrieben vielfach nicht ausreichend sind, so dass es mittel- und langfristig zu einer Abnahme der Gehalte an pflanzenverfügbaren Nährstoffen im Boden kommen kann (GRUBER, 2009; ZORN & WAGNER, 2010; KOLBE, 2015, 2016). Darüber hinaus wurden auch zu niedrige bis deutlich negative Nährstoffsalden aus Hoftor- oder Schlagbilanzierungen des ökologischen Landbaus ermittelt (LINDENTHAL, 2000; BENGTESSON et al., 2003; HARZER, 2006; HEROLD & HÖPFNER, 2010; KOLBE, 2015; MEYER et al., 2020a). Der Anbau von Leguminosen ist zudem für die Stickstoffversorgung unabdingbar (SCHELLER, 2013). Ein ausreichender Anteil an Leguminosen in der Fruchtfolge und dessen richtige Einbindung in das Betriebsmanagement ist daher für den Erfolg des ökologischen Landbaus von zentraler Bedeutung.

Vor diesem Hintergrund wurde zunächst für den Zeitraum 2006 – 2011 eine Status-Quo-Analyse von Acker- und Grünlandflächen aus 32 Ökobetrieben sowohl zur Fruchtfolgegestaltung als auch zum

Nährstoffmanagement am Beispiel des Freistaates Sachsen erstellt (MEYER et al., 2020b). Eine genaue Untersuchung der Fruchtfolgeleistungen der Betriebe erfolgte von KOLBE et al. (2021) in dieser Zeitschrift.

Darauf aufbauend wird in dieser Arbeit unter Berücksichtigung weiterer Daten aus der Bodenuntersuchung:

- eine schlaggenaue Betriebsanalyse der Nährstoff- und Humusbilanzen,
- eine Bewertung der Ergebnisse
 - der Bodenanalysen und Düngebedarfsermittlung für Stickstoff (N), Phosphor (P), Kalium (K), Magnesium (Mg), Schwefel (S),
 - des pH-Wertes und
 - der Umweltwirkung der Betriebssysteme vorgenommen.

Durch Szenarienrechnungen werden Lösungsvorschläge zur Verbesserung des Nährstoffmanagements vorgestellt.

2 Material und Methoden

2.1 Datengrundlage

Die Untersuchung basiert auf einer Datenerhebung der Schlagkarteien der landwirtschaftlichen Nutzfläche und der Tierhaltung sowie der Erhebung von Ergebnissen der Bodenuntersuchung aus 32 Betrieben des ökologischen Landbaus von allen wesentlichen Standorten (Agrarstrukturgebiete) des Freistaates Sachsen aus den Jahren 2006 – 2011 (810 Ackerschläge mit über 6.700 ha; Tabelle 1). Für weitere Analysen wurden auch verfügbare neuere Daten aufgenommen.

Die detaillierte Bewirtschaftung wurde bei den meisten Betrieben für sechs aufeinander folgende Jahre erhoben (ca. 4.860 „Ackerschlagjahre“), um möglichst jeweils einen vollständigen Fruchtfolgeumlauf je Ackerschlag aufzunehmen. Die erhobenen Daten wurden sowohl in das Tabellenkalkulationsprogramm EXCEL als auch für tieferegehende Analysen in aktuelle Programme zum Nährstoffmanagement aufgenommen (KOLBE et al., 2015).

Tabelle 1:**Ackerflächen und weitere Standortkennwerte der untersuchten ökologisch wirtschaftenden Betriebe**

| Betrieb [Nr.] | Ackerfläche (AF) [ha] | Acker- schläge [Anzahl] | Anteil Grünland (GF) an Summe GF + AF [%] | Tierbesatz [GV/ ha GF+AF] | Jahres- niederschlag [mm] | Jahresmittel- temperatur [°C] | Höhe über NN [m] | Vorherrsch. Bodenart der Ackerflächen | Umstellung des Betriebes [Jahr] |
|------------------|-----------------------------|-------------------------------|--|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---|--|
| 1 | 189,5 | 16 | 18,6 | 0,7 | 640 | 9,2 | 250 | L | 1990 |
| 2 | 632,7 | 67 | 17,8 | 0,2 | 531 | 9,9 | 110 | IS | 1992 |
| 3 | 21,1 | 6 | 65,5 | 0,4 | 640 | 9,5 | 220 | L | 1995 |
| 4 | 56,6 | 24 | 37,7 | 0,7 | 870 | 7,5 | 600 | sL | 1990 |
| 5 | 89,1 | 21 | 32,9 | 1,1 | 870 | 7,5 | 540 | sL | 1994 |
| 6 | 180,0 | 18 | 25,6 | 0,3 | 763 | 7,7 | 510 | sL | 2003 |
| 7 | 146,8 | 21 | 13,7 | 0,2 | 657 | 8,2 | 160 | sL | 2004 |
| 8 | 203,3 | 17 | 7,0 | - | 667 | 8,9 | 280 | IS | 1996 |
| 9 | 36,1 | 13 | 19,1 | 0,5 | 684 | 10,9 | 175 | sL | 1993 |
| 10 | 28,2 | 2 | - | - | 585 | 9,1 | 220 | L | 2001 |
| 11 | 17,8 | 5 | - | - | 684 | 9,4 | 230 | L | 2003 |
| 12 | 75,5 | 9 | - | - | 643 | 8,5 | 370 | sL | 2003 |
| 13 | 842,3 | 99 | 31,6 | 0,4 | 680 | 6,5 | 550 | sL | 2001 |
| 14 | 257,1 | 35 | 0 | - | 450 | 7,5 | 110 | SL | 2000 |
| 15 | 306,9 | 26 | 15,8 | 0,2 | 635 | 9,1 | 150 | SL | 2002 |
| 16 | 47,0 | 6 | 45,9 | - | 555 | 10,0 | 87 | sL | 2000 |
| 17 | 16,8 | 13 | 72,4 | 0,7 | 727 | 6,9 | 380 | IS | 1993 |
| 18 | 40,7 | 20 | 40,9 | 0,8 | 620 | 7,6 | 350 | IS | 1992 |
| 19 | 302,5 | 21 | 4,5 | - | 690 | 9,5 | 205 | L | 2007 |
| 20 | 120,2 | 23 | 43,1 | 0,6 | 700 | 8,1 | 280 | sL | 1992 |
| 21 | 480,2 | 18 | - | - | 580 | 8,5 | 154 | IS | 2007 |
| 22 | 346,3 | 39 | 10,9 | 0,5 | 641 | 8,2 | 280 | sL | 1990 |
| 23 | 61,8 | 9 | 27,5 | 0,5 | 542 | 8,7 | 100 | IS | 2001 |
| 24 | 63,7 | 20 | 22,9 | 1,1 | 701 | 7,9 | 370 | sL | 2003 |
| 25 | 50,7 | 9 | 23,8 | 0,5 | 651 | 9,9 | 245 | sL | 1993 |
| 26 | 55,1 | 11 | 10,4 | 0,1 | 608 | 9,8 | 160 | IS | 1999 |
| 27 | 207,2 | 20 | 4,8 | 1,4 | 684 | 9,4 | 168 | uL | 2001 |
| 28 | 842,1 | 67 | - | - | 550 | 9,3 | 124 | sL | 1991 |
| 29 | 67,7 | 6 | - | - | 588 | 10,2 | 149 | sL | 1994 |
| 30 | 565,0 | 109 | 67,1 | 0,2 | 680 | 6,5 | 550 | sL | 1994 |
| 31 | 226,9 | 17 | 37,5 | 0,2 | 450 | 7,5 | 110 | sL | 2000 |
| 32 | 165,0 | 23 | - | - | 684 | 9,4 | 168 | uL | 2001 |

Die Gehalte an pflanzenverfügbaren Nährstoffen der Ackerkrume (0 – 30 cm Tiefe) wurden für P und K im DL- bzw. CAL-Extrakt (EGNER & RIEHM, 1955; SCHÜLLER, 1969), für Mg im CaCl₂-Extrakt (SCHACHTSCHABEL, 1956) sowie der pH-Wert in 0,01 M CaCl₂ ermittelt. Eine genaue Beschreibung der untersuchten Betriebe und der Verrechnungswerkzeuge findet sich bei MEYER et al. (2020b).

2.2 Bewertung des Nährstoff- und Humusmanagements

Die Beurteilung des aktuellen Versorgungszustandes der Böden mit den Hauptnährstoffen Phosphor (P), Kalium (K) und Magnesium (Mg), der pH-Werte und der Humusbilanzen erfolgte nach der

Klassifikation des Verbandes der Landwirtschaftlichen Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA). Die Nährstoff- und Humusbilanzierung (STAND-Methode), Düngebedarfsbemessung für P, K und Mg sowie die Kalkung erfolgte separat für jeden Ackerschlag mit dem Programm BEFU bzw. BESyD, Teil Ökologischer Landbau (KOLBE & KÖHLER, 2008; KOLBE & SCHUSTER, 2011; PETER, 2020).

Zur schlagbezogenen Beurteilung einer möglichen Ertragsgefährdung durch suboptimale pH-Werte und Bodengehalte der Hauptnährstoffe P, K und Mg oder einer zu geringen Zufuhr an organischer Substanz (Humus) wurde die 5-stufige VDLUFA-Klassifikation (VDLUFA, 1999, 2000, 2014, 2018) in ein 3-stufiges Bewertungsschema überführt. Eine Ertragsgefährdung lag vor, wenn sich die Bodengehalte der Hauptnährstoffe P, K, Mg unterhalb der für den ökologischen Landbau als optimal geltenden Versorgungsklasse B, bzw. der pH-Wert der Böden sowie die schlagbezogenen Humusbilanzen unterhalb der Versorgungsklasse C befanden (Tabelle 2).

Aus entsprechenden experimentellen Arbeiten geht eindeutig hervor, dass die Wahrscheinlichkeit einer Ertragsgefährdung und weiterer negativer Aspekte der Bodenfruchtbarkeit deutlich ansteigt, wenn die Versorgungsklasse A (Grundnährstoffe P, K, Mg) sowie die Klasse A bzw. B (pH-Wert, Nährstoff- u. Humussalden) erreicht werden (KOLBE, 2010, 2015). Für die Bewertung der P- und K-Versorgung besteht zudem eine alternative Öko-Bewertungsskala, die aus Ergebnissen von Ökoversuchen erstellt worden ist. Umgekehrt wurde von einer Überversorgung ausgegangen, wenn die Bodengehalte für P, K und Mg sowie der pH-Wert die Versorgungsklasse C überschritten bzw. die Humusbilanzen im Bereich der Klasse E lagen. Hohe und sehr hohe P-Gehalte des Bodens und/oder sehr hohe Humussalden bedeuten ein erhöhtes Risiko für Nährstoffverluste und wurden daher als Indiz für eine (potenzielle) Umweltgefährdung gewertet.

Tabelle 2:
Bewertung der Bodengehalte für die Hauptnährstoffe P, K, Mg, der pH-Werte und der Humusbilanzen auf der Grundlage der VDLUFA-Versorgungsklassen

| Bewertung | | | VDLUFA-Versorgungsklassen | | | | |
|-----------|---------|---|------------------------------|---|----------------------|-------------------------------------|-------------------|
| | | | P, K (öko) | P, K | Mg | pH-Wert | Humusbilanz (öko) |
| I | gering | direkte Ertragsgefährdung | A, B | A | A | A, B | A, B |
| II | optimal | Erreichung u. Sicherung optimaler Erträge | C | B, C | B, C | C | C, D |
| III | hoch | Überversorgung, ggf. potenzielle Umweltgefährdung | D, E | D, E | D, E | D, E | E |
| Quellen | | | KOLBE (2019); VDLUFA, (2018) | ALBERT et al. (2007), VDLUFA (1997, 1999) | ALBERT et al. (2007) | ALBERT et al. (2007), VDLUFA (2000) | VDLUFA (2014) |

Die Nährstoffbilanzierung wurde auf Schlagebene für Stickstoff (N), Phosphor (P), Kalium (K), Magnesium (Mg) sowie Schwefel (S) berechnet. Die N-Salden sowie die symbiotische N₂-Fixierleistung der Haupt- und Zwischenfruchtleguminosen wurden entsprechend den im Programm BEFU angegebenen quantitativen Kalkulationsansätzen ermittelt (KOLBE & KÖHLER, 2008; KOLBE, 2009). Für Stickstoff und Schwefel werden Brutto-Bilanzen dargestellt, die auch Zuflüsse über trockene, feste oder gasförmige Depositionen berücksichtigen (N: 30 kg/ha Deposition, 10 kg/ha nicht-legume N-Bindung, Saat- u. Pflanzgut; S: 8 kg/ha Deposition).

Zur Beurteilung der Nährstoffbilanzsalden wurde ebenfalls entsprechend experimenteller Erfahrungen eine 3-stufige Klassifizierung entwickelt, wobei für die Nährstoffe P, K und Mg zwischen leichten Böden bzw. mittleren bis schweren Böden auf Grund deren unterschiedlichen Nachlieferungspotenzialen unterschieden wurde (Tabelle 3). Eine Ertragsgefährdung wurde manifestiert, wenn sich die Salden der Hauptnährstoffe im Bereich der Klasse I befanden. Dies wäre bei Stickstoff beispielsweise bei Salden < 0 kg N/ha und Jahr der Fall. Bei P, K und Mg wurden zu niedrige Salden dann vermerkt, wenn bereits zu geringe Bodengehalte dieser Nährstoffe nach Tabelle 2 eine Ertragsgefährdung erwarten lassen.

Salden der Klasse III (hoch) für Stickstoff und eingeschränkt auch für Phosphor wurden als Indiz einer möglichen Umweltgefährdung durch Nährstoffausträge bewertet. Die Berechnung der Nährstoffeffizienz (%) für Stickstoff erfolgte mit folgender Gleichung: N-Abfuhr x 100 / N-Gesamt-Zufuhr. Die erhaltenen Ergebnisse wurden nach Vorgaben von MEYER et al. (2019) bewertet: A = >125, B = 101 bis 125, C = 76 bis 100, D = 50 bis 75, E = <50 % N-Effizienz.

Tabelle 3:
Bewertung der Nährstoffbilanzsalden

| Bewertung | Nährstoffbilanz-Saldo [kg/ha u. Jahr] | | | | | | | |
|-----------|---------------------------------------|---|---------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|
| | N | P | | K | | Mg | | S |
| | | leichte Böden | mittlere u. schwere Böden | leichte Böden | mittlere u. schwere Böden | leichte Böden | mittlere u. schwere Böden | |
| I gering | < 0 | < 2 | < -2 | < 0 | < -40 | < 0 | < -20 | < 0 |
| II mittel | 0 – 50 | 2 – 7 | -2 – 5 | 0 – 30 | -40 – 0 | 0 – 10 | -20 – 0 | 0 – 20 |
| III hoch | > 50 | > 7 | > 5 | > 30 | > 0 | > 10 | > 0 | > 20 |
| Quellen | KOLBE (2015) | KOLBE & KÖHLER (2008); KOLBE et al. (in Vorbereitung) | | KOLBE & KÖHLER (2008) | | KOLBE & KÖHLER (2008) | | vorläufige Festlegung |

Folgende Bodenarten-Codes wurden verwendet: leichte Böden: S = 1, Sl = 2, IS; mittlere u. schwere Böden: IS = 3; SL = 4, sL = 5, L = 6, IT = 7, T = 8.

2.3 Erfassung des Ertragsausfalls

Auf Grund von vorliegenden Auswertungen von vielen Nährstoffsteigerungsversuchen kann die Ertragswirkung entsprechend dem Gesetz vom abnehmenden Ertragszuwachs und dem Minimumgesetz (MITSCHERLICH, 1909) quantitativ dargestellt werden. Unter Zuhilfenahme der üblichen Klassifizierungsschlüssel wurde ausgehend von einer Versorgung der Klassen B bzw. C zur Erreichung eines optimalen Ertragsniveaus (= 100 %) der relative Ertragsabfall bei zunehmender Ertragsschwankung durch eine abnehmende Versorgung durch Bodengehalte bzw. Bilanzsalden der Klassen B und A für einige wichtige Nährstoffe und des pH-Wert mit hoher Sicherheit für Anbauverfahren des ökologischen Landbaus abgeschätzt (Tabelle 4).

Tabelle 4:
Quantitativer Fruchtfolge-Ertragsausfall (Schwankungsbereich, Mittelwert (MW) bei Mangel im Vergleich zur optimalen Versorgung = 100 %) für einige Nährstoffe, Humus und den pH-Wert ermittelt aus Dauerversuchen

| Klasse | Humus- u. N-Saldo | | pH-Wert | | P-Gehalt | | K-Gehalt | | Mg-Gehalt | |
|---------|--|----|---|----|--------------|----|--------------|----|---|----|
| | Bereich | MW | Bereich | MW | Bereich | MW | Bereich | MW | Bereich | MW |
| B | 0 – 30 | 15 | 0 – 30 | 14 | 0 – 15 | 7 | 0 – 20 | 8 | 0 – 20 | 6 |
| A | 0 – 60 | 30 | 0 – 60 | 34 | 0 – 20 | 10 | 0 – 30 | 15 | 0 – 30 | 12 |
| Quellen | KOLBE (2015); MEYER et al. (2019, 2020a) | | VOSS & PESEK (1965); SCHWERTMANN et al. (1976); ROGASIK & KURTINECZ (2002); ROGASIK et al. (2005); KERSCHBERGER & PREUSKER (2012); HOLLAND et al. (2019); WEBER (2020); | | KOLBE (2019) | | KOLBE (2019) | | HOFFMANN et al. (1959); SLUIJSMANS (1959); Klasink (1977); KERSCHBERGER et al. (1986) | |

In Abhängigkeit vom Nährstoff konnte bei Vorlage einer Mangelversorgung folgende Rangfolge für den Ertragsausfall der Fruchtarten ermittelt werden:

- Humus Feldgemüse > Leguminosen-Gras > Hackfrüchte > Getreidearten
- N Hackfrüchte > Getreidearten > Feldgemüse > Leguminosen-Gras
- P, Mg keine Fruchtartenabhängigkeit
- K Körnerleguminosen > Hackfrüchte, Feldgemüse > Leguminosen-Gras > Getreidearten
- pH-Wert Ertragsverlust (KERSCHBERGER & MARKS, 2007):
 - 50 – 30 %: W.-Raps, Zucker- u. Futterrübe, Luzerne, Ackerbohne, S.-Gerste
 - 30 – 20 % S.-Raps, Rotklee, W.-Gerste, S.-Weizen, Triticale, Hafer, Durum, Senf
 - 20 – 10 % W.-Weizen, Weidelgras, Kartoffel, Mais, Wicken, Ölrettich
 - 10 – 0 % W.-Roggen, Erbse, Lupine, Serradella, Sonnenblume, Öllein.

Die experimentell ermittelten Ertragsausfälle entsprechend Tabelle 4 werden darüber hinaus von der Anzahl an einwirkenden Nährstoff-Faktoren beeinflusst (X_1 , X_n , Humus- u. N-Saldo werden nur als 1 Faktor gewertet). In Abhängigkeit von der Faktoranzahl kann die Summe an Ertragsausfällen folgendermaßen ermittelt werden:

- 1 Faktor: X_1 (% Ertragsausfall)
- 2 Faktoren: $X_1 + X_2 - (X_1 + X_2)/10$ (% Ertragsausfall)
- 3 Faktoren: $X_1 + X_2 + X_3 - (X_1 + X_2 + X_3)/3$ (% Ertragsausfall)
- 4 u. mehr Faktoren $X_1 + X_2 + X_3 + X_4 - (X_1 + X_2 + X_3 + X_4)/2$ (% Ertragsausfall).

Eine kurze Überprüfung der Genauigkeit des Berechnungsmodus entsprechend Tabelle 4 erfolgte an nachfolgenden zwei Beispielen, wobei jeweils nach der Umstellung auf Anbausysteme des Ökolandbaus ein Ertragsabfall im Verlauf von 15 – 20 Jahre in den Bewirtschaftungsvarianten experimentell ermittelt worden ist:

- Versuchsgut Gladbacherhof, Kernbetrieb, 8 Ackerschläge (Reeb, 2004; Sommer, 2010): experimentell ermittelter Ertragsabfall = 16 %; laut Erhebung 75 % der Schläge von Ertragsausfall durch zu niedrige pH-Werte, P- und K-Gehalte des Bodens betroffen (teilweise zu geringe Humus- oder N-Salden, zu den Nährstoffen Mg u. S lagen keine Werte vor); berechneter Ertragsausfall = 14 %.
- Ökofeld Roda, viehlose Fruchtfolge, 4 Ackerschläge (Meyer et al., 2020a): experimenteller Ertragsausfall = 19 %; alle Schläge von zu niedrigen K-Gehalten des Bodens betroffen, teilweise auch durch zu niedrige P-Gehalte u. N-Salden; berechneter Ertragsausfall = 18 %.

2.4 Szenarienrechnungen

Da zwischen den Nährstoffsalden der Grundnährstoffe P, K und Mg und der zeitlichen Veränderung an pflanzenverfügbaren Gehalten dieser Nährstoffe im Boden (0 – 30 cm Tiefe) relativ unabhängig von der Düngungsart (mineralisch, organisch) und dem Anbausystem sehr enge, weitgehend lineare statistische Beziehungen bestehen, können die erhaltenen mathematischen Gleichungen für die Düngebedarfsermittlung Verwendung finden (Kolbe & Köhler, 2008). Da auf Grundlage der erhaltenen Nährstoffsalden (X) die Veränderung der löslichen Bodengehalte ermittelt werden kann (Y), sind die Gleichungen auch für Szenarienrechnungen geeignet.

Aus einer hohen Anzahl an hierfür erfassten Nährstoffsteigerungsversuchen aus Deutschland konnten folgende mathematisch statistische Gleichungen ermittelt werden:

- ΔP (mg/100 g Boden) = - 0,0474 + 0,009282X1 + 0,01582X2 (r = 0,683***; n = 928 Versuchsvarianten; X1 = P-Saldo (-40 bis +60 kg/ha); X2 = Bodenart (1 - 8))
- ΔK (mg/100 g Boden) = - 0,13482 + 0,004402X1 + 0,052292X2 (r = 0,572***; n = 968 Varianten; X1 = K-Saldo (-200 bis +200 K/ha); X2 = Bodenart (1 - 8))
- ΔMg (mg/100 g Boden) = - 0,0410 + 0,003895X1 + 0,0189796X2 (r = 0,579***; n = 93 Varianten; X1 = Mg-Saldo (-30 bis +50 kg/ha); X2 = Bodenart (1 - 8)).

Eine Überprüfung der Genauigkeit der berechneten Saldo-Ergebnisse (Xn) erfolgte an unabhängigen Datensätzen nachfolgend genannter Dauerversuche des Ökolandbaus für Lößlehm (L = 6) und anlehmigen Sand (Sl = 2) (Kolbe et al., in Vorbereitung; Meyer et al., 2020a) entsprechend der Bedingung für: Yn (Δ Nährstoffgehalt Boden) = 0:

- Phosphor: Lehm, Experiment P-Saldo = -1,9 bis -3,9 kg/ha; Berechnung P-Saldo = -5,1 kg/ha; anlehmiger Sand, Experiment P-Saldo = +1,4 bis +2,2 kg/ha; Berechnung P-Saldo = +1,7 kg/ha
- Kalium: Lehm, Experiment K-Saldo = -45 kg/ha; Berechnung K-Saldo = -41 kg/ha; anlehmiger Sand, Experiment K-Saldo = +8,5 kg/ha; Berechnung +6,9 kg/ha
- Magnesium: Lehm, Experiment Mg-Saldo = -4,7 kg/ha, Berechnung Mg-Saldo = -18,7 kg/ha; anlehmiger Sand, Experiment Mg-Saldo = +3,9 kg/ha, Berechnung Mg-Saldo = +0,8 kg/ha.

Auf Grund der erlangten Übereinstimmung zwischen Experiment und Berechnung wurden die gefundenen Gleichungen für Phosphor und Kalium für die Bodenarten 1 – 6 angewendet, für schwerere Böden wurden die Werte für Bodenart 6 verwendet. Für den Nährstoff Magnesium können lediglich sichere Werte für leichte bis mittlere Böden (Bodenarten 1 – 3 (4)) berechnet werden. Die zu erwartenden Veränderungen in den Nährstoffgehalten des Bodens wurden für nachfolgend genannte Szenarien jeweils für eine Zeitperiode von 10 Jahren für jeden Ackerschlag der 32 Betriebe berechnet:

- Veränderung der Bodengehalte und Klassenzugehörigkeiten bei Fortsetzung der Bewirtschaftung des Ist-Zustandes
- Veränderung der Bodengehalte bei ausschließlicher Düngung nach Nährstoffentzug (HEGE & OFFENBERGER, 2001; KOLBE, 2010)
- Veränderung der Bodengehalte bei Düngung nach „guter fachlicher Praxis“ mit dem PC-Programm BEFU bzw. BESyD Teil Ökolandbau (KOLBE & KÖHLER, 2008)
- Veränderung von N-Salden und -Effizienzen nach Behebung der Ertragsausfälle durch Grunddüngung und Kalkung.

2.5 Statistische Verrechnung

Die untersuchten Betriebe unterscheiden sich in der Anzahl ihrer Schläge und die Einzelschläge in ihren Schlaggrößen. Zur Aggregation einzelner Untersuchungsparameter auf Schlag- oder Betriebsebene wurde neben der gewöhnlichen Mittelwertbildung auch die Form des gewogenen Mittelwertes für eine Bereinigung der Ergebnisse verwendet, um die unterschiedlichen Schlagzahlen und Flächengrößen zu berücksichtigen. Zur visuellen Darstellung der Ergebnisse wurden speziell angefertigte Tabellen und Balkendiagramme verwendet. Die statistischen Beziehungen zwischen den verschiedenen Parametern sind durch Ausweisung der Standardabweichung (s), Korrelations- und Regressionsanalysen beschrieben. Die Signifikanzniveaus für die berechneten Korrelationskoeffizienten (r) nach PEARSON betragen:

$p = 10\% (*)$, $p = 5\% *$, $p = 1\% **$, $p = 0,1\% ***$.

3 Ergebnisse

3.1 Analyse des Nährstoff- und Anbaumanagements auf Betriebsebene

Eine oft gewählte Form ist die Darstellung der erhobenen Ergebnisse auf Betriebsebene, als aggregierter Durchschnitt der erfassten Betriebe bzw. von bestimmten Betriebstypen (Tabelle 5: Gesamtheit 32, Futterbau 10, Marktfrucht mit Schwerpunkt Feldgemüse 7, reiner Marktfrucht 9 Betriebe).

Typischer **Futterbau** wird in Sachsen eher in kleineren Betrieben vorgefunden, die sowohl über einen relativ hohen Umfang an Grünland als auch eine Viehhaltung (meistens Rinder) von 0,74 VE/ha Gesamtfläche verfügen. Sie weisen einen geringen Anbauumfang an Getreide und Körnerleguminosen, den höchsten Umfang an Futterleguminosen sowie eine legume N₂-Bindung von 54 kg N/ha auf. Mit dem Anfall an organischen Düngemitteln werden dem Boden im Durchschnitt 34 kg N/ha und entsprechend hohe Werte der anderen untersuchten Nährstoffe zugeführt, die berechnete N-Effizienz weist mit 75 % bereits nur noch einen niedrigen bis mittleren Werte der Klasse D auf. Die Ergebnisse der Humusbilanzierung liegen mit 302 Humus-Äquivalenten (HÄQ) je ha ebenfalls bereits in der Versorgungsklasse D. Die Werte liegen in diesen Betrieben doppelt so hoch wie im Betriebsdurchschnitt und dreimal so hoch wie auf den untersuchten Feldgemüse- und Marktfruchtbetrieben (Tabelle 5).

Feldgemüse wird demgegenüber in einigen besonders großen Betrieben mit vergleichsweise geringem Getreide- und Ölpflanzenanbau angebaut. Mit 22 % der Ackerfläche besteht hier der

höchste Anbauumfang an Körnerleguminosen, der geringste an Futterleguminosen sowie mit 61 kg N/ha die höchste legume N₂-Bindung von allen Betriebstypen. Darüber hinaus weisen die Feldgemüsebetriebe, über eine verhältnismäßig hohe Zufuhr an organischen Düngemitteln eine bessere Versorgungslage mit fast allen Nährstoffen auf, was sowohl an den günstigeren Nährstoffsalden als auch an den Gehalten einiger verfügbarer Nährstoffe im Boden und am pH-Wert zu erkennen ist. Im flächenbereinigten Mittel aller untersuchten Betriebe waren bei Stickstoff mit 32 kg/ha optimale, bei Phosphor mit annähernd -10 kg bzw. Kalium mit -60 kg/ha aber deutlich negative Schlagsalden zu verzeichnen (Tabelle 5).

Der klassische **Marktfruchtanbau** ist dagegen gekennzeichnet durch mittelgroße Betriebe mit hohem Anbauumfang an Getreide und Ölpflanzen und verhältnismäßig geringem Umfang an Hackfrüchten inklusive Mais sowie Körner- und Futterleguminosen. Er weist eine ausgesprochen geringe Tierhaltung und niedrige Grünlandanteile und eine sehr niedrige Zufuhr an organischen Düngemitteln auf. Für diese typische Betriebskonstellation wurden jeweils vergleichsweise niedrige Werte sowohl in den Nährstoffsalden, in der Humusbilanz und auch bereits bei einigen Bodengehalten an Nährstoffen ermittelt. Auf Grund der mäßigen N-Versorgung wurden N-Effizienzen von durchschnittlich 88 % berechnet, die in die gewünschte Klasse C eingestuft werden können (Tabelle 5).

Im Bereich der Grundnährstoffe werden allerdings erst nach Zusammenfassung der Informationen der einzelnen Merkmale folgende Unterschiede zwischen den Einstufungsklassen A bis E sichtbar:

- Zwischen der Gesamtheit der Betriebe und den Futterbaubetrieben sind keine Unterschiede zu erkennen, die mittleren Werte betragen: A = 4 %, B = 20 %, C = 27 %, D = 31 %, E = 18 %
- Feldgemüsebetriebe sind gekennzeichnet durch in der Summe ca. 12 % geringere Anteile in den Klassen A und B sowie entsprechend höhere Anteile in C und D bei gleich hohen Werten in der Klasse E
- Marktfruchtbetriebe weisen demgegenüber eine ca. 10 % höhere Einstufung in den Klassen A bis C und entsprechend niedrigere Werte in den Klassen D und E auf.

Die Phosphor-, Kalium- und Magnesiumversorgung der Ackerflächen war im Mittel der Flächen eines jeden Betriebes durchweg ausreichend bis hoch (Versorgungsklassen B bis D), für Magnesium meistens geogen bedingt sogar sehr hoch (Versorgungsklasse E, Tabelle 5). Ertragsrisiken durch eine Unterversorgung mit diesen Nährstoffen zeichneten sich bei der betriebsweisen Analyse offenbar nicht ab. Entsprechend der Betriebsdauer konnte jedoch der Beginn einer Differenzierung der Bodenklassen durch die gewählte Betriebsspezialisierung nachgewiesen werden.

Tabelle 5: Ergebnisse der Erhebungen im Betriebsdurchschnitt und entsprechend der Spezialisierung auf Futterbau, Feldgemüse und Marktfruchtbau (gewogene Mittelwerte inklusive Standardabweichung)

| Merkmal | | Gesamtheit | Futterbau | Feldgemüse | Marktfrucht |
|---|-------|-------------------|------------------|-------------------|--------------------|
| Anzahl Betriebe | | 32 | 10 | 7 | 9 |
| Durchschnittliche Betriebsgröße (ha) | | 211 | 115 | 318 | 181 |
| Viehbesatz (VE/ha) | | 0,35 | 0,74 | 0,06 | 0,06 |
| Grünland (% Gesamtbetrieb) | | 22 | 35 | 8 | 11 |
| Ackerzahl | | 47 ±13 | 47 ±17 | 49 ±9 | 51 ±12 |
| Getreide (% AF) | | 48 ±12 | 45 ±12 | 45 ±16 | 50 ±12 |
| Ölfrüchte (% AF) | | 2,6 ± 3,7 | 1,8 ±2,8 | 0,6 ±0,8 | 3,3 ±3,9 |
| Hackfrüchte, Mais (% AF) | | 5,4 ±8,2 | 6,7 ±11,3 | 5,3 ±7,5 | 5,2 ±7,5 |
| Körnerleguminosen (% AF) | | 12 ±9 | 7,1 ±6,0 | 22 ±10 | 11 ±8 |
| Futterleguminosen (% AF) | | 27 ±11 | 33 ±12 | 21 ±7 | 23 ±14 |
| Legume N-Bindung (kg N/ha) | | 54 ±23 | 54 ±20 | 61 ±22 | 51 ±28 |
| N-Effizienz (% Zufuhr = 100) | | 78 ±28 | 75 ±23 | 74 ±30 | 88 ±40 |
| Zufuhr organischer Düngemittel (kg/ha) | N | 21 ±18 | 34 ±19 | 23 ±22 | 9 ±7 |
| | P | 6 ±5 | 9 ±5 | 6 ±6 | 3 ±3 |
| | K | 33 ±30 | 54 ±33 | 32 ±33 | 14 ±15 |
| | Mg | 4 ±3 | 6 ±3 | 4 ±4 | 2 ±1 |
| | S | 4 ±4 | 7 ±4 | 4 ±5 | 2 ±1 |
| Schlagsalden Nährstoffe (kg/ha) | N | 31,9 ±27,7 | 35,0 ±23,0 | 44,3 ±27,2 | 24,5 ±35,8 |
| | P | -9,9 ±4,9 | -6,8 ±6,2 | -6,0 ±6,1 | -8,9 ±4,3 |
| Humus (HÄQ/ha) | K | -59,6 ±24,1 | -50,8 ±29,7 | -29,9 ±32,4 | -45,0 ±25,7 |
| | Mg | 13,3 ±25,6 | 13,5 ±32,0 | 12,1 ±17,4 | 7,8 ±25,3 |
| | S | 3,0 ±3,5 | 0,6 ±4,3 | 3,8 ±2,8 | 4,2 ±3,3 |
| | Humus | 150 ±182 | 302 ±261 | 100 ±98 | 111 ±155 |
| pH-Wert Nährstoffgehalte Boden (mg/100 g) | pH | 6,0 ±0,5 | 5,9 ±0,4 | 6,3 ±0,3 | 6,0 ±0,4 |
| | P | 5,6 ±3,0 | 4,7 ±3,2 | 6,0 ±2,4 | 5,8 ±3,0 |
| | K | 12,8 ±6,8 | 11,8 ±5,3 | 12,7 ±5,9 | 12,2 ±7,3 |
| | Mg | 11,5 ±6,1 | 14,8 ±5,7 | 10,6 ±5,0 | 10,2 ±3,8 |
| pH-Wert Klassen (%) | A | 4,5 | 5,1 | 0,6 | 3,6 |
| | B | 39,4 | 53,1 | 17,1 | 41,1 |
| | C | 50,1 | 38,9 | 64,8 | 55,4 |
| | D | 5,6 | 2,9 | 12,5 | 0,0 |
| | E | 0,4 | 0,0 | 1,1 | 0,0 |
| P-Gehalt Klassen (%) | A | 2,8 | 4,1 | 0,6 | 2,9 |
| | B | 15,0 | 23,7 | 6,1 | 12,4 |
| | C | 28,0 | 30,6 | 21,1 | 40,0 |
| | D | 47,2 | 35,3 | 61,1 | 33,3 |
| | E | 6,9 | 6,4 | 11,1 | 11,4 |
| K-Gehalt Klassen (%) | A | 7,0 | 4,1 | 1,8 | 14,3 |
| | B | 9,7 | 8,1 | 13,0 | 10,5 |
| | C | 23,0 | 27,9 | 23,7 | 20,0 |
| | D | 50,5 | 54,7 | 52,1 | 41,9 |
| | E | 9,8 | 5,2 | 9,5 | 13,3 |
| Mg-Gehalt Klassen (%) | A | 1,0 | 0,6 | 0,6 | 1,0 |
| | B | 8,9 | 2,3 | 7,7 | 19,0 |
| | C | 13,1 | 7,6 | 14,8 | 20,0 |
| | D | 25,0 | 27,5 | 29,0 | 19,0 |
| | E | 52,1 | 62,0 | 47,9 | 41,0 |

3.2 Analyse des Nährstoff- und Anbaumanagements der Betriebe auf Schlagebene

Die schlagweise Auswertung hat gegenüber der betriebsweisen Vorgehensweise den Vorteil, dass bei den Bewertungskriterien keine Mittelwertbildung über die Ackerschläge erfolgt, wodurch das wahre Ausmaß an Differenzierung nivelliert und somit Bewirtschaftungsfehler oft nicht erkannt werden können. Zudem kann das Nährstoffmanagement der Betriebe gewöhnlich nur auf Schlagebene durchgeführt werden. Zur Charakterisierung der Ergebnisse wurden Formblätter verwendet, die am Beispiel des Betriebes Nr. 30 auszugsweise dokumentiert werden (Tabelle 6).

An insgesamt 10 Merkmalen wurde die Ertragsgefährdung in direkter (pH-Wert, Nährstoffgehalte des Bodens, Humus- u. N-Saldo) und indirekter Weise (weitere Nährstoffsalden) ermittelt. Rot unterlegte Felder kennzeichnen Untersuchungs- und Bilanzierungsergebnisse von Ackerschlägen, in denen eine Ertragsgefährdung durch ein oder mehrere der berücksichtigten Merkmale eingetreten ist. So lag der pH-Wert in diesem Betrieb auf 9 von den insgesamt 15 abgebildeten Schlägen unterhalb des Optimums. Die Farbrunterlegung durch Orange zeigt darüber hinaus an, dass zwar von den betroffenen Merkmalen noch keine unmittelbaren Ertragsrisiken ausgehen, die Bewirtschaftung aber nicht optimal ist und die zukünftige Entwicklung der Bodengehalte regelmäßig verfolgt werden muss, um aufkommende Mängel in der Bodenfruchtbarkeit rechtzeitig zu erkennen.

Aus der zeilenweisen Summation der Einzelbewertungen je Schlag ergibt sich die Gesamtbeurteilung der Ertragsgefährdung der Einzelschläge durch Fehler im Nährstoff- und Humusmanagement (letzte Zeilen der Tabelle 6). So bestand eine Ertragsgefährdung durch zu geringe pH-Werte unter Einbeziehung aller Flächen des Betriebes auf 57 % der Ackerschläge. Insgesamt war weiterhin eine gesicherte direkte Gefährdung der Erträge durch zu niedrige P-Gehalte auf 28 %, durch zu niedrige K-Werte auf 44 % und zu geringe Mg-Gehalte des Bodens auf 9 % der Schläge ermittelt worden. Neben geringen Effekten durch negative N-Salden auf 13 % der Schläge ist zudem auf einen hohen Anteil an stark negativen P- und K-Salden hinzuweisen (Klassen I, Tabelle 6). Entgegen diesen Ergebnissen ist eine potenziell mögliche Umweltgefährdung durch zu hohe Bodengehalte und Nährstoffsalden nur auf einer Minderheit von 12 % der Ackerschläge vorzufinden (letzte Zeile, Tabelle 6).

Es wird deutlich, dass in diesem Beispielsbetrieb auf insgesamt 81 % der Schläge im Zeitraum der Erhebungen durch mindestens eines der hier geprüften Kriterien die Bodenfruchtbarkeit gefährdet war. Von den insgesamt 10 Bewertungskriterien wiesen zwischen 0 – 6 Kriterien auf ein suboptimales Nährstoff- und Humusmanagement hin, im Durchschnitt waren es 21 % der Bewertungskriterien je Schlag. Die Kalkulation des absoluten Ertragsausfalls ergab für diesen Betrieb im Durchschnitt aller

Flächen einen Wert von 14 %, im Durchschnitt der betroffenen Schläge von 19 % (Schwankung 6 – 41 %) Ertragsabfall. Für die betroffenen Schläge handelt es sich um ein allgemeines Gefährdungspotenzial, da in Abhängigkeit vom Nährstoff alle angegebenen Fruchtarten dieser Ackerflächen entsprechend dem Minimumgesetz und ihrem Gefährdungsrank betroffen sind.

Tabelle 6:

Bewertung der Bodengehalte und Salden der Hauptnährstoffe und des Humus am Beispiel einiger Schläge und als Gesamtergebnis des Betriebes Nr. 30 (Erklärung siehe Text)

| Schlag [Nr.] | Bodenart | pH-Wert | P-Gehalt Boden | K-Gehalt Boden | Mg-Gehalt Boden | Humusbilanz | N-Saldo | P-Saldo | K-Saldo | Mg-Saldo | S-Saldo | Ertragsgefährdung | Umweltgefährdung | Ertragsgefährdung [%] | |
|------------------------------|----------|-----------|----------------|----------------|-----------------|-------------|-----------|-----------|-----------|----------|-------------|-------------------|------------------|-----------------------|-----------|
| | | | | | | | | | | | | | | relativ | absolut |
| 1 | sL | I | II | II | III | II | II | I | I | III | II | ja | nein | 10 | 14 |
| 2 | sL | II | I | II | III | II | II | I | I | II | II | ja | nein | 20 | 10 |
| 3 | sL | III | II | III | III | II | II | I | I | III | II | nein | nein | - | - |
| 4 | sL | I | I | II | III | II | II | I | I | II | II | ja | nein | 30 | 19 |
| 5 | sL | I | I | II | II | II | II | I | I | II | II | ja | nein | 30 | 19 |
| 6 | sL | II | III | II | II | II | II | I | I | III | II | nein | nein | - | - |
| 7 | sL | II | II | III | III | II | II | I | II | III | II | nein | nein | - | - |
| 8 | sL | I | I | I | II | III | I | I | I | I | II | ja | nein | 60 | 21 |
| 9 | sL | III | I | II | III | II | II | I | I | II | II | ja | nein | 20 | 7 |
| 10 | sL | II | II | III | III | II | II | I | I | II | II | nein | nein | - | - |
| 11 | sL | I | II | I | II | III | II | I | I | II | II | ja | nein | 30 | 20 |
| 12 | sL | I | II | I | II | III | II | I | I | II | II | ja | nein | 30 | 20 |
| 13 | sL | I | II | I | I | III | I | I | I | I | II | Ja | nein | 60 | 37 |
| 14 | sL | I | I | I | I | III | II | I | I | II | II | ja | nein | 60 | 31 |
| 15 | sL | I | I | II | III | II | II | I | II | II | II | ja | nein | 30 | 19 |
| ~ | ~ | | | | | | | | | | | | | ~ | |
| Ertragsgefährdung (%) | | 57 | 28 | 44 | 9 | nein | 13 | 28 | 36 | 2 | nein | 81 | - | 21 | 14 |
| Umweltgefährdung (%) | | - | 16 | - | - | 28 | 12 | 0 | - | - | - | - | 12 | | |

Mit Hilfe der aufgeführten Methodik wurden die Ergebnisse der Ackerschläge der einzelnen Betriebe erfasst und anschließend zu Betriebsvergleichen zusammengeführt.

Wie aus Abbildung 1 zu entnehmen ist, lagen auf einer Grundlage von 717 erfassten Ackerschlägen (= 100 %) lediglich in 5 von 32 Betrieben die **pH-Werte** aller Schläge annähernd im Optimum (Klasse II). Eine Ertragsgefährdung durch suboptimale pH-Werte des Bodens (Klasse I) wurde insgesamt für 37 % (gMW, gewichtete Standardabweichung ± 28 %) der untersuchten Ackerschläge festgestellt. Besonders gravierend war die Situation in 7 Betrieben, in denen auf jeweils über 75 % der Schläge teils erhebliche Unterschreitungen der empfohlenen Boden-pH-Werte ermittelt wurden.

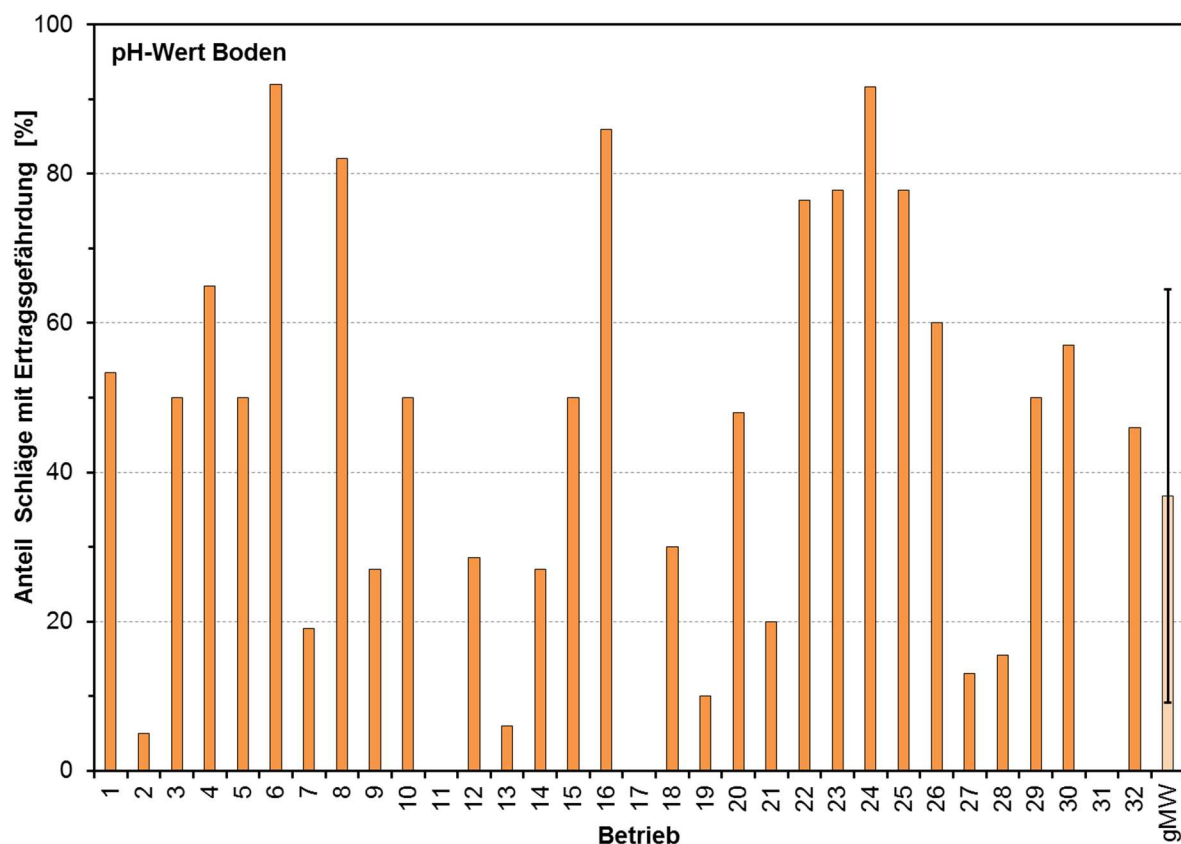


Abbildung 1: Ertragsgefährdung der Ackerschläge je Betrieb und im Mittel aller Schläge (gMW, inklusive Standardabweichung) durch zu geringe pH-Werte der Böden

Ebenfalls auf einer Grundlage von 717 Anbauflächen wurde eine direkte Ertragsgefährdung durch zu geringe **P-Gehalte** des Bodens (Klasse I) insgesamt für 14 Betriebe festgestellt (Abbildung 2). Handlungsbedarf bestand in 6 Betrieben, deren Schläge zu mindestens 30 % P-Defizite im Boden aufwiesen. Unter Berücksichtigung der z. T. stark negativen P-Salden bei der Düngebedarfsermittlung

bestand insgesamt bereits ein P-Bedarf in 17 Betrieben zur Aufrechterhaltung optimaler P-Gehalte (Öko-Versorgungsklasse C).

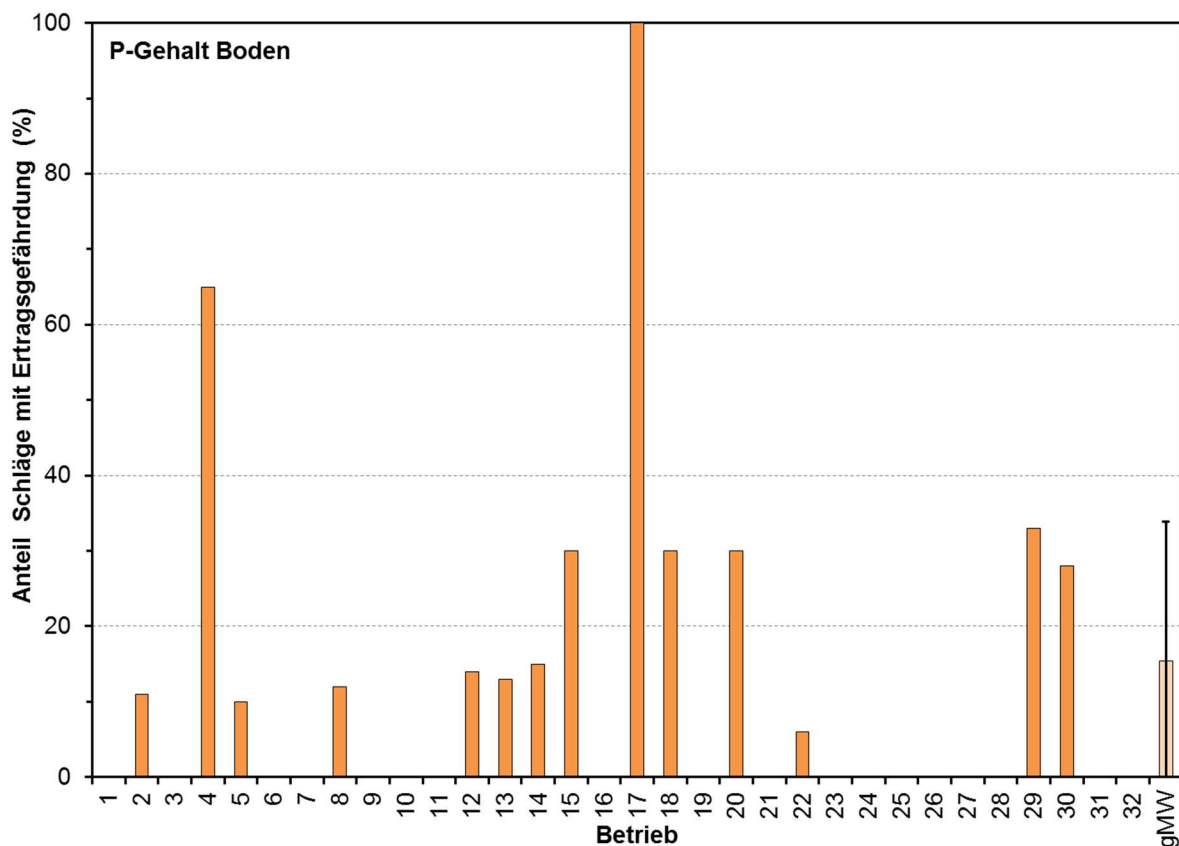


Abbildung 2: Ertragsgefährdung der Ackerschläge je Betrieb und im Mittel aller Schläge (gMW, inklusive Standardabweichung) durch zu geringe P-Gehalte der Böden

Eine Ertragsgefährdung durch zu geringe **K-Gehalte** des Bodens wurde in ähnlich hohem Umfang festgestellt (ohne Darstellung). In ca. 60 % der untersuchten Betriebe lagen die K-Gehalte im Bereich des Optimums (Klasse II). In 13 % aller untersuchten Ackerschläge waren die Werte jedoch bereits in den Bereich der Öko-Versorgungsklassen A oder B abgefallen. Besondere Defizite bestanden in 8 Betrieben mit einem Anteil von über 20 % durch K-Mangel gefährdeter Schläge.

Auf Grundlage von 808 Ackerschlägen wurden durchweg ausgeglichene bis leicht erhöhte **Humussalden** im Bereich der Versorgungstufen C und D (bzw. entsprechend Klasse II) in 10 der 32 Betriebe festgestellt. In den übrigen Betrieben wurden zumindest auf einer, meistens aber auf mehreren Ackerflächen teilweise Mängel in der Humuswirtschaft ermittelt (Note I). Im gewogenen Durchschnitt wurden für ca. 17 % der Schläge Humusbilanzen berechnet, die mittel bis langfristig einen Humusabbau und damit abnehmende Werte in der Bodenfruchtbarkeit erwarten lassen. Besonderer Handlungsbedarf besteht in 7 Betrieben, in denen jeweils deutlich mehr als 40 %,

teilweise sogar mehr als 70 % der Schläge zu geringe Zufuhren an organischer Substanz aufwiesen (Abbildung 3).

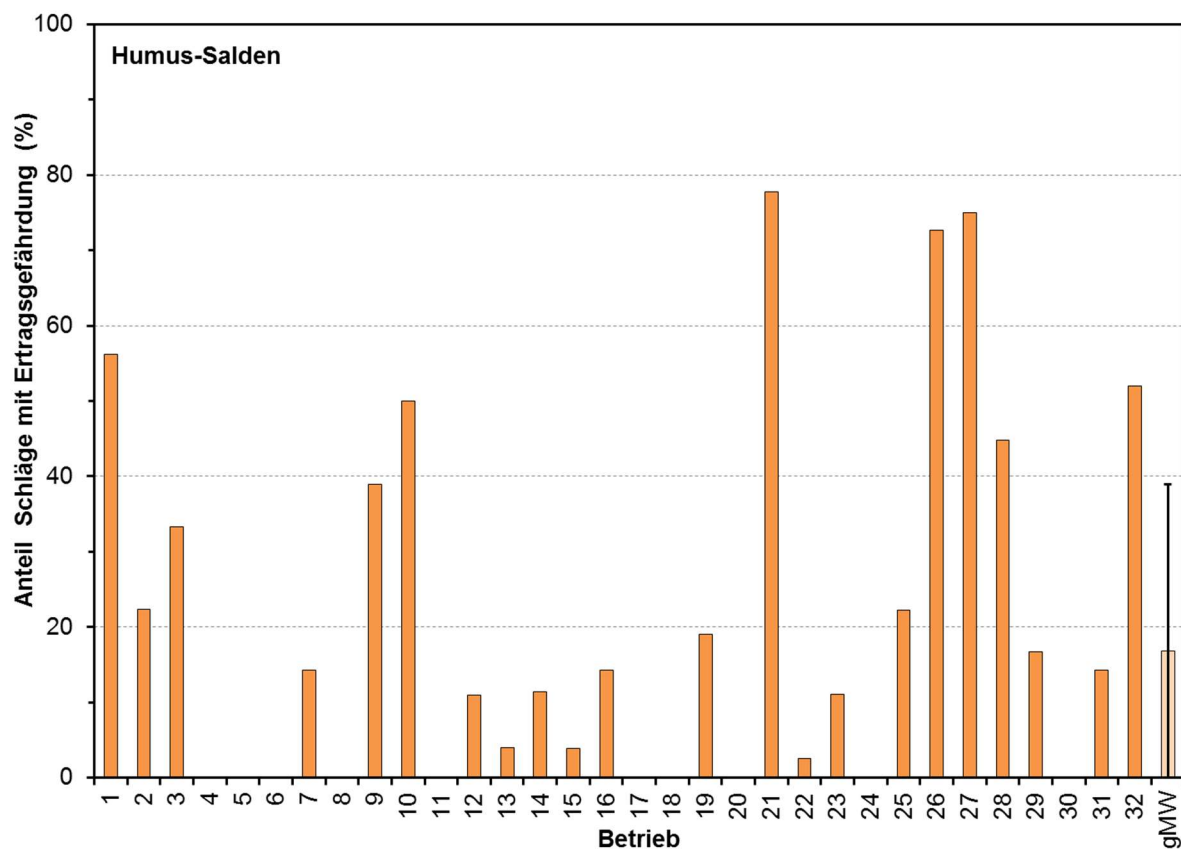


Abbildung 3: Ertragsgefährdung der Schläge je Betrieb und im Mittel aller Schläge (gMW, inklusive Standardabweichung) durch zu geringe Humusbilanzen

Eine vergleichbare Situation bestand bei den **N-Bilanzsalden** (ohne Darstellung), bei denen im gewogenen Durchschnitt der Betriebe auf 18 % der Schläge trotz Berücksichtigung der N-Deposition über die Atmosphäre negative Salden errechnet wurden, was als Hinweis auf eine unzureichende N-Versorgung anzusehen ist. Besonders galt dies für 7 Betriebe, bei denen auf mehr als 40 % der Ackerschläge über den 6-jährigen Untersuchungszeitraum negative N-Salden bestanden haben. Eine weitere Ursache für stark unregelmäßige Ergebnisse, die besonders für die Humus- und N-Bilanzen auftreten können, liegt jedoch in Ungenauigkeiten bei der Datenerhebung. Auf Betrieben mit sehr langen oder heterogenen Fruchtfolgen gelingt es trotz des 6-jährigen Untersuchungszyklus nicht für jede Ackerfläche, die Daten genau für eine vollständige Fruchtfolgerotation zu erheben.

Nährstoffsalden mit weiterem Potenzial zur Verringerung der bereits niedrigen Bodengehalte (rote Markierungen in den Formularen) bestanden für Phosphor in 14 Betrieben mit bereits 13 %

betroffenen Ackerschlägen und für Kalium auf 17 Betrieben mit 9 % der Schläge, auf denen zu niedrige Nährstoffsalden bestehen. Bei Schwefel und Magnesium liegen fast alle Nährstoffsalden auf einem höheren Niveau, lediglich die Werte von weniger als 2 % der insgesamt erfassten 808 Ackerflächen sind bisher zu beanstanden (ohne Darstellungen).

Eine Ertragsgefährdung durch Mängel im Nährstoffmanagement ist bereits gegeben, wenn sich nur einer der hier geprüften 10 Bewertungskriterien nicht im Optimum befindet. Abbildung 4 zeigt auf, dass dies bei einer Gesamtheit von 808 Flächen im gewogenen Durchschnitt auf 66 % (± 25) der Schläge der Fall war. Nur in Betrieb Nr. 11 war keine Ertragsgefährdung erkennbar. Für die anderen Betriebe ergab sich in der Summe der Einzelbewertungen für annähernd jeden Schlag eine Gefährdung des Ertragsniveaus und der Bodenfruchtbarkeit, meistens nur durch einen, oft aber auch durch mehrere Nährstofffaktoren (im Durchschnitt $1,9 \pm 0,6$ der geprüften Faktoren).

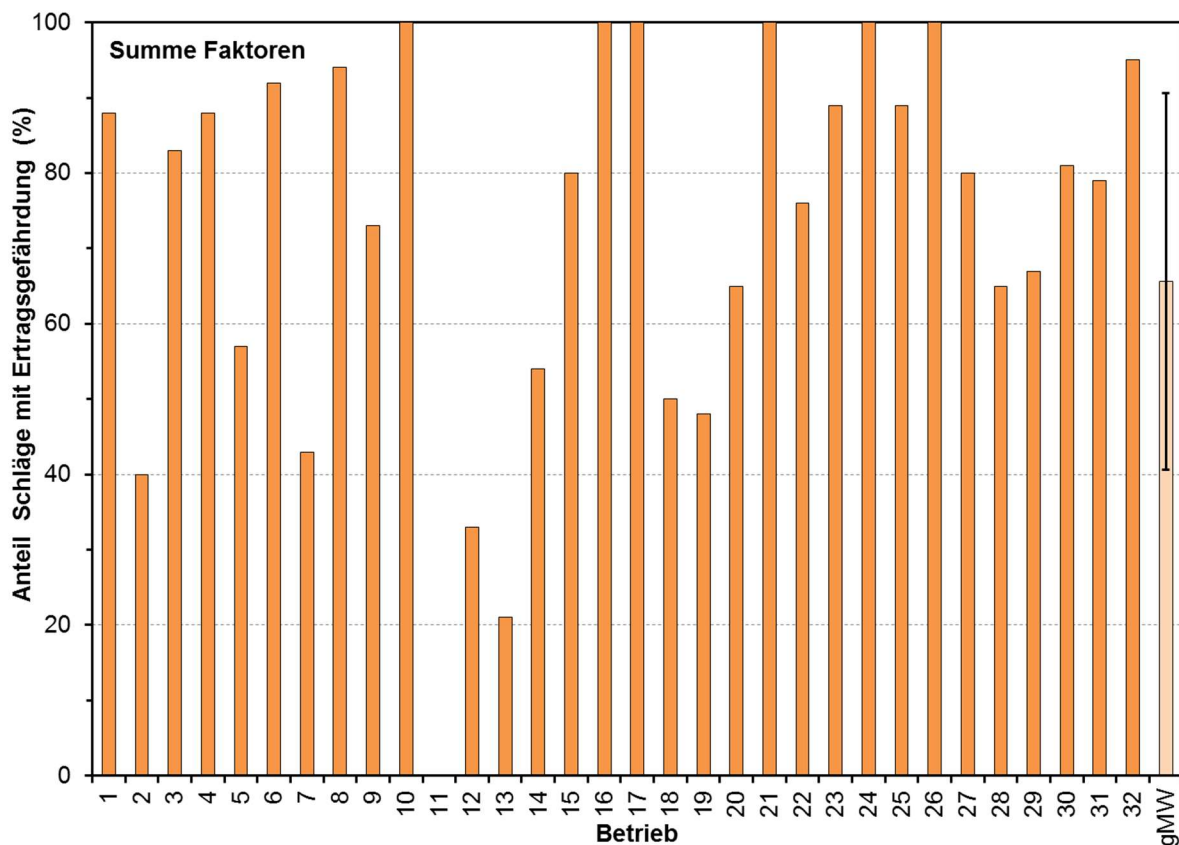


Abbildung 4: Anteil ertragsgefährdeter Ackerschläge je Betrieb und im Mittel der Betriebe (gMW, inklusive Standardabweichung) in der Summe aller Prüfparameter zum Nährstoff- und Humusmanagement

Ausgehend von optimalen Verhältnissen in der Nährstoff- und Humusversorgung (= 100 %) konnte entsprechend der geschilderten tatsächlichen Versorgungslage für jeden Ackerschlag der konkrete

Ertragsausfall berechnet werden. Auf Grund der Wirkung des Minimumgesetzes, wobei sich bei Vorlage mehrerer Faktoren auf einem Schlag eine gewisse additive Verstärkung des Ertragsausfalls ergibt, konnte eine deutliche differenzierte Wirkung auf das Ertragsgeschehen errechnet werden (Abbildung 5). Unter Einbeziehung aller 808 Ackerflächen wurde ein absoluter Ertragsausfall der Fruchtfolgeleistung von 11 % (± 5) ermittelt. Werden nur die betroffenen 504 Ackerschläge bewertet, ergab sich sogar ein Ertragsausfall von 18 % (± 4) mit einer mittleren Schwankungsbreite von mindestens 10 % (± 4) bis maximal 32 % (± 9) Ertragsausfall im Durchschnitt der 32 untersuchten Ökobetriebe.

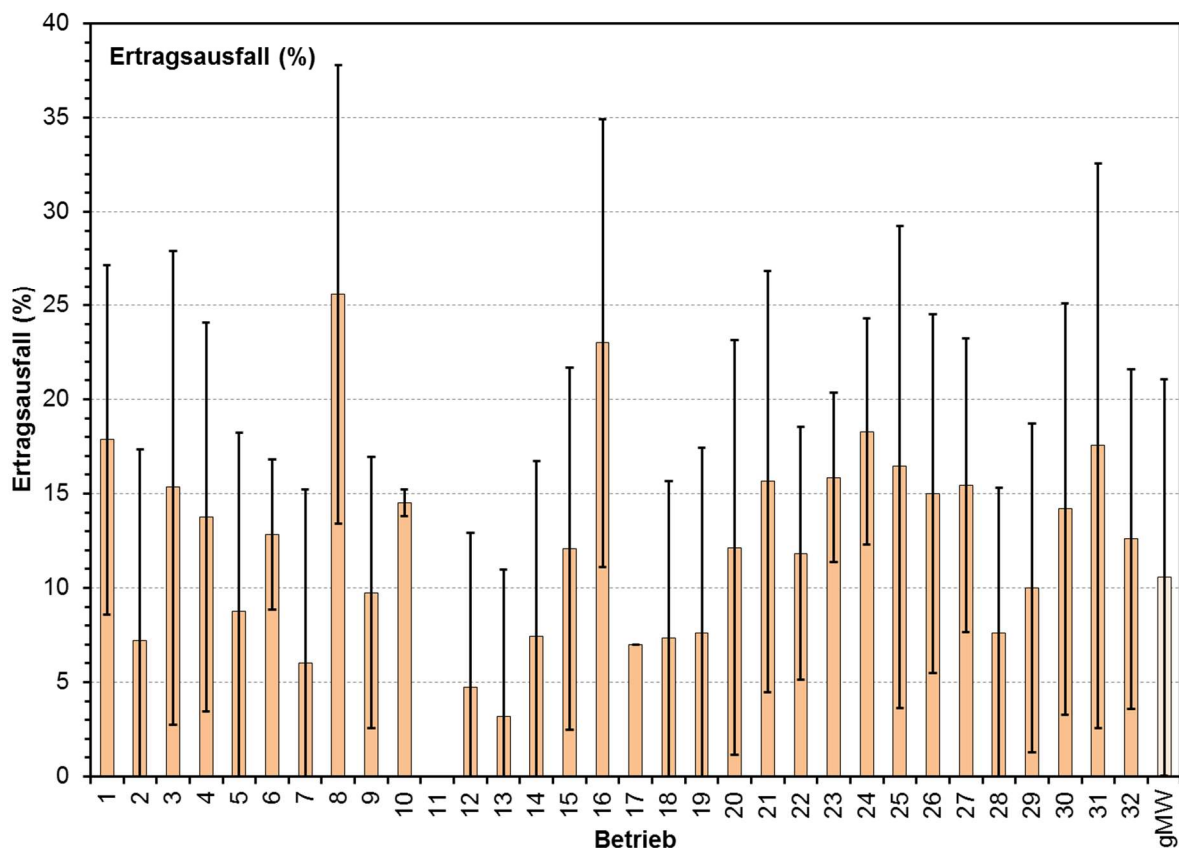


Abbildung 5: Berechneter Ertragsausfall und Schwankungsbreite je Betrieb und im Mittel der Betriebe (gMW) in der Summe aller Prüfparameter zum Nährstoff- und Humusmanagement

Darüber hinaus deuten hohe und sehr hohe N-Bilanzsalden (Note III, > 50 kg/ha) darauf hin, dass der zugeführte Stickstoff innerhalb der Fruchtfolgen nicht immer optimal verwertet wurde. Als Ursache hierfür kann eine Überversorgung an Stickstoff und auch an Humus angesehen werden. Der für die N-Salden veranschlagte Grenzwert wurde im gewogenen Mittel auf 25 % (± 23) der bilanzierten Schläge überschritten (Abbildung 6). Da oft auf Nachbarschlägen auch negative N-Salden ermittelt worden sind, weisen diese Ergebnisse, neben den oben angedeuteten möglichen Fehlern in der

Datenerhebung, auch auf eine ungleiche Verteilung der Nährstoffzufuhr innerhalb der Betriebe hin. Am Beispiel des Stickstoffs waren solche Ungleichgewichte auf immerhin 20 der hier erfassten 32 Betriebe feststellbar. Zudem wurden Schlaganteile von über 40 % mit hohen N-Salden vermehrt in den Betrieben mit Feldgemüseanbau registriert.

Zur Bewertung der potenziellen Umweltgefährdung wurde auch die Versorgung mit Phosphor und mit organischer Substanz herangezogen. Zu hohe P-Gehalte des Bodens (Klasse E) weisen ca. 25 % (± 20), zu hohe P-Salden allerdings nur 3 % der Ackerschläge auf, während 9 % der über 800 Schläge durch zu hohe Humussalden gekennzeichnet sind (ohne Darstellung). Insgesamt geht von den untersuchten Betrieben eine verhältnismäßig geringe Umweltgefährdung aus.

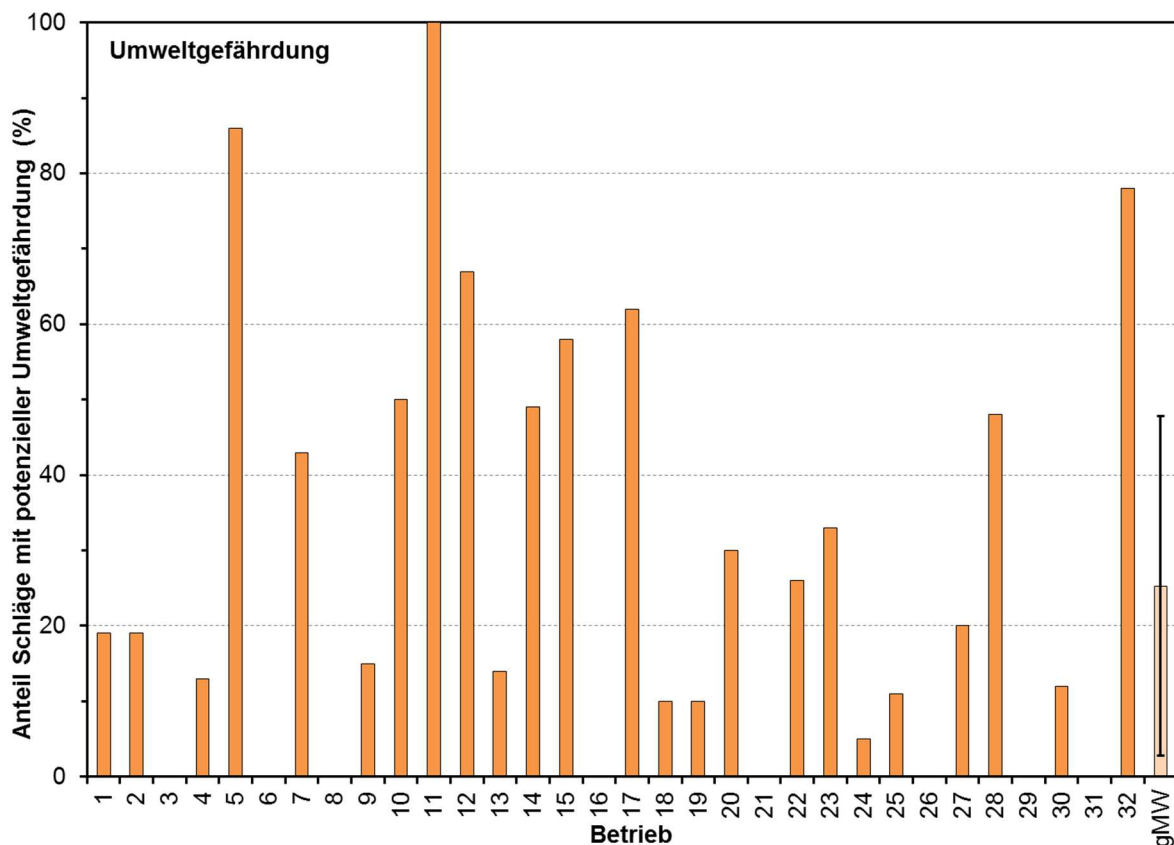


Abbildung 6: Anteil potenziell umweltgefährdender Ackerschläge je Betrieb und im Durchschnitt der Betriebe (gMW, inklusive Standardabweichung) durch zu hohe N-Bilanzsalden

3.3 Szenarienrechnungen

Zwischen den langfristig auftretenden Nährstoffsalden und der Veränderung der pflanzenverfügbaren Bodengehalte bestehen enge Beziehungen. Da hierzu bei den Grundnährstoffen

die größten Erfahrungen vorliegen, wurden auf Grundlage der 32 Betriebe zu den Nährstoffen Phosphor (675 Schläge), Kalium (671 Schläge) und Magnesium (176 Schläge, Bodenarten S – SL) ausgehend von der Ist-Situation der Bewirtschaftung und der Klasseneinteilung der Ackerschläge Szenarienrechnungen für einen Zeitraum von jeweils 10 Jahren durchgeführt.

Bei unveränderter Fortsetzung der beschriebenen Bewirtschaftung werden in Abhängigkeit von der Bodenart durch die festgestellten verhältnismäßig deutlich negativen Nährstoffsalden auch die entsprechenden Nährstoffgehalte des Bodens in Zukunft weiter abnehmen. Hierdurch werden die Einstufungen der unterversorgten Klassen A und B in folgender Weise weiter zunehmen (Abbildung 7, Ist-Zustand, Zukunft 10): P = + 10 %-Anteile; K = + 14 %-Anteile. Im gleichen Umfang werden die P-Gehalte der Klassen D und E abnehmen. Beim Nährstoff Kalium erfolgt sogar eine entsprechende Verringerung der Klassen C bis E.

Durch die Beibehaltung der augenblicklichen Wirtschaftsweise kommt es nach diesen Ergebnissen zu einer weiteren deutlichen Verringerung der chemischen Merkmale der Bodenfruchtbarkeit auf den Ökobetrieben. Darüber hinaus kann auch erwartet werden, dass sowohl der Ertragsabfall weiter zunehmen als auch eine Verschlechterung der Nährstoffeffizienz insbesondere beim Stickstoff eintreten werden (siehe weiter unten).

Die Versorgungslage beim Nährstoff Magnesium ist demgegenüber durch folgende Veränderungen gekennzeichnet. Es besteht bereits eine deutliche Überversorgung durch hohe Anteile der Klassen D und insbesondere der Nährstoffklasse E. Unter Beibehaltung der augenblicklichen Wirtschaftsweise wird die relative Überversorgung der Klasse E noch um weitere 4 – 5 %-Einheiten auf dann insgesamt 69 % zunehmen, während alle anderen Klassen insgesamt um den ausgewiesenen Betrag verringert werden (ohne Darstellung).

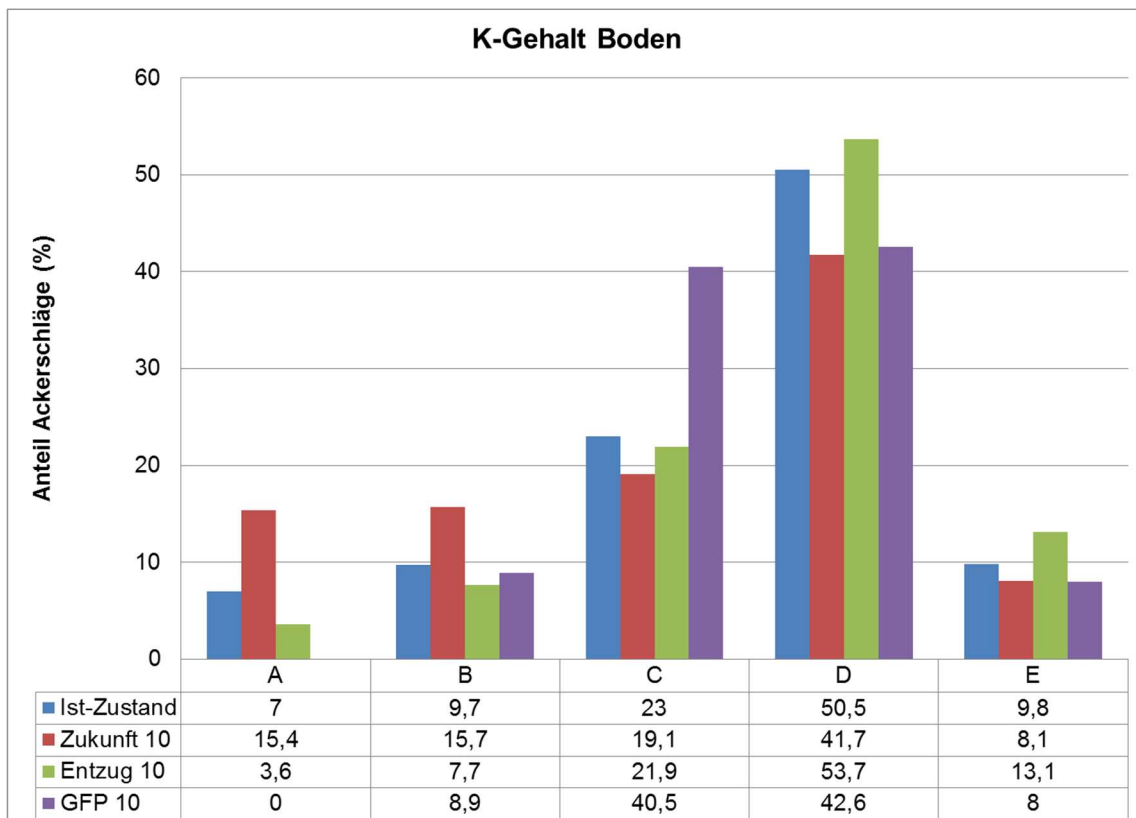
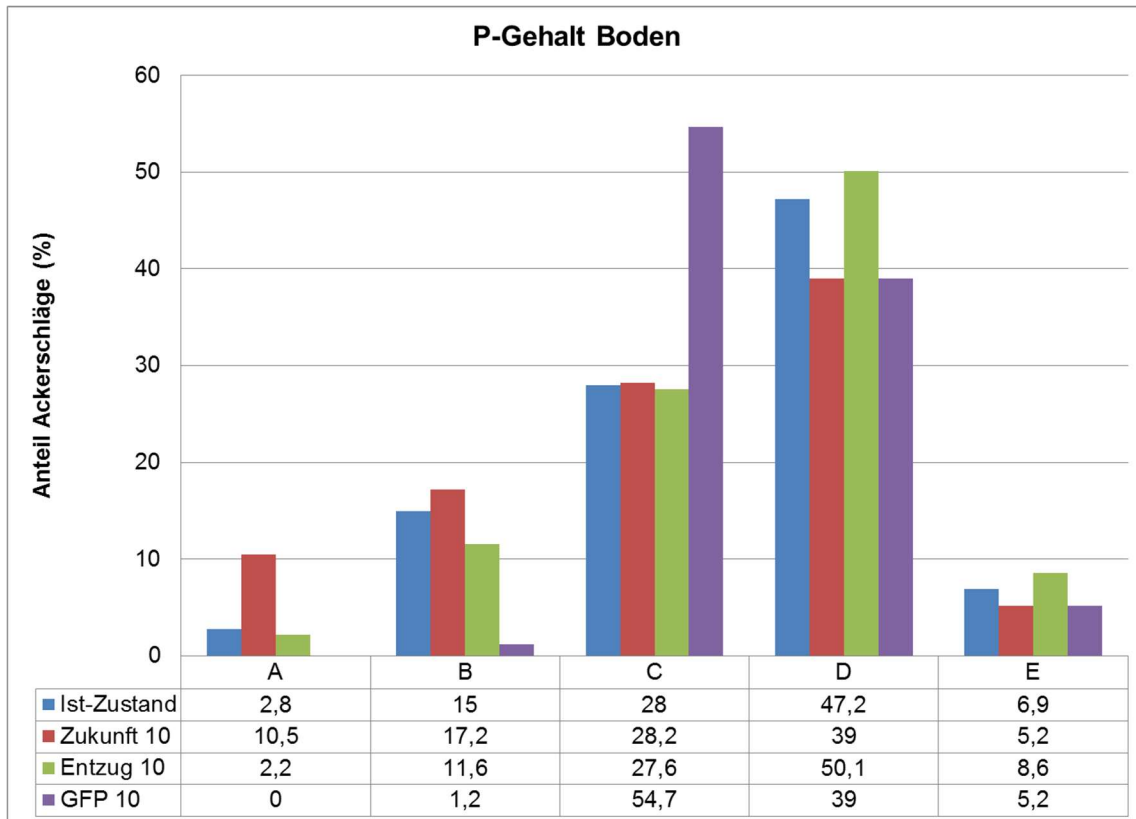


Abbildung 7: Veränderung der Klasseneinteilung der Bodennährstoffe Phosphor (oben) und Kalium (unten) nach 10-jähriger Umsetzung einiger Szenarien der Bewirtschaftung im Vergleich zur Ausgangssituation (Ist-Zustand) der untersuchten Ackerschläge auf 32 Ökobetrieben

Das nächste Szenario zeigt die Veränderungen bei ausschließlicher Anwendung des Prinzips einer Entzugsdüngung (Abbildung 7, Ist-Zustand, Entzug 10). Auf Grund der vorzufindenden Bodenarten werden sich hierdurch die Nährstoffklassen in folgender gerichteter Weise in 10 Jahren verändern: geringfügige Abnahme der Klassen A und B um 4 – 5 %, weitgehende Beibehaltung der Klasse C und Anstieg der Versorgungsklassen D und E bei den Bodennährstoffen Phosphor und Kalium. Auch beim Nährstoff Magnesium erfolgt ein nicht erwünschter weiterer Anstieg der Klasse E.

Nach 10jähriger Anwendung des für den Ökolandbau entwickelten Programms BEFU zur schlaggenauen Grunddüngung erfolgt demgegenüber eine deutliche Abnahme der mangel- bzw. unterversorgten Schlaganteile A und B sowie eine Umschichtung durch einen starken Zuwachs der gewünschten optimal versorgten Klasse C, deren Anteile sich für Phosphor und Kalium annähernd verdoppeln (Abbildung 7, Ist-Zustand, „gute fachliche Praxis“ GFP 10). Da für überversorgte Flächen keine Düngung empfohlen wird, sinken die Anteile der Klassen D und E mit der Zeit langsam ab. Beim Nährstoff Magnesium trifft das auch für die Klasse E zu, während es dann neben der Klasse C zwischenzeitlich auch zu einem Anstieg der Klasse D kommen kann.

Anhand einer hohen Anzahl von 693 – 755 Ackerschlägen wurde darüber hinaus berechnet, welchen Einfluss eine Aufhebung bzw. optimale Korrektur von Defiziten in der Bodenfruchtbarkeit im Bereich pH-Wert und der Grundnährstoffe auf die N-Versorgung im Durchschnitt der 32 Betriebe des Ökolandbaus ausüben würde. Von den insgesamt berechneten 11,0 % Ertragsausfall (vgl. Abbildung 5) beruhen über 8,4 % ($\pm 8,9$) auf Mängel im pH-Wert und bei der Grundnährstoffversorgung. Nach Behebung dieser Düngungsdefizite ist daher mit einem entsprechenden Ertragsanstieg zu rechnen, wovon auch die Leguminosen profitieren, die dann über eine etwas höhere N_2 -Bindung zu einer verbesserten N-Zufuhr beitragen werden.

Durch die angestiegenen Ernteerträge der Fruchtarten kommt es auf den betroffenen Schlägen zu erhöhten Nährstoffentzügen. Es konnte berechnet werden, dass es dann bei der Bilanzierung zu einer Abnahme der resultierenden N-Salden von ausgangs durchschnittlich 32 kg N/ha (siehe Tabelle 8) auf insgesamt 25 kg N/ha (± 38) kommt. Hierdurch wird die im Durchschnitt zu verzeichnende N-Effizienz der Flächen dann von ausgangs 78 % (Tabelle 5) auf 84 % (± 32) (jeweils Klasse C) angehoben (ohne Darstellung). Die Ergebnisse weisen eindeutig darauf hin, dass es bei einer Verbesserung der Anbau- und Düngungspraxis im Bereich Grundnährstoffe und Kalkung auch zu einer Erhöhung der N-Verwertung und über diesen Weg zu einer weiteren Verbesserung der Umweltverträglichkeit ökologischer Anbausysteme kommen kann.

4 Diskussion und Schlussfolgerungen

Die im Rahmen des Vorhabens ermittelte Datenengrundlage aus Acker- und Grünlandflächen verteilt über die verschiedenen naturräumlichen Bedingungen stellt ein repräsentatives Abbild der Betriebe des Ökolandbaus im Freistaat Sachsen dar. Um eine hohe Aussagekraft zu erlangen, standen sowohl Betriebsvergleiche als auch eine genaue schlagweise Erfassung und Auswertung der Ergebnisse im Mittelpunkt der Arbeiten. Die aufgestellten Bewertungskriterien des Nährstoffmanagements und der Fruchtfolgegestaltung sollten folgende Aspekte umfassen (FREYER, 2003; AID, 2016):

- biologische, chemische und physikalische Grundsätze der Bodenfruchtbarkeit
- phytosanitäre Grundsätze der Krankheitsvorsorge und Unkrautregulierung
- Grundsätze der Nachhaltigkeit der Betriebe und der Umweltverträglichkeit.

Diese Gesichtspunkte wurden stellvertretend durch eine Beurteilung des Grades der Gefährdung des Ertrages und der Qualität der angebauten Fruchtarten, Merkmale der Bodenfruchtbarkeit und (im geringeren Umfang) der Umweltgefährdung beziffert.

Gemäß dem von Carl SPRENGEL im Jahr 1828 veröffentlichten Minimumgesetz (SPRENGEL, 1828; MITSCHERLICH, 1909) werden Wachstum und Ertrag der Kulturen durch die im Verhältnis jeweils knappste Ressource eingeschränkt bzw. begrenzt. Diese Ressource wird als Minimumfaktor bezeichnet. Seit dieser Zeit wurden diese Grundsätze sowohl in unzähligen Versuchen bestätigt als auch durch Anwendungsforschung zur praktischen Umsetzung der Pflanzenernährung und Düngung weiter vertieft (BERGMANN, 1990).

Auch im Ökolandbau gab es Bemühungen, z.B. mit Hilfe von Bilanzierungsverfahren Fortschritte zu erzielen. Versuche von SOMMER (2010) durch Untersuchung des Lehr- und Versuchsgutes Gladbacherhof mit dem Modell REPRO (HÜLSBERGEN, 2002) wesentliche Ursachen für den ermittelten negativen Ertragstrend der Ackerschläge aufzufinden, waren jedoch nicht erfolgreich, da offensichtlich entscheidende Einflussfaktoren des Nährstoffmanagements nicht erfasst worden waren. Aus jahrzehntelanger Forschung stehen diese Faktoren aber für den mitteleuropäischen Raum seit langer Zeit fest, wurden in Deutschland u.a. vom VDLUFA in einfach umzusetzende Verfahren und Handlungsanweisungen für die praktische Anwendung etabliert (SPIEGEL et al., 2014) und in jüngerer Zeit auch für eine Anwendung unter ökologischen Gesichtspunkten erweitert.

Ergebnis dieses experimentellen Anpassungsprozesses war die Erkenntnis, dass neben den Methoden der Nährstoff- und Humusbilanzierung auch speziell an die ökologischen Anbaubedingungen angepasste Verfahren und Bewertungssysteme zur pH-Wert- und Nährstoffuntersuchung des Bodens sowie der Düngebedarfsermittlung zur Anwendung kommen müssen (KOLBE & KÖHLER, 2008). Daher wurde u.a. für die hier präsentierten Betriebsuntersuchungen das Programm BEFU eingesetzt, in dem diese wichtigen Aspekte und Methoden zum Nährstoffmanagement berücksichtigt werden.

Im Einzelnen konnte zur Beurteilung der Ertragsgefährdung durch Fehler im Nährstoff- und Humusmanagement der Betriebe meistens an bewerte Verfahren des VDLUFA angeknüpft werden. Ergänzend wurden Schlag-Bilanzen für die Hauptnährstoffe berechnet und in Anlehnung an KOLBE (2015) mit ihren Brutto-Beträgen, d. h. nach der PARCOM-Richtlinie (PARCOM, 1993) unter Berücksichtigung der N- und S-Depositionen über die Atmosphäre sowie der nichtlegumigen N₂-Bindung erfasst. Die angewendeten Bewertungskriterien für pflanzenverfügbare Nährstoffgehalte des Bodens, Nährstoff- und Humussalden sowie die quantitative Erfassung des Ertragsausfalls der Fruchtarten beruhen hierbei im Wesentlichen bereits auf Ergebnissen aus vielen feldexperimentellen Arbeiten, die meistens unter den Bedingungen des ökologischen Landbaus durchgeführt worden sind (siehe Kap. 2).

Die Beschränkung auf drei Bewertungsklassen (gering, optimal, hoch) und die farbliche Unterlegung der Ergebnisse zum Nährstoff- und Humusmanagement erlauben in den angewendeten Formblättern einen schnellen Überblick über den Versorgungszustand eines jeden Schlages, über mögliche Defizite eines oder mehrerer Einflussfaktoren und den daraus abzuleitenden Handlungsbedarf. Im Sinne des Minimumgesetzes ist zu bedenken, dass auf Schlagebene bereits ein einzelner Fehler, bzw. eine einzige „Geringbewertung“ ausreicht, um die Bodenfruchtbarkeit negativ zu beeinflussen und das Wachstum und den Ertrag der angebauten Fruchtarten nachweislich zu reduzieren. Zur Behebung des Mangels bestehen keine Kompensationsmöglichkeiten durch andere Einflussfaktoren. Die hierfür erstellten Verfahren erscheinen geeignet, um die Beratungspraxis zur Nährstoffversorgung im ökologischen Landbau wirksam zu unterstützen.

Bestandsaufnahmen zur Nährstoff- und Humusversorgung des Ökolandbaus wurden in der Vergangenheit immer wieder durchgeführt. Eine Zusammenstellung und übergreifende Bewertung der Ergebnisse wurde zuletzt von KOLBE (2015), COOPER et al. (2018) bzw. MEYER et al. (2020b) veröffentlicht. Sie zeigten an Hand von Betriebs- und Regionsmittelwerten einerseits relativ ähnliche

Veränderungen zwischen den Anbaubereichen Deutschlands auf. Andererseits wurde ermittelt, dass verhältnismäßig niedrige Nährstoffgehalte und pH-Werte der Böden weit verbreitet sind, wodurch zum Teil hohe Anteile der Versorgungsklassen A und teilweise auch von B mit ungenügender Versorgung vorherrschen, während die Stickstoff- und Humusversorgung im Allgemeinen noch als ausreichend bezeichnet worden ist.

Die Ergebnisse der vorliegenden, deutlich erweiterten Untersuchungen zur Charakterisierung auch von verschiedenen Betriebstypen ordnen sich zunächst in diesen allgemeinen Trend ein. Gegenüber den klassischen Futterbaubetrieben waren die Betriebe mit Feldgemüseanbau insbesondere bei den Grundnährstoffen durch 12 % höhere Anteile der Klassen C – D und entsprechender Abnahme der Klassen A und B durch eine insgesamt bessere Versorgung gekennzeichnet, während die Versorgung der Marktfruchtbetriebe genau entgegengesetzt durch einen Anstieg der Anteile der Nährstoffklassen A – C bzw. durch z.T. deutlich niedrigere Nährstoffgehalte hervorgetreten sind.

Die erstmals vorliegenden vertieften Auswertungen auf Schlägebene ergaben jedoch, dass von den über 800 erfassten Ackerschlägen nur noch 34 % der Flächen alle zur Beurteilung des Nährstoff- und Humusmanagements herangezogenen zehn Kriterien mindestens optimal erfüllt haben. Gegenüber den bisherigen Untersuchungen ist dieser Anteil sogar um weitere 11 % abgefallen, so dass jetzt auf insgesamt 66 % der Schläge eine Ertragsgefährdung durch Mängel in mindestens einem Nährstoffkriterium und für einen steigenden Anteil sogar Defizite für drei oder mehr Kriterien bestehen.

Als wichtige Ursache sind vor allem zu niedrige pH-Werte durch eine zu geringe Kalkversorgung aufgetreten, die mit 37 % der Schläge mit Abstand überwogen hat. Folgende weitere Kriterien waren betroffen: Humus- bzw. N-Salden mit Mängeln auf jeweils 17 % bzw. 18 % der Flächen, sowie die P- und K-Gehalte des Bodens mit 15 % bzw. 13 % der Schläge, wobei zusätzlich die z.T. stark negativen Salden dieser Nährstoffe zu bedenken sind.

In einem weiteren Schritt gelang es über die Auswertung einer Reihe von Nährstoffsteigerungsversuchen einen quantitativen Bewertungsschlüssel für die Ertragsgefährdung zu erarbeiten und anzuwenden. Folgende Rangfolge der durchschnittlichen Ertragsabnahmen der Fruchtarten konnte ermittelt werden, wenn ein sehr starker Mangel vorliegt (z.B. Klasse A, siehe Tabelle 4): 34 %: pH-Wert; 30 %: Humus- und N-Saldo; 15 %: K-; 12 %: Mg-; 10 %: P-Gehalt Boden. Eingegangen sind hierzu Dauerfeldversuche mit konventionellen Anbaubedingungen (KLASINK, 1977;

KERSCHBERGER et al., 1986; ROGASIK et al., 2005; KERSCHBERGER & PREUSKER, 2012; HOLLAND et al., 2019; WEBER, 2020), viele Arbeiten stammen auch bereits aus ökologischen Versuchsanstellungen (KOLBE, 2015, 2019; MEYER et al., 2019, 2020a).

Durch die umfangreiche Anwendung dieses Bewertungsschlüssels konnte ein konkreter Ertragsausfall im Durchschnitt der gesamten Untersuchungsflächen von 11 % berechnet werden. Unter Einbeziehung nur von betroffenen Ackerschlägen wurde sogar ein Ertragsausfall von mittlerweile 18 % ermittelt. Die immer wieder geäußerten Befürchtungen von Ertragsstagnation und unzureichender Entwicklung der Ernteerträge im Ökolandbau (NEUHOFF, 2015; MAYER & MÄDER, 2016) können durch diese Ergebnisse erstmals quantitativ belegt und darüber hinaus auch auf verschiedene Ursachen zurückgeführt werden.

Unter Einschluss von Flächenumfang und Wirkungsstärke kommt den Mängeln im pH-Wert mit Abstand die größte ertragsreduzierende Bedeutung zu. Es folgt der Flächenumfang an unzureichender Versorgung mit Stickstoff bzw. mit organischer Substanz, dessen Umfang im Vergleich zu den früheren Untersuchungen zugenommen hat. In dritter Stelle weisen Phosphor- und Kalium-Mangel ein erhebliches Ursachenpotenzial zur Ertragsbegrenzung auf, während Schwefel- und Magnesium-Mangel in Sachsen bisher kaum eine Verbreitung aufweisen.

Die erlangten Ergebnisse auf Schlagebene haben aufgezeigt, dass Mängel im Nährstoffmanagement, die im Wesentlichen auf das Minimumgesetz zurückgeführt werden können, weiter verbreitet sind als bisher angenommen. Trotz der vorliegenden umfangreichen Ergebnisse und dem daraus erwachsenden Handlungsbedarf in der Praxis finden diese Zusammenhänge und deren Auswirkungen auf Bodenfruchtbarkeit und Ertragsleistung der Fruchtarten in der aktuellen wissenschaftlichen Fachliteratur des Ökolandbaus bisher noch keine entsprechende Beachtung (MÖLLER & FRIEDEL, 2016; JÖRGENSEN, 2018; JÖRGENSEN et al., 2019).

Zur Aufdeckung von Lösungsmöglichkeiten wurde mit Hilfe verschiedener Szenarien zunächst analysiert, welche Entwicklungen in den 32 untersuchten Ökobetrieben zu beobachten wären, wenn die festgestellten Fruchtfolge- und Bewirtschaftungsverfahren ohne Änderung in Zukunft weitergeführt werden. Unter Nutzung der aus Dauerversuchen ermittelten statistisch engen Relationen zwischen den Nährstoffsalden und der Veränderung der Gehalte an löslichen Bodennährstoffen (KOLBE & KÖHLER, 2008) wurde am Beispiel der Nährstoffe P, K und Mg berechnet, dass bei Beibehaltung der Bewirtschaftung in einem Zeithorizont von 10 Jahren die Anteile mit

Unterversorgung entsprechend der Bodenklassen A und B um weitere 10 – 14 % zunehmen und die Klassen D – E entsprechend abnehmen. Beim Magnesium würde die Fortsetzung durch die weit verbreitete Anwendung von relativ teuren Mg-haltigen Kalken die ermittelte Überversorgung durch die Klassen D und E noch weiter verstärken.

Auch in anderen Betriebsuntersuchungen und in speziellen Dauerversuchen wurden unter den praktischen Anbaubedingungen des ökologischen Landbaus ebenfalls im Zeitverlauf abnehmende Bodengehalte der wichtigsten Nährstoffe und der pH-Werte immer wieder dokumentiert (GRUBER, 2009; LEISEN, 2013; KAPE et al., 2015; KOLBE, 2015; MEYER et al., 2020a). Aus den Ergebnissen kann somit die Schlussfolgerung abgeleitet werden, dass bei Fortführung der üblichen Bewirtschaftungsintensitäten zukünftig ein weiterer Abfall wichtiger Nährstoffe des Bodens zu prognostizieren ist, wovon auch andere hier nicht direkt untersuchte Komponenten betroffen sein werden (pH-Wert, Humus). Aus diesen Gründen ist auch mit einer weiteren Verschlechterung der Ertragssituation im Ökolandbau zu rechnen.

Als Ursache kann im Wesentlichen eine zu geringe Zufuhr dieser Nährstoffe über die Düngung angesehen werden, wodurch z.B. zu niedrige P-Salden von unter -5 kg/ha auf schweren und unter +2 kg auf leichten Böden bzw. K-Salden von je nach Bodenart bis unter -40 kg/ha und unter +15 kg/ha im Durchschnitt der Fruchtfolgen berechnet werden, die dann unweigerlich zu den ermittelten negativen Trends in den Bodengehalten der pflanzenverfügbaren Nährstoffe beitragen. Aus sorgfältig ermittelten Nährstoffsalden kann daher die zukünftige Entwicklung der Bodengehalte dieser Nährstoffe prognostiziert werden. Die in Tabelle 3 aufgeführten optimalen Saldenbereiche (Klasse II - mittel) sind experimentell gut belegt und sollten auf Dauer nicht unterschritten werden, damit keine weitere Abnahme der Nährstoffversorgung eintritt.

Zur Behebung von unterversorgten Acker- und Grünlandschlägen können verschiedene Verfahren der Düngung angewendet werden. So besteht eine aus dem konventionellen Landbau entwickelte Methode in der Düngung nach Nährstoffentzug (HEGE & OFFENBERGER, 2001), die auch teilweise im Ökolandbau angewendet wird. In einem weiteren Szenarium wurde diese Vorgehensweise für die untersuchten Ackerschläge der Ökobetriebe für 10 Jahre durchgerechnet und einer Prüfung unterzogen. Wie die Ergebnisse zeigen, würden hierdurch die unterversorgten Flächen (Klassen A, teilweise B) zwar etwas verringert werden, die Überversorgung (Klassen D – E) würde allerdings ebenfalls weiter zunehmen. Daher kann die vereinfachte Anwendung der Entzugsdüngung nicht als eine zukunftsweisende Düngungsstrategie im Ökolandbau angesehen werden.

Dagegen führt der Einsatz von speziell zur Grunddüngung im Ökolandbau entwickelter Programme (KOLBE et al., 1999; KOLBE & KÖHLER, 2008) nach 10 Jahren bereits zu einer deutlichen Verbesserung und ausgewogeneren Versorgung mit den untersuchten Nährstoffen Phosphor, Kalium und Magnesium. In diesem Szenarium kommt es zu einer raschen Reduzierung der unterversorgten Klassenanteile A und B. Da bei Vorlage einer Überversorgung keine Düngung berechnet wird, nehmen auch die Klassen D und E je nach Nährstoff mit der Zeit deutlich ab, während die empfohlene Öko-Versorgungsklasse C deutlich zunimmt.

Auf Grund der teilweise festzustellenden erheblichen Unterversorgung war auch zu erkennen, dass der Sanierungsprozess auf vielen Flächen unter Umständen länger als die veranschlagten 10 Jahre dauern wird. Das würde besonders für die Fälle zutreffen, in denen eine Änderung der Düngepraxis weiter nicht für erforderlich gehalten wird. Außerdem können Rechtsbestimmungen z.B. entsprechend der jeweils gültigen Düngeverordnung, Grenzen der Nährstoffzufuhr setzen, die eine Sanierung von Mangelzuständen in der Bodenfruchtbarkeit erschweren oder in extremen Fällen sogar verhindern, wie dies zwischenzeitlich für den Nährstoff Phosphor durchaus gegeben war (ANON., 2007).

Damit die aufgezeigten Probleme in der Bodenfruchtbarkeit und Ertragsfähigkeit nicht noch größer werden und die Nährstoffkreisläufe sich noch weiter öffnen, ist eine Intensivierung des Nährstoffmanagements auf jeder einzelnen Acker- und Grünlandfläche durch periodische Maßnahmen der Bodenuntersuchung, Bilanzierung und Düngung erforderlich. Die dafür notwendigen Handlungsanweisungen, Methoden und Programme zur Umsetzung in der landwirtschaftlichen Praxis stehen für den Ökolandbau zur Verfügung (KOLBE & SCHUSTER, 2011; KOLBE et al., 2015).

Darüber hinaus ist auf einigen Betrieben aufgefallen, dass eine deutlich ungleiche Versorgung der einzelnen Flächen auch auf ein und demselben Betrieb, z.B. mit Stickstoff und Humus aber auch mit dem Anbau von Futterleguminosen vorliegen kann. So werden hofnahe Flächen öfter mit Düngemitteln versorgt als ferner gelegene Grundstücke, wodurch es zur Bildung der bekannten „Thüneschen Kreise“ kommen kann. Ein optimales Verteilungsmanagement kann somit noch deutlich zu einer verbesserten Wertschöpfung beitragen (LUX & SCHMIDTKE, 2014).

Hierbei wären auch Cut & Carry-Systeme gut geeignet, um die relative Überversorgung z.B. mit gemulchten Kleegrasaufwüchsen zwischen den Flächen etwas auszugleichen (STUMM & KÖPKE, 2015).

Hierdurch kann es zudem auf den abgeernteten Flächen über den nächsten Aufwuchs zu höheren N₂-Fixierungsraten kommt. Anstelle eines zu häufigen Leguminosenanbaus sollte eher auf verbesserte Wachstumsbedingungen der Bestände geachtet werden, wozu ein optimales Nährstoffmanagement ebenfalls beitragen kann.

Insbesondere in Betrieben mit Feldgemüseanbau und auch mit Obstbau sind Probleme einer beginnenden Überversorgung u.a. mit N und P zu erkennen. Hierzu müssen weitere Untersuchungen angestellt werden, damit fachgerechte Lösungsmöglichkeiten, wie z.B. die gezielte Auswahl organischer und mineralischer Düngemittel, experimentell erprobt und für die Praxis im Freiland- und Gewächshausanbau rechtzeitig einsetzbar werden (MÖLLER & SCHULTHEIß, 2014; ZIKELI et al., 2016), damit negative Umweltwirkungen z.B. im Wasserschutz erst gar nicht entstehen können. Eine intensive experimentelle Tätigkeit in Versuchen und in den Betrieben ist auch in Zukunft unerlässlich, um auch die offensichtlich bestehenden Defizite in der Forschung und Lehre zum ökologischen Landbau auf diesen Gebieten zu überwinden und die praktischen Handlungsempfehlungen auf dem jeweils neuesten Stand zu halten.

Zusammenfassung

Schlaggenaue Analyse von 32 Betrieben des ökologischen Landbaus im Freistaat Sachsen: Nährstoff- und Humusmanagement

In dieser Untersuchung wurden Daten zur Nährstoff- und Humusversorgung sowie zur Fruchtfolgegestaltung von 32 ökologisch wirtschaftenden Landwirtschaftsbetrieben im Freistaat Sachsen über einen Zeitraum von 6 Jahren gesammelt und ausgewertet. Insgesamt stand Datenmaterial von 810 ökologisch bewirtschafteten Ackerschlägen mit zusammen mehr als 6.700 ha LN zur Verfügung. Die Beurteilung des Nährstoff- und Humusmanagement der Betriebe erfolgte in der Regel anhand von an die spezifischen Bedingungen des Ökolandbaus angepassten Verfahren des VDLUFA für den pH-Wert und die pflanzenverfügbaren Bodengehalte der Hauptnährstoffe mit einer 3-stufigen Bewertungsskala (gering, optimal, hoch). Ergänzend wurden Schlag-Bilanzen für die Hauptnährstoffe und für den Humus und der Düngebedarf mit dem Programm BEFU, Teil Ökolandbau, berechnet. Entsprechend dem Minimumgesetz wurde bei Vorlage einer unzureichenden Versorgung der zu erwartende Ertragsausfall der Fruchtarten aus Dauerversuchen abgeleitet und für die Ackerschläge quantitativ berechnet. Die Ergebnisse der Untersuchung wurden zunächst im Betriebsvergleich (Gesamtheit, Futterbau, Feldgemüse, Marktfrucht) dargestellt und analysiert. Um eine hohe Aussagekraft zum Nährstoffmanagement zu erlangen, stand weiterhin eine

schlagweise Auswertung der Ergebnisse im Mittelpunkt der Arbeiten. Hierfür wurde eine spezielle tabellarische Darstellungsform entwickelt, womit ein schneller Überblick über den Versorgungszustand der einzelnen Schläge der Betriebe gewonnen werden konnte, deren Einsatz auch zukünftig in der Beratungspraxis zur Abschätzung des Handlungsbedarfs Vorteile bringen kann. Insgesamt wurde ermittelt, dass in der Summenwirkung auf 66 % der untersuchten Ackerschläge ertragsbegrenzende Mängel im Nährstoffmanagement bestehen. Nur auf einem Betrieb wurden keine unterversorgten Flächen gefunden. Von den 10 untersuchten Kriterien lagen im Durchschnitt annähernd 2 Nährstofffaktoren auf jeder Fläche im Mangelbereich. Im Einzelnen werden folgende Mängel-Häufigkeiten ermittelt: pH-Wert 37 %, N-Salden 18 %, Humussalden 17 %, P-Gehalte Boden 15 %, K-Gehalte Boden 13 %, P-Salden 13 %, K-Salden 9 %, Mg- und S-Salden <2 % der Ackerschläge. Im Durchschnitt der Flächen wurde auf Grund dieser Ergebnisse im Vergleich zu optimalen Nährstoffbedingungen ein definitiver Ertragsausfall von 11 % berechnet. Auf den betroffenen Schlägen lag der Ertragsausfall sogar bei 18 % (absolute Schwankung 10 – 32 %). Demgegenüber waren bisher nur 25 % der Ackerschläge von zu hohen Nährstoffgehalten (P) oder -salden (N, P, Humus) betroffen, die auf eine potenzielle Umweltgefährdung hinweisen könnten, vor allem auf Betrieben mit Feldgemüseanbau.

Durch Szenarienrechnungen konnte ermittelt werden, dass die Gehalte des Bodens an P und K und die entsprechende Klassifizierung in einem Zeithorizont von 10 Jahren um 10 – 14 % weiter abnehmen und dadurch die Nährstoffkreisläufe sich noch weiter öffnen werden, wenn an der bestehenden Bewirtschaftung mit deutlich zu niedrigen Salden an Grundnährstoffen festgehalten wird. Als Lösungsansatz erscheint die großflächige Anwendung einer Entzugsdüngung für den Ökolandbau wenig geeignet zu sein. Demgegenüber haben weitere Szenarien aufgezeigt, dass durch periodischen und schlagweisen Einsatz von Methoden der Bodenuntersuchung, Düngebedarfsermittlung und Nährstoffbilanzierung, z.B. mit Hilfe speziell für den Ökolandbau erstellten PC-Modellen, eine rasche Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit und Nachhaltigkeit in den Betrieben erreicht werden kann. Das hierfür notwendige Instrumentarium steht zur Umsetzung in der landwirtschaftlichen Praxis des Ökolandbaus seit längerer Zeit zur Verfügung. Entsprechende Methoden des Nährstoffmanagements sollten zukünftig auch in Lehre, Schulung und Beratung einen höheren Stellenwert erhalten.

Summary

Field plot-specific analysis of 32 organic farms in Saxony: nutrient and organic matter management

In this survey, data regarding nutrient and humus supply as well as crop rotation arrangement for 32 organic farms in the German federal state of Saxony were collected and evaluated over a six year period. In total, a data set from 810 organically cultivated arable field plots of over 6.700 hectares of farmland was available. The farms' nutrient and humus management was generally assessed on the basis of the VDLUFA methods, specifically adapted for organic farming, for pH value and plant available soil contents of main nutrients, using a 3-step rating scale (low, optimal, high). In addition, the BEFU programme's organic farming section calculated field plot balances for the main nutrients as well as organic matter supply and fertilization requirement. According to the law of the minimum, the expected crop yield loss was derived from long-term trials and was quantitatively calculated for arable plots when an insufficient supply was determined. The results of the study were initially presented and analyzed as farm comparison (entirety, fodder, field vegetables, cash crop farming). Furthermore, to improve informative value concerning nutrient management, works focused on a field plot-based evaluation of findings. For this purpose, a specific tabular form of presentation was developed, which allows a quick overview of the farm single plot supply status, and shall be of future use for consultation in connection with estimates regarding needs for improvement.

Overall, in the sum effect, yield-limiting deficits in terms of nutrient management were determined on 66 % of the arable plots examined. On one farm only, no undersupplied arable plots were found. An average of nearly 2 nutrient factors out of a total of 10 criteria examined was located in the deficiency range on every field plot. The following individual deficit frequencies were determined: pH value 37 %, N balance 18 %, humus balance 17 %, P content soil 15 %, K content soil 13 %, P balance 13 %, K balance 9 %, Mg and S balances <2 % of the field plots. Compared to optimal nutrient requirements, these results indicate a definitive yield loss of 11 % calculated as an average of all plots. On the affected plots, yield decrease had reached 18 % (absolute variation 10 – 32 %). In contrast, only 25 % of the arable plots were affected by excessive nutrient contents (P) or balances (N, P, humus), which could suggest a potential environmental risk especially on farms which cultivate field vegetables.

Based on basic nutrient balances, which were clearly too low, scenario calculations were able to determine that the soil concentrations of P and K and the corresponding classification will continue to decrease by 10 – 14 % in a 10-year timeframe, consequently expanding nutrient cycles even further. The large-scale application of a tailored fertilizer replacement does not seem particularly

suitable for organic farming conditions. In contrast, further scenarios have shown that using methods of periodic and plot-wise soil analysis, fertilizer recommendation and nutrient balancing, aided for instance by specially established PC models for organic farming, soil fertility and farm sustainability can rapidly be achieved. The required instruments have been available for use in organic farming for quite some time now. Corresponding methods of nutrient management in education, training and consulting should gain greater emphasis in the future.

Literatur

1. AID (2016): Gute fachliche Praxis – Bodenfruchtbarkeit. Aid Infodienst Ernährung, Landwirtschaft, Verbraucherschutz, Bonn.
2. ALBERT, A., FÖRSTER, F., ERNST, H., KOLBE, H., DITTRICH, B., LABER, H., HANDSCHACK, M., KRIEGHOFF, M., HEIDENREICH, T., RIEHL, G., HEINRICH, S., ZORN, W. (2007): Umsetzung der Düngeverordnung. Hinweise und Richtwerte für die Praxis. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Dresden, 1-164.
3. ANONYM (2007): Verordnung über die Anwendung von Düngestoffen, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsstoffen nach Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung – DüV). Bundesgesetzblatt 2007 Teil I Nr. 7.
4. BENGSSON, H., ÖBORN, I., JONSSON, S., NILSSON, I., ANDERSSON, A. (2003): Field balances of some mineral nutrients and trace elements in organic and conventional dairy farming - a case study at Öjebyn, Sweden. *Europ. J. Agron.* 20, 101-116.
5. BERGMANN, W. (1990): Die Ermittlung der Nährstoff- und Düngerbedürftigkeit von Böden und Pflanzen aus historischer Sicht. Institut f. Pflanzenernährung u. Ökotoxikologie, Jena.
6. Zahlen zum Ökolandbau in Deutschland
<https://www.oekolandbau.de/landwirtschaft/biomarkt/oekoflaeche-und-oekobetriebe-in-deutschland/> (abgerufen am 10.08.2021, Quelle: BZL).
7. COOPER, J., REED, E.Y., HÖRTENHUBER, S., LINDENTHAL, T., LOES, A.-K., MÄDER, P., MAGID, J., OBERSON, A., KOLBE, H., MÖLLER, K. (2018): Phosphorus availability on many organically managed farms in Europe. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 110, 227-239.
8. EGNER, H., RIEHM, H. (1955): Die Doppellactatmethode. In: THUN, R. et al.: Methodenbuch I. Neumann Verlag, Berlin.
9. FREYER, B. (2003): Fruchtfolgen. Verlag E. Ulmer, Stuttgart.
10. GRUBER, H. (2009): Entwicklung der Grundnährstoffgehalte in einem schwach lehmigen Sandboden Nordostdeutschlands nach langjähriger ökologischer Bewirtschaftung. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften* 21, 123-124.
11. HARZER, N. (2006): Humus- und Nährstoffhaushalt ökologischer Betriebe und Systemversuche im Land Sachsen-Anhalt. Diplomarbeit, Martin-Luther-Universität, Halle.
12. HEGE, U., OFFENBERGER, K. (2001): Auswirkung einer Phosphat- und Kalidüngung in Höhe der Abfuhr auf den Ertrag und die Entwicklung der Bodengehalte. *VDLUFA-Schriftenreihe* 57, Teil 2, Kongressband 2001, 706-718.
13. HEROLD, L., HÖPFNER, E. (2010): N_{min} -Monitoring auf konventionell und ökologisch bewirtschafteten Flächen. *Schriftenreihe Landwirtschaft und Landschaftspflege in Thüringen*, H. 8, 44-50.
14. HOFFMANN, W.E., RIEHM, H., SCHROEDER, D. (1959): Magnesiumuntersuchungen an deutschen Böden. *Landw. Forsch.*, Sh. 13, 9-16.

15. HOLLAND, J.E., WHITE, P.J., GLENDINING, M.J., GOULDING, K.W.T., MCGRATH, S.P. (2019): Yield responses of arable crops to liming—An evaluation of relationships between yields and soil pH from a long-term liming experiment. *Europ. J. of Agron.* 105, 176-188.
16. HÜLSBERGEN, K.-J. (2003): Entwicklung und Anwendung eines Bilanzierungsmodells zur Bewertung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Systeme. Shaker Verlag, Aachen.
17. JÖRGENSEN, R.G. (2018): Nährstoffmanagement und Humuswirtschaft. In: WACHENDORF, M., BÜRKERT, A., GRAß, R.: *Ökologische Landwirtschaft*. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 52-68.
18. JÖRGENSEN, R.G., FRÜND, H.-CHR., HINCK, S., PALME, S., RIEK, W., SIEWERT, CHR. (2018): Bodenfruchtbarkeit verstehen, erhalten und verbessern. Erling Verlag, Clenze.
19. KAPE, H.-E., PÖPLAU, R., NAWOTKE, C. (2015): Entwicklung und Niveau des Bodenreaktionszustandes und der Grundnährstoffversorgung auf dem Ackerland von ökologisch wirtschaftenden Betrieben in Mecklenburg-Vorpommern. *Mitteilungen der Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern*, H. 56, 45-52.
20. KERSCHBERGER, M., MARKS, G. (2007): Einstellung und Erhaltung eines standorttypischen optimalen pH-Wertes im Boden – Grundvoraussetzung für eine effektive und umweltverträgliche Pflanzenproduktion. *Berichte über Landwirtschaft* 85, 56-77.
21. KERSCHBERGER, M., PREUSKER, T. (2012): Sauer macht nicht lustig – Saure Böden liefern nicht die Erträge, die sie bringen könnten. *Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt (BLW)*, Nr. 28, 30-31.
22. KERSCHBERGER, M., RICHTER, D., PFLEGER, D. (1986): Ermittlung von Versorgungsstufen des pflanzenverfügbaren Magnesiums in Ackerböden der DDR. *Arch. Acker- Pflanzenb. Bodenkd.* 30, 243-250.
23. KLASINK, A. (1977): Ergebnisse aus Feldversuchen und Erhebungsuntersuchungen zur Ermittlung des Magnesiumdüngerbedarfs. In: VETTER, H.: *Wieviel düngen?* DLG-Verlag, Frankfurt/Main, 165-177.
24. KOLBE, H. (2009): Vergleich von Methoden zur Berechnung der biologischen N₂-Fixierung von Leguminosen zum Einsatz in der landwirtschaftlichen Praxis. *Pflanzenbauwissenschaften* 13, 23-26.
25. KOLBE, H. (2010): Phosphor und Kalium im ökologischen Landbau – aktuelle Probleme, Herausforderungen, Düngungsstrategien. In: *Phosphor- und Kaliumdüngung – brauchen wir neue Düngekonzepte?* Tagung des Verbandes der Landwirtschaftskammern (VLK) und des Bundesarbeitskreises Düngung (BAD) am 20. und 21. April 2010 in Würzburg. *Bundesarbeitskreis Düngung (BAD)*, Frankfurt/Main, 117-138.
26. KOLBE, H. (2015): Wie ist es um die Bodenfruchtbarkeit im Ökolandbau bestellt: Nährstoffversorgung und Humusstatus. In: *Bodenfruchtbarkeit – Grundlage erfolgreicher Landwirtschaft*. BAD-Tagungsband 2015, *Bundesarbeitskreis Düngung (BAD)*, Frankfurt/Main, 89-123.
27. KOLBE, H. (2016): Nährstoff- und Humusversorgung im Ökolandbau – Über die unterschiedlichen Entwicklungstendenzen bei der Bodenfruchtbarkeit. *Der kritische Agrarbericht 2016*, 168-173.
28. KOLBE; H. (2019): Einfluss mineralischer P- und K-Düngung auf die Ertragsreaktion der Fruchtarten in Abhängigkeit von der Nährstoffversorgung des Bodens unter den Anbaubedingungen des ökologischen Landbaus in Deutschland. *J. Kulturpflanzen* 71, 161-181.
29. KOLBE, H., KÖHLER, K. (2008): BEFU – Teil Ökologischer Landbau. 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*, H. 36, 1-252.

30. KOLBE, H., SCHUSTER, M. (2011): Bodenfruchtbarkeit im Ökobetrieb – Untersuchungsmethoden. Broschüre, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.
31. KOLBE, H., SCHMIDT, E. & KLAGES, S. (2015): Bodenfruchtbarkeit und Düngung. In: KTBL: Faustzahlen für den Ökologischen Landbau. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL), Darmstadt, 103-151.
32. KOLBE, H., MEYER, D., SCHMIDTKE, K. (2021): Schlaggenaue Analyse von 32 Betrieben des ökologischen Landbaus im Freistaat Sachsen: Fruchtfolgegestaltung. Berichte über Landwirtschaft, Band 99, Heft 1, Mai 2021.
33. KOLBE, H., RIKABI, F., ALBERT, E., ERNST, H., FÖRSTER, F. (1999): Ansätze zur PK-Düngungsberatung im ökologischen Landbau. VDLUFA-Schriftenreihe 52, Kongressband 1999, 223-226.
34. KOLBE, H., MODEL, A., SCHENKE, A., RIKABI, F., SLESACZEK, J. (in Vorbereitung): Zusammenführung der Ergebnisse von komplexen Dauersystemversuchen zur Untersuchung ökologischer Anbau- und Düngungsverfahren in zwei Anbausystemen (Marktfrucht und Futterbau) auf Ertrag, Produktqualität, Bodenfruchtbarkeit und Umweltwirkungen auf einem Sand- und Lößboden in Sachsen. In: Möglichkeiten und Grenzen der Intensivierung im Ökolandbau. Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
35. LEISEN, E. (2013): Veränderung von Mineralstoffgehalten in Böden und Pflanzen von Öko-Milchviehbetrieben in den letzten 15 Jahren. Beiträge zur 12. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Bonn. Verlag Dr. Köster, Berlin, 150-153.
36. LINDENTHAL, T. (2000): Phosphorvorräte in Böden, betriebliche Phosphorbilanzen, und Phosphorversorgung im Biologischen Landbau – Ausgangspunkte für die Bewertung einer großflächigen Umstellung ausgewählter Bundesländer Österreichs auf Biologischen Landbau hinsichtlich des P-Haushaltes. Dissertation, Universität für Bodenkultur, Wien, 1-290.
37. LUX, G., SCHMIDTKE, K. (2014): Steigerung der Wertschöpfung ökologisch angebaute Marktfrüchte durch Optimierung des Managements der Bodenfruchtbarkeit. Abschlussbericht des BÖLN-Vorhabens 2811OE083, Teilprojekt HTW, Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW), Dresden.
38. MAYER, J., MÄDER, P. (2016): Langzeitversuche – Eine Analyse der Ertragsentwicklung. In: FREYER, B.: Ökologischer Landbau – Grundlagen, Wissensstand und Herausforderungen. UTB, Stuttgart, 421-445.
39. MEYER, D., GRANDNER, N., KOLBE, H. (2019): Strategien zur Optimierung betrieblicher Kohlenstoff- und Stickstoffkreisläufe von landwirtschaftlichen Anbausystemen in Sachsen. In: Optimierung von Kohlenstoff- und Stickstoffkreisläufen. Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, H. 15, 1-138.
40. MEYER, D., KOLBE, H., GRANDNER, N., SCHUSTER, M. (2020a): Ergebnisse zur langjährigen ökologischen Bewirtschaftung von Feldversuchsflächen der Versuchsstation Roda in Sachsen. Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (zur Veröffentlichung angenommen).
41. MEYER, D., SCHMIDTKE, K., WUNDERLICH, B., LAUTER, J., WENDROCK, Y., GRANDNER, N., KOLBE, H. (2020b): Analyse des Nährstoff- und Humusmanagements sowie der Fruchtfolgegestaltung in 32 Betrieben des ökologischen Landbaus im Freistaat Sachsen. In: Nährstoffmanagement und Fruchtfolgegestaltung in sächsischen Ökobetrieben. Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Veröffentlichung in Vorbereitung).
42. MITSCHERLICH, E.A. (2009): Das Gesetz des Minimums und das Gesetz des abnehmenden Bodenertrages. Landwirtsch. Jahrb. 38, 537-552.
43. MÖLLER, K., SCHULTHEIß, U. (2014): Organische Handelsdüngemittel im ökologischen Landbau. KTBL-Schrift 499, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL), Darmstadt.

44. MÖLLER, K., FRIEDEL, J. K. (2016): Pflanzenernährung und Düngung. In: FREYER, B.: Ökologischer Landbau – Grundlagen, Wissensstand und Herausforderungen. UTB-Verlagsgruppe, Haupt Verlag, Bern, Schweiz, 467-485.
45. MÖLLER, K., KOLBE, H. & BÖHM, H. (2003): Handbuch Ökologischer Kartoffelbau. Österreichischer Agrarverlag, Leopoldsdorf, Österreich.
46. NEUHOFF, D. (2015): Ertragspotentiale ökologischer Anbausysteme aus pflanzenbaulicher Sicht. Beiträge zur 13. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau: <https://orgprints.org/27193/> (abgerufen: 01.08. 2020).
47. 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.
48. PETER, CHR. (2020): Bilanzierungs- und Empfehlungssystem Düngung BESyD – das kostenfreie Programm incl. aller düngerechtlichen Regelungen für den konventionellen und ökologischen Landbau. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden: <https://www.landwirtschaft.sachsen.de/duengebedarfsermittlung-besyd-20619.html> (abgerufen: 03.08. 2020).
49. REEB, D. (2004): Analyse und Bewertung des Humus- und Nährstoffhaushaltes ackerbaulich genutzter Böden des Lehr- und Versuchsbetriebes Gladbacherhof. Diplomarbeit, Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung II, Univ., Gießen: <http://geb.uni-giessen.de/geb/volltexte/2004/1811/pdf/ReebDominik-2004-09-24.pdf> (abgerufen: 04.08. 2020).
50. ROGASIK, J., KURTINECZ, P. (2002): Kalkung und Nährstoffverfügbarkeit. Vortrag, Kalk-Informationstag der FAL, Völkenrode: http://boden-fruchtbarkeit.de/wp-content/uploads/Kalk03_Kalkung-und-N%C3%A4hrstoffverf%C3%BCgbarkeit_Jutta-RogasikPaul-Kurtinecz.pdf (abgerufen: 04.08. 2020).
51. ROGASIK, J., KURTINECZ, P., PANTEN, K., FUNDER, U., ROGASIK, H., SCHROETTER, S., SCHNUG, E. (2005): Kalkung und Bodenfruchtbarkeit. Landbauforschung Völkenrode, Special Issue 286, 71-81.
52. SOMMER, H. (2010): Untersuchungen zur Steigerung der Produktionsintensität im ökologischen Landbau am Beispiel des Lehr- und Versuchsbetriebes Gladbacherhof. Verlag Dr. Köster, Berlin.
53. SCHACHTSCHABEL, P. (1956): Die Magnesiumversorgung nordwestdeutscher Böden und seine Beziehungen zum Auftreten von Mangelsymptomen an Kartoffeln. Z. Pflanzenern. Bodenkd. 74, 202-219.
54. SCHELLER, E. (1991): Wissenschaftliche Grundlagen zum Verständnis der Düngungspraxis im Ökologischen Landbau – Aktive Nährstoffmobilisierung und ihre Rahmenbedingungen. Selbstverlag, Zeitlofs, 1-48.
55. SCHELLER, E. (2013): Grundzüge einer Pflanzenernährung des ökologischen Landbaus. Verlag Lebendige Erde, Darmstadt.
55. SCHÜLLER, H. (1969): Die CAL-Methode, eine neue Methode zur Bestimmung des pflanzenverfügbaren Phosphates in Böden. Z. Pflanzenern. Bodenkd. 123, 48-63.
57. SCHWERTMANN, U., DELLER, B., NIEDERBUDE, E.A. (1976): Langzeitwirkung einer Kalkung auf den Nährstoffzustand und die Basensättigung einer Braunerde aus Granitschutt. Landw. Forsch. 29, 275-288.
58. SLUIJSMANS, C.M. (1959): Beziehungen zwischen Mg-Gehalt des Bodens, Mangelsymptomen und dem Mehrertrag niederländischer Böden. Landw. Forsch., Sh. 13, 17-23.
59. SPRENGEL, C. (1828): Von den Substanzen der Ackerkrume und des Untergrundes. Journal für technische und ökonomische Chemie 3, 42-99.

60. STEIN-BACHINGER, K. (2013): Bodenfruchtbarkeit. In: STEIN-BACHINGER, K., RECKLING, M., HUFNAGEL, J., GRANSTEDT, A.: Kreislauforientierte ökologische Landwirtschaft – Handlungsempfehlungen für Landwirte und Berater, Bd. I – IV, Berlin, 15-26.
61. STUMM, C., KÖPKE, U. (2015): Optimierung des Futterleguminosenanbaus im viehlosen Acker- und Gemüsebau. Beiträge zur 13. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau: <https://orgprints.org/27196/> (abgerufen: 01.08. 2020).
62. VDLUFA (1997): Standpunkt - Phosphordüngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf. Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten, Darmstadt: https://www.vdlufa.de/Dokumente/Veroeffentlichungen/Standpunkte/1997_Standpunkt_P-Duengung.pdf (abgerufen: 03.08. 2020).
63. VDLUFA (1999): Standpunkt - Kaliumdüngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf. Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten, Darmstadt: https://www.vdlufa.de/Dokumente/Veroeffentlichungen/Standpunkte/1998_Standpunkt_K-Duengung.pdf (abgerufen: 03.08. 2020).
64. VDLUFA (2000): Standpunkt - Bestimmung des Kalkbedarfs von Acker- und Grünlandböden. Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten, Darmstadt: <https://www.vdlufa.de/Dokumente/Veroeffentlichungen/Standpunkte/0-9-kalk.pdf> (abgerufen: 03.08. 2020).
65. VDLUFA (2014): Standpunkt Humusbilanzierung – Methode zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland. Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten, Bonn: <https://www.vdlufa.de/Dokumente/Veroeffentlichungen/Standpunkte/11-Humusbilanzierung.pdf> (abgerufen: 03.08. 2020).
66. VDLUFA (2018): Standpunkt – Phosphordüngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf. Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten, Speyer: https://www.vdlufa.de/Dokumente/Veroeffentlichungen/Standpunkte/2018_Standpunkt_P-Duengung.pdf (abgerufen: 03.08. 2020).
67. VOSS, R., PESEK, J. (1965): New limestone recommendations for Iowa. Plant Food Review 11, 2-4.
68. WEBER, A. (2020): Mit Kalk die Nährstoffverfügbarkeit verbessern und die Bodenfruchtbarkeit optimieren. Vortrag, Winterschulung LfULG-FBZ Kamenz, Schmochtitz, 27. 01. 2020: https://www.lfulg.sachsen.de/download/lfulg/Nachlese_KAM_Kalk.pdf (abgerufen: 10.08. 2020).
69. ZIKELI, S., GOTTSCHLICH, H., FÜRNKRANZ, M., SZIN, S. (2016): Gemüsebau. In: FREYER, B.: Ökologischer Landbau – Grundlagen, Wissensstand und Herausforderungen. UTB-Verlagsgruppe, Haupt Verlag, Bern, Schweiz, 367-391.
70. ZORN, W., WAGNER, S. (2010): Nährstoffversorgung ökologisch bewirtschafteter Ackerflächen sowie Konsequenzen für die Düngung. Schriftenreihe Landwirtschaft und Landschaftspflege in Thüringen, H. 8, 38-49.

Anschrift der Autoren:

Dr. Hartmut Kolbe

Ehemals Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Nossen

Kontaktadresse: Altes Dorf 19, 04435 Schkeuditz,

E-Mail: hartmutkolbe@yahoo.de

Dr. Dietmar Meyer

G.U.B. Ingenieur AG, Niederlassung Dresden, Glacisstr. 2, 01099 Dresden,

E-Mail: Dietmar.Meyer@gub-ing.de