

Bilanzierungsmethoden und Versorgungsniveau für Humus

Schriftenreihe, Heft 19/2012



Zusammenführende Untersuchungen zur Genauigkeit und Anwendung von Methoden der Humusbilanzierung im konventionellen und ökologischen Landbau

Seiten 4 bis 82

Untersuchungen zum Niveau der Humusversorgung in Sachsen

Seiten 83 bis 103

Dr. Hartmut Kolbe

Zusammenführende Untersuchungen zur Genauigkeit und Anwendung von Methoden der Humusbilanzierung im konventionellen und ökologischen Landbau

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Material und Methoden	6
2.1	Vorstellung der Methoden	6
2.1.1	VDLUFA-Methode	6
2.1.2	REPRO statisch, dynamisch und HUMOD	6
2.1.3	Standortangepasste Bilanzierungsmethode (STAND)	7
2.1.4	Methode REGRESS	8
2.1.5	Candy Carbon Balance (CCB)	8
2.2	Bewertung der Bilanzergebnisse	9
2.3	Versuchsmaterial	10
2.4	Statistische Methoden	10
3	Ergebnisse und Diskussion	10
3.1	Humifizierungskoeffizienten	10
3.1.1	Fruchtartenkoeffizienten	10
3.1.2	Koeffizienten für die organischen Materialien	13
3.2	Merkmale des Bodens	18
3.3	Ertragssicherung	22
3.3.1	Ertragsniveau der Dauerversuche im Vergleich zur landwirtschaftlichen Praxis heute	22
3.3.2	Beziehung zwischen Humussaldo und Fruchtartenertrag	24
3.3.2.1	Konventioneller Landbau	25
3.3.2.2	Ökologischer Landbau	29
3.4	N-Bilanz-Kriterien	35
3.4.1	Düngungsbewertung	35
3.4.2	N-Saldo und Ertragsdifferenzen	38
3.4.3	N-Saldo und Humusbilanzen	38
3.4.3.1	Auswertungen von Dauertestflächen der landwirtschaftlichen Praxis	38
3.4.3.2	Auswertungen von Dauerfeldversuchen	44
3.4.4	Humusumsatz und N-Verfügbarkeit	50
3.5	Vergleich von Berechnungsergebnissen von verschiedenen Standorten	54
3.6	VDLUFA-Versorgungsgruppen	62
4	Schlussfolgerungen und Hinweise zur Validierung	65
4.1	Methodengenauigkeit und Hinweise zur Anwendung	65
4.2	Hinweise zu Validierungsarbeiten	71
5	Zusammenfassung	73
6	Literatur	76
7	Anhang	80

1 Einleitung

Dem Humus bzw. der organischen Substanz des Bodens werden vielfältige Funktionen und Aufgaben zugeschrieben. Wie aus einer ersten quantitativen Zusammenstellung zu entnehmen ist, werden sowohl physikalische, chemische als auch biologische Eigenschaften der Bodenfruchtbarkeit beeinflusst (Tab. 1). Bei Anhebung des Versorgungsgrades mit organischer Substanz bis zur Grenze gewöhnlicher ackerbaulicher Möglichkeiten werden deutliche Wirkungen auf die Lagerungsdichte, das Porenvolumen und die Aggregatstabilität des Bodens erreicht, sodass sowohl die Tragfähigkeit und Erosionsanfälligkeit als auch die Wasserinfiltration und die nutzbare Feldkapazität verbessert werden. Durch die stetige Zufuhr an organischer Substanz verschiedener Quellen, die zur Aufrechterhaltung des Versorgungsniveaus erforderlich ist, wird zudem das Bodenleben angeregt, sodass die mikrobielle Biomasse und der Regenwurmbesatz deutlich ansteigen. Je nach Ausgangsniveau werden hierdurch auch die Gehalte an Humus, einige wichtige Nährstoffe (N, P, S) und Spurenelemente und die Kationenaustauschkapazität bis zur Erreichung eines neuen Niveaus angehoben. Durch die sich dann einstellende Menge an erhöhter umsetzbarer organischer Substanz erfolgt eine verstärkte Mineralisation und Freisetzung von Nährstoffen, wovon besonders die Fruchtbarkeit und Ertragsfähigkeit der leichten Böden sowie Anbauverfahren des ökologischen Landbaus profitieren können (Tab. 1).

Aus dieser Übersicht wird deutlich, dass das Versorgungsniveau des Bodens mit organischer Substanz bzw. die Humusgehalte des Bodens als übergeordnete Merkmale angesehen werden können, weil wichtige Eigenschaften der Bodenfruchtbarkeit direkt oder indirekt betroffen werden. Daher ist nach der „guten fachlichen Praxis“ im konventionellen und ökologischen Landbau sowie auch durch gesetzliche Vorgaben (Düngegesetz, Cross Compliance, EU-Öko-Verordnung) jeder Betrieb verpflichtet, „die Fruchtbarkeit des Bodens, insbesondere den standort- und nutzungstypischen Humusgehalt, zu erhalten oder nachhaltig zu verbessern“.

Zur Einhaltung dieser Regeln und auch als Instrument des Nährstoffmanagements auf den landwirtschaftlichen Betrieben ist allerdings die alleinige Untersuchung der Humusgehalte wenig geeignet (KÖRSCHENS 2010). Wegen der hohen Streuung der Ergebnisse müsste eine jährliche Beprobung der Flächen erfolgen und eine lange Zeitperiode von mindestens zehn Jahren herangezogen werden, um eine sichere Veränderung der Gehalte dokumentieren zu können. Als betriebliches Hilfsmittel sowie auch als Monitoring-Merkmal im Agrarumweltbereich sind demgegenüber Methoden zur Bilanzierung der organischen Substanz und des Humus besser geeignet als die Untersuchung des Bodens auf die Gehalte an Humus. Durch Einsatz dieser Methoden kann mit relativ geringem Aufwand und in zeitlich kleinen Abständen von z. B. einem Jahr ein aussagefähiges Ergebnis erlangt werden (KOLBE 2010a).

Die zur Verfügung stehenden Methoden sind einerseits relativ einfach aufgebaut. Sie erfordern meistens eine geringe Anzahl und leicht verfügbare Input-Daten und sind daher für den praktischen Einsatz gut geeignet. Auf der anderen Seite fehlt aber oft eine klare Benennung und Herleitung von Zielmerkmalen sowie eine eindeutige experimentelle Absicherung der erlangten Berechnungsergebnisse. So wurden z. B. unter anderem die VDLUFA-Methode (KÖRSCHENS et al. 2004) sowie spezielle Versionen zum Einsatz im ökologischen Landbau vorgeschlagen (z. B. LEITHOLD et al. 1997), ohne eine wissenschaftliche Darlegung des Aufbaus und der Berechnungsgüte der Methoden zu erstellen (vgl. ENGELS et al. 2010). Das trifft sowohl für die Herleitung der Humifizierungskoeffizienten der Fruchtarten und organischen Materialien als auch für die Absicherung des VDLUFA-Bewertungssystems zu. Zu diesen wichtigen Methodenbestandteilen wurden bisher nur wenige Ergebnisse der Anpassung oder Übereinstimmung von berechneten und experimentell bestimmten Werten ermittelt bzw. eine Validierung der Methoden an unabhängigen Daten veröffentlicht (vgl. KOLBE & PRUTZER 2004; KOLBE 2007a). Die Methoden wurden zum Einsatz vorgeschlagen und auch in Praxis, Verwaltung und in wissenschaftlichen Untersuchungen angewendet, doch in vielen Fällen kann auf Grund der vorliegenden Mängel keine eindeutige Interpretation der Ergebnisse erfolgen. Hiervon sind sowohl gesetzliche Auflagen zur „Sicherung nutzungstypischer Humusgehalte“, die besonderen Anforderungen des ökologischen Landbaus sowie auch Berechnungen z. B. von Abfuhrpotenzialen an organischen Reststoffen betroffen (siehe z. B. Strohabfuhrpotenziale nach ZELLER et al. 2011). Für alle genannten Bereiche sind jedoch präzise Berechnungen in der Humusbilanzierung erforderlich, auf deren Genauigkeit Verlass sein muss.

Tabelle 1: Einfluss einer Erhöhung des Versorgungsgrades mit organischer Substanz von Versorgungsgruppe A (A = 100 %) um ca. 500 kg/ha HÄQ nach Gruppe C/D auf einige physikalische, chemische und biologische Eigenschaften des Bodens (Zusammenstellung von Ergebnissen aus vielen Quellen zitiert bei KOLBE 2005 sowie KÖRSCHENS & WALDSCHMIDT 1995; HARTMANN 2002; OVERESCH 2007 und aus Vorträgen von ROGASIK 2005; MOKRY 2010)

Merkmal	Veränderung (in %)
1. Physikalische Eigenschaften:	
Lagerungsdichte	-2 bis -13
Porenvolumen	+1 bis +3,5
Anteil Makroporen	+8 bis +11
Aggregatstabilität	+8 bis +34
Infiltrationsrate (Wasser)	+27 bis +80
Wasserkapazität	+3 bis +4
Nutzbare Feldkapazität	S +24 bis +28 L +13 bis +15
2. Chemische Eigenschaften	
C _{org} und N _t -Gehalte	+15 bis +30
potenzielle N-Mineralisierung	+26 bis +33
effektive Kationenaustauschkapazität	S +20 L +10
3. Biologische Eigenschaften	
mikrobielle Biomasse	+6 bis +50
Regenwurmdichte	+38 bis +40
Fruchtartenertrag	MW +10(KON) bis +33(ÖKO) MAX +123(KON) bis +127(ÖKO)

S = Sand; L = Lehm; KON = konventioneller Landbau; ÖKO = ökologischer Landbau; MW = Mittelwert; MAX = maximale Werte

In der Regel ist es üblich, dass z. B. Verfahren der Grunddüngung und der N_{min}-Methode zur Düngungsbemessung einer z. T. jahrzehntelangen Entwicklung und Verbesserung der methodischen Grundlagen und der Anpassung an unterschiedliche Standorte unterzogen worden sind (BAD 2010; ALBERT et al. 2006). Hierzu können auch die Bemühungen des VDLUFA zur Organisation und Durchführung von sogen. Ringuntersuchungen zur Verbesserung, Kontrolle und Validierung von Labormethoden angeführt werden (<http://www.vdlufa.de>→Ringversuche). Entsprechend dieser Erfahrungen sollten daher in Zukunft auch auf dem Gebiet der Humusbilanzierung nur noch Methoden zum Einsatz in Praxis, Beratung und Verwaltung empfohlen werden, die nachweislich durch eine hohe standortdifferenzierte Genauigkeit gekennzeichnet sind.

In dieser Arbeit werden daher die bisherigen Anforderungen an die Methoden zur Humusbilanzierung (KOLBE 2007) nochmals überarbeitet und konkretisiert. Auf Grund verstärkter Tätigkeiten auf dem Gebiet der Methodenentwicklung, der Verfügbarkeit von entsprechenden Daten aus Dauerversuchen mit unterschiedlichen Standorteigenschaften und dem daraus gewonnenen Erkenntnisprozess der letzten Jahre können deutlich präzisere Aussagen zur Genauigkeit und Eignung der bestehenden Verfahren zur Humusbilanzierung und C_{org}-Dynamik des konventionellen und ökologischen Ackerbaus gegeben werden. Darüber hinaus werden Grundsätze zur Validierung und Kriterien zur Auswahl bisher geeigneter Methoden vorgeschlagen.

2 Material und Methoden

2.1 Vorstellung der Methoden

2.1.1 VDLUFA-Methode

Das Bilanzierungsprinzip dieser Methode lässt sich folgendermaßen darstellen:

Humuszufuhr	—	Humusbedarf	=	Humussaldo
Reproduktionsleistung organischer Materialien (Erntereste, organische Dünger)		Anbauspezifisch: Wirkung der Fruchtarten (Wurzelmasse, Rhizodeposition) und der Anbauverfahren (z. B. Bodenbearbeitung)		Abschätzung der Veränderung der Humusvorräte des Bodens

Abbildung 1: Prinzip der Humusbilanzierung (KÖRSCHENS et al. 2004; LEITHOLD et al. 2007)

Es wird ein anbauspezifischer Bedarf der Fruchtarten der Humuszufuhr über organische Materialien gegenübergestellt, um so die Veränderung der Humusvorräte im Boden zu ermitteln.

Mit der VDLUFA-Methode wird ein Saldo aus dem Humusverlust (Anbau humuszehrender Kulturarten) und der Humuszufuhr (Anbau humusmehrender Kulturarten, organische Düngung) errechnet (KÖRSCHENS et al. 2004). Die Humuswirkung der angebauten Fruchtarten und der zugeführten organischen Dünger werden in Form von Koeffizienten erfasst. Dabei spiegeln die Koeffizienten der Fruchtarten sowie die Reproduktionskoeffizienten der organischen Materialien die Menge des im Humus gebundenen Kohlenstoffs (in Humusäquivalenten [HÄQ]) wider. Die Methode kann von Hand gerechnet werden. Es kann zwischen einer „einfachen Reproduktion“ bei Nutzung der unteren (LUFA untere Werte) und einer „erweiterten Reproduktion“ der Versorgung mit organischer Substanz bei Verwendung der oberen Werten (LUFA obere Werte) an Fruchtartenkoeffizienten gewählt werden (Tab. 2). Aussagen zur Änderung der Humusgehalte des Bodens sind allerdings kaum möglich.

2.1.2 REPRO statisch, dynamisch und HUMOD

Mit dem Modell REPRO (HÜLSBERGEN 2003) kann die Humusbilanzierung in Anlehnung an die oberen Werte der VDLUFA-Methode mit statischen Koeffizienten für den konventionellen Landbau gerechnet werden. Zur Anwendung im ökologischen Landbau können deutlich höhere Koeffizienten zur Anwendung kommen (LEITHOLD et al. 1997; REPRO-stat). Außerdem wird eine Methode mit dynamischen Koeffizienten (REPRO-dyn) unter Nutzung von Teilen der C- und N-Dynamik des Bodens und Berücksichtigung weiterer Faktoren (insbesondere N-Düngung, Ertragshöhe) angeboten. Ausgehend von diesen methodischen Ansätzen wurde eine Weiterentwicklung von BROCK et al. (2008, 2012) vorgenommen, bei der zusätzliche Elemente des N-Kreislaufs der Fruchtarten berücksichtigt werden (HUMOD). Das Modell REPRO kann in der Regel unter Zuhilfenahme kostenpflichtiger Dienstleistung genutzt werden. Ziel ist es, bei Verwendung dieser Verfahren eine z. T. deutlich erweiterte Humusproduktion anzustreben. Aussagen zur Veränderung der Humusgehalte des Bodens sind daher nicht möglich bzw. mit großen Unsicherheiten behaftet.

Tabelle 2: Einsatzbereiche der unteren und oberen Werte der Fruchtartenkoeffizienten der LUFA-Methode (KOLBE 2008)

Untere Werte zur „einfachen Reproduktion“ der Humusversorgung

- Cross Compliance
- Böden in gutem Kulturzustand
- Flächen mit hoher Nährstoffzufuhr (N)
- Standorte mit geringem Humusabbau (niedrige Durchschnittstemperaturen und hohe Niederschläge, Bergstandorte, grundwasserbeeinflusste Moorböden)

Obere Werte zur „erweiterten Reproduktion“ der Humusversorgung

- mit Humus unterversorgte Böden
- Flächen mit niedrigerer Nährstoffversorgung (N)
- Anbauverfahren mit höherem Bedarf an organischer Substanz
- Standorte mit hohem Humusabbau (hohe Durchschnittstemperaturen, sehr aktive Lehmböden, grundwasserferne Moorböden)

2.1.3 Standortangepasste Bilanzierungsmethode (STAND)

Diese Methode ist eine Weiterentwicklung der VDLUFA-Methode. Sie basiert auf einer Differenzierung der unteren Werte des LUFA-Verfahrens nach den wichtigsten Standortfaktoren, die die Humusreproduktionsleistung beeinflussen (KOLBE 2007b, 2010a). Dabei wird im Wesentlichen die unterschiedliche Wirkung von Bodenart, Feinanteil und C/N-Verhältnis des Bodens, Temperatur und Niederschlag auf die Humifizierung durch sechs Standortgruppen berücksichtigt (Tab. 3). Diese Methode kann ebenfalls „von Hand“ gerechnet werden. Weil auf Grund von vielen Dauerversuchen die Ergebnisse der Methode an die Gehalte an Humus geeicht sind, ist eine Aussage über die Veränderung der Humusgehalte des Bodens möglich.

Tabelle 3: Standortfaktoren der standortangepassten Methode (KOLBE 2008)

Standort-gruppe	Bodenart, Bodentyp	Feinanteil (%) des Bodens*	C/N-Verhältnis des Bodens	Durchschnitts-temperatur (°C)	Niederschläge (mm je Jahr)
1	■ Sand (u. a. Nord-West-D)	≤ 8	≥ ca. 14	-	Bergregion ≥ 700, Flachland ≥ 800
	■ Schwarzerde	ca.17 – 30	-	-	
	■ Ton	≥ 38	-	-	
	■ stark überversorgte Böden	-	-	-	-
	■ stark grundwasserbeeinflusste anmoorige und Moor-Böden	-	-	-	-
2	■ Sand, anlehmiger Sand, lehmiger Sand	≤ 13	-	≤ 8,5	-
	■ lehmiger Ton, Ton	≥ 28	-	-	-
3	■ Sand, anlehmiger Sand, lehmiger Sand	≤ 13	-	≥ 8,5	-
4	■ stark lehmiger Sand, sandiger Lehm	14 – 21	-	≤ 8,5	-
5	■ stark lehmiger Sand, sandiger Lehm	14 – 21	-	≥ 8,5	-
	■ Lehm	22 – 27	≥ 9	-	-
6	■ Lehm (umsetzungsaktiv)	22 – 27	≤ 9	-	-
	■ stark unterversorgte Böden, Meliorationsböden	-	-	-	-
	■ grundwasserferne anmoorige und Moor-Böden	-	-	-	-

* Feinanteil = Ton + Feinschluff

Weil die Umsetzungsaktivität von den über einen längeren Zeitraum gegebenen Mengen an organischen Materialien beeinflusst wird, werden die Reproduktionskoeffizienten der organischen Materialien zudem in die Stufen „gering“, „mittel“ und „hoch“ differenziert. Für die Auswahl der zutreffenden Koeffizienten sollten für jede Art an organischen Materialien die Gaben über eine bis zwei Fruchtfolgen betrachtet werden, um entsprechende mittlere Werte zu ermitteln.

2.1.4 Methode REGRESS

Dieses Verfahren basiert auf Ergebnissen einer statistischen Auswertung von vielen Dauerversuchen mit Hilfe der multiplen Regressionsanalyse (KOLBE 2009b). Eingabedaten sind: Temperatur, Niederschlagssumme, Bodenart, Tongehalt, pH-Wert, C/N-Verhältnis des Bodens, TM-Zufuhr, mineralische N-Düngung, Gesamt-N-Zufuhr, N-Abfuhr, N-Saldo, Getreideanteil der Fruchtfolge, Hackfruchtanteil der Fruchtfolge, Leguminosenanteil der Fruchtfolge. Ausgabedaten des Modells sind: C_{org} -Gehalt, N_t -Gehalt sowie das C/N-Verhältnis des Bodens. Mit Hilfe eines Personalcomputers ist das Verfahren sowohl zur direkten Berechnung von durchschnittlich zu erwartenden C_{org} - und N_t -Gehalten eines Standortes als auch von Szenarienunterschieden geeignet, bei denen die angegebenen Einflussgrößen von Boden, Klima und Bewirtschaftung eine Rolle spielen.

2.1.5 Candy Carbon Balance (CCB)

Dieses Verfahren ist eine vereinfachte Form des dynamischen CANDY-Modells (FRANKO et al. 2011). Es umfasst die wichtigsten Prozesse bei der C_{org} - und N-Dynamik im Boden (Abb. 2). Wie bei den anderen vorgestellten Verfahren sind auch bei dieser Methode lediglich relativ einfach zu ermittelnde, gewöhnlich in den Schlagkarteien abgelegte Eingabemerkmale erforderlich. Bei Vorgabe von C_{org} - und N_t -Anfangswerten sind relativ genaue Aussagen über die Veränderung dieser Bodenwerte in Abhängigkeit von Boden-, Klima- und detaillierten Bewirtschaftungsfaktoren möglich. Darüber hinaus können die Schlag- bzw. Flächenbilanzen und die Mineralisation für den Nährstoff Stickstoff berechnet werden. Auch für diese Methode ist die Nutzung eines Personalcomputers erforderlich. Das Verfahren befindet sich in der Testphase zur Nutzung in Praxis, Beratung und Verwaltung und kann aus dem Internet heruntergeladen werden: <http://www.ufz.de/index.php?de=13999>.

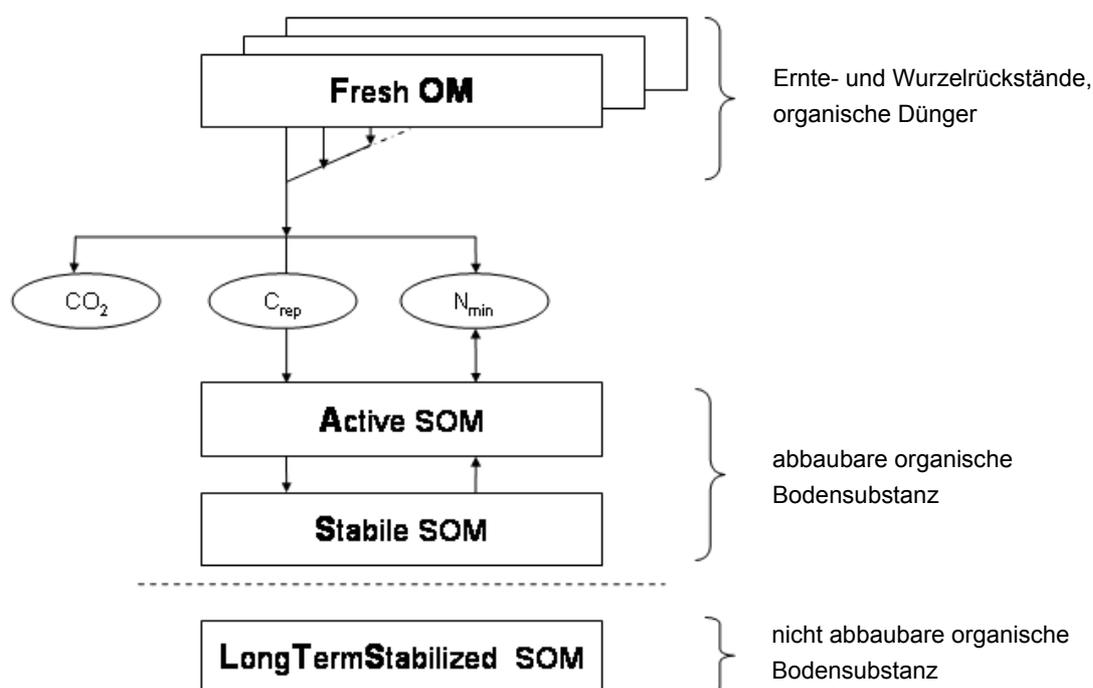


Abbildung 2: Prinzip der Funktionsweise des Modells CCB (FRANKO et al. 2011)

2.2 Bewertung der Bilanzergebnisse

Die Bewertung der Ergebnisse zur Humusbilanzierung wird in Abhängigkeit vom Anbausystem vorgenommen. Die Bewertungen erfolgen im konventionellen Landbau entsprechend der Empfehlung des VDLUFA (Abb. 3, rechts). Ziel für den Landwirt muss es sein, im Durchschnitt der Fruchtfolgen eine optimale Humusversorgung möglichst separat für jeden Ackerschlag bzw. mindestens im Durchschnitt des Betriebes zu gewährleisten. Der anzustrebende Humussaldo (gemessen in Humusäquivalenten, HÄQ, in kg Humus-C/ha und Jahr) ist die Versorgungsgruppe C mit -75 bis +100 kg Humus-C/ha und Jahr. Bei einem ausgeglichenen Saldo (0 kg Humus-C/ha und Jahr) kann die Einhaltung eines standort- und bewirtschaftungstypischen Versorgungsgrades bzw. Humusgehaltes des Bodens gewährleistet werden. Darüber hinaus kann eine gewisse Anreicherung der Humusgehalte einschließlich der Versorgungsgruppe D auf Grund weiterer Nutzungsalternativen für einen Betrieb von Bedeutung sein.

Die unteren Grenzen zwischen den Stufen C und A sind für alle Anbausysteme gleich hoch angesetzt. Hierdurch wird eine Gleichbewertung der Anbausysteme z. B. zur Erfüllung gesetzlicher Mindestanforderungen gewährleistet (siehe ANONYM 2009). Bei einem Absinken in Versorgungsgruppe B-A kann die Aufrechterhaltung standort- und bewirtschaftungstypischer Humusgehalte und damit die Nachhaltigkeit des Betriebes nicht mehr gewährleistet werden.

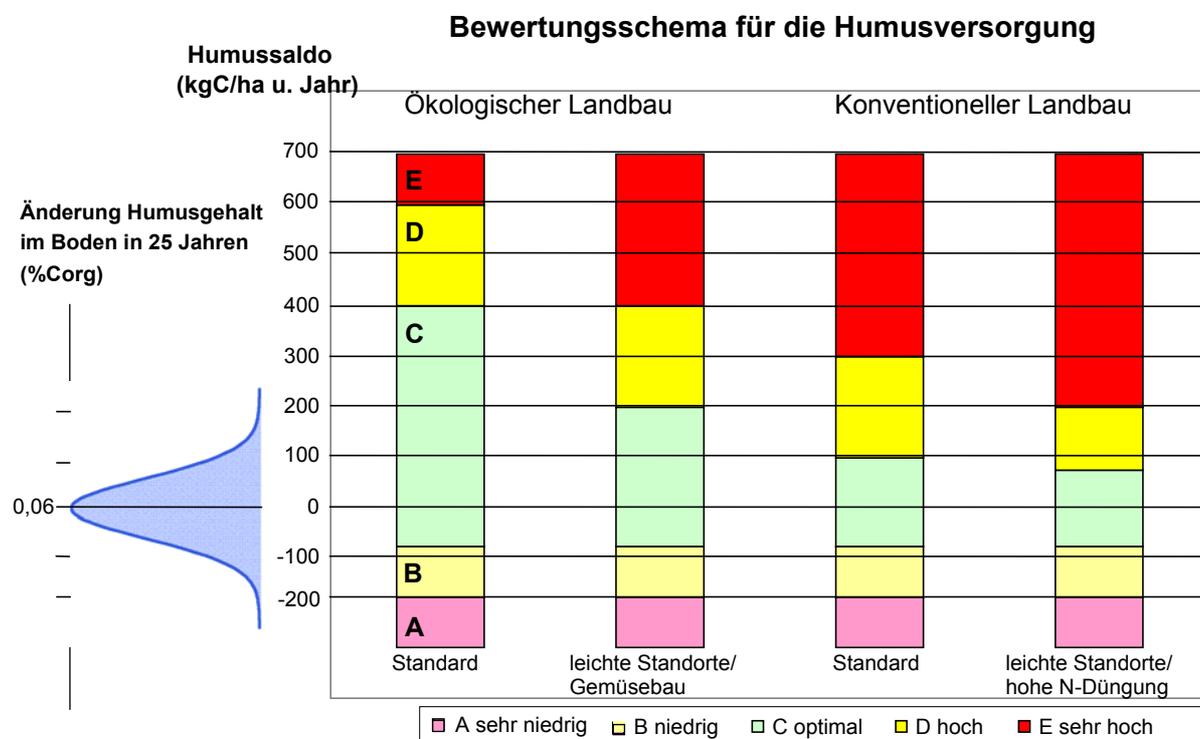


Abbildung 3: Versorgungsgruppen für Humus für den konventionellen und ökologischen Landbau (KOLBE 2007b)

Auf Grund der fehlenden mineralischen N-Düngung sind im ökologischen Landbau die Grenzbereiche zwischen den Humusgruppen C und E wesentlich weiter gefasst worden (Abb. 3, links). Je nach vorliegender spezifischer Anbauintensität kann im Ökolandbau daher auch ein höheres Versorgungsniveau mit organischer Substanz angestrebt bzw. realisiert werden. Als Ergebnis der Humusbilanzierung sollte aber nicht die Versorgungsstufe D überschritten werden, weil sonst auch negative Auswirkungen auf die Umwelt auf Grund einer erhöhten N-Freisetzung auftreten können.

2.3 Versuchsmaterial

Datei 240 Versuche

Die Ergebnisse aus Deutschland wurden aus insgesamt 194 Dauerfeldversuchen ermittelt. Die Versuche beinhalten die Prüfung von jeweils 1 bis 10 Versuchsfaktoren in 1 bis 16 unterschiedlichen Ausprägungen. Zusätzlich zu den deutschen Versuchen wurden weitere 50 Versuche des europäischen Auslands hinzugefügt. Diese Versuche enthalten die Prüfung von jeweils 1 bis 7 Versuchsfaktoren in 1 bis 19 unterschiedlichen Ausprägungen. Es ergeben sich insgesamt 2.442 Varianten. Die Dokumentation dieser Versuche inklusive der Literaturquellen liegt beim Autor (in Vorbereitung) vor.

Datei 39 Versuche und Datei 65 Versuche

Für Aufgabenstellungen zur Testung und Weiterentwicklung von Methoden zur Humusbilanzierung wurde eine Auswahl besonders geeigneter und sicherer Versuchsdaten vorgenommen. Einerseits wurde eine Datei aus 39 Versuchen und 330 Varianten zusammengestellt (KOLBE 2005). Andererseits wurden für Validierungsarbeiten zum Modell CCB Daten aus 65 Versuchen und 598 Varianten mit z. T. langjährig chronologisch dokumentierten Versuchsserien des konventionellen und ökologischen Landbaus verwendet, von denen viele Versuche in der SOMNET-Homepage (<http://www.ufz.de/somnet/>) einsehbar sind (FRANKO et al., in Vorbereitung).

Datei Dauertestflächen aus Sachsen

Die Dauertestflächen (DTF) auf landwirtschaftlichen Betrieben Sachsens werden vom Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie unterhalten. Von den insgesamt über 1.000 Flächen (MÖNICKE et al. 2004) konnte eine Auswahl von 760 Flächen für die Untersuchungen herangezogen werden. Davon werden 28 Flächen ökologisch und 732 konventionell bewirtschaftet. Die vorliegenden Daten stammen aus den Jahren 1998 bis 2003. Die betrachteten Flächen sind annähernd repräsentativ im gesamten Gebiet des Freistaates Sachsen verteilt (Beschreibung siehe SEIBT 2007).

2.4 Statistische Methoden

Im Rahmen der vorliegenden Auswertungen wurden folgende statistische Verfahren und grafische Darstellungen der Programme EXCEL und SPSS angewendet: Deskriptive Statistiken, Korrelation, Regression, Standardabweichung. Signifikante Ergebnisse werden wie folgt gekennzeichnet:

- * $p < 0,05$, Ergebnis signifikant
- ** $p < 0,01$, Ergebnis hoch signifikant
- *** $p < 0,01$, Ergebnis höchst signifikant

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Humifizierungskoeffizienten

Koeffizienten der Umwandlung von Bestandteilen der organischen Substanz der Ernte- und Wurzelrückstände (EWR) der Fruchtarten oder der zugefügten organischen Materialien in Humusbestandteile des Bodens weisen die meisten Methoden aus. Am Beispiel der VDLUFA-Methode werden diese Koeffizienten nachfolgend einer näheren Untersuchung unterzogen und deren Herleitung bzw. deren Übereinstimmung mit Felddaten aufgezeigt.

3.1.1 Fruchtartenkoeffizienten

Entsprechend der Grundlagen der VDLUFA-Methode beinhalten die Koeffizienten der Fruchtarten den „anbauspezifischen Bedarf“ an organischer Substanz. Abgesehen von der fachlichen Fragwürdigkeit dieses theoretischen Ansatzes (siehe Kap. 3.4.4) gibt es bis heute hierfür auch keinen experimentellen Nachweis in der Literatur (siehe ENGELS et al. 2010). Auf Grund der weiterentwickelten Vorstellungen über die zugrunde liegenden Zusammenhänge können die Fruchtartenkoeffizienten auch als

Humifizierungskoeffizienten der fruchtartenabhängigen Qualität und Höhe an Ernte- und Wurzelrückständen (EWR), verbunden mit der üblichen Ausrichtung der Anbauverfahren (z. B. der unterschiedlich intensiven Bodenbearbeitung bei Hack- und Getreidefrüchten), angesehen werden. Hierbei werden bei der VDLUFA-Methode durchschnittliche Boden- und Klimabedingungen unterstellt, während bei der STAND-Methode eine weitere Differenzierung der Fruchtartenkoeffizienten nach Bodenarten, Klimabedingungen und Durchschnittserträgen der Fruchtarten erfolgt ist (KOLBE 2010a). Bei den mehr auf dynamischen Grundsätzen beruhenden Methoden gehen sowohl die Qualität in Form der C/N-Verhältnisse als auch die Mengen an EWR über die aktuellen Fruchtarterträge in die Koeffizienten ein (FRANKO et al., in Vorbereitung).

Auf Grund dieser Ansicht müssten statistische Zusammenhänge zwischen den gemessenen EWR-Mengen und der Fruchtartenkoeffizienten bestehen, die in den nachfolgenden Abbildungen für verschiedene einfache Verfahren auf Grundlage der VDLUFA-Methode aufgezeigt werden können (Abb. 4). Zunächst ist zu sehen, dass relativ enge, allerdings stark nicht-lineare Beziehungen vorhanden sind. Zwischen den Fruchtartenkoeffizienten einerseits und den gemessenen Mengen andererseits bestehen jeweils methodenunabhängig engere Beziehungen zu der Wurzelmasse als zu den EWR-Mengen der Fruchtarten. Es ist weiterhin zu erkennen, dass die Fruchtartenkoeffizienten zwischen ca. 50-200 kg/ha HÄQ im Vergleich zu deren Wurzel- bzw. EWR-Mengen offensichtlich etwas zu hoch angesetzt worden sind. Genau zu diesen Fruchtartenkoeffizienten bestanden bereits in der Vergangenheit Vermutungen für eine Überschätzung (z. B. Zwischenfrüchte). Bei Korrektur dieser Fruchtartenkoeffizienten würde die Übereinstimmung mit den Felddaten verbessert werden können.

Gut zu erkennen sind auch die relativ niedrigen Werte (stark negativen Werte) der Hackfrüchte. Hierbei wird ein erhöhter Humusumsatz durch die Aktivität der Bodenbearbeitung berücksichtigt, was natürlich in den EWR-Mengen der Fruchtarten nicht direkt abgebildet wird. Wie weiter aus Abbildung 4 zu entnehmen ist, bestehen jeweils die höchsten statistisch abgesicherten Korrelationskoeffizienten bzw. Bestimmtheitsmaße zwischen den gemessenen TM-Mengen und den Koeffizienten bei den unteren Werten der VDLUFA-Methode. Geringere korrelative Beziehungen bestehen dagegen für die oberen Werte der Methode sowie besonders für die REPRO-stat-Werte, die zum Einsatz im ökologischen Landbau vorgeschlagen werden. Insgesamt gesehen bestehen daher zwischen den Ernte- und Wurzelrückständen der Fruchtarten und den Fruchtartenkoeffizienten positive korrelative Zusammenhänge. Nach diesen Ergebnissen sind daher für eine erste grobe Einstufung von (bestimmten neuen) Fruchtartenkoeffizienten deren Wurzel- und Erntereste gut geeignet.

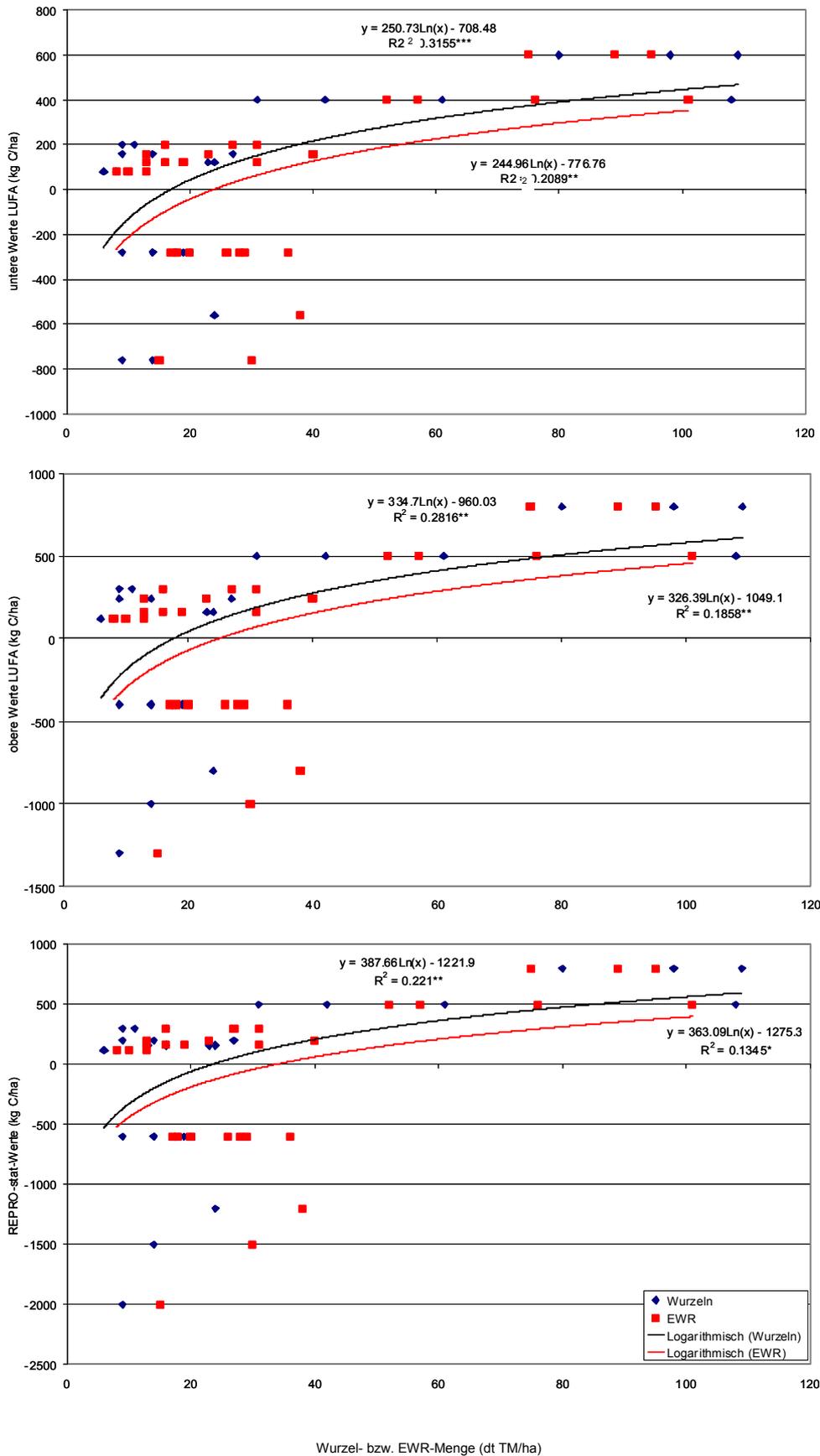


Abbildung 4: Beziehungen zwischen den gemessenen Wurzel- bzw. EWR-Mengen der Fruchtarten (zusammengestellt von ENGELS & KÖRSCHENS 2010) sowie den unteren (oben) und oberen (Mitte) Fruchtartenkoeffizienten der VDLUFA-Methode sowie den REPRO-stat-Werten für den ökologischen Landbau (unten)

Bei den bisher dargestellten Ergebnissen werden keine Standortfaktoren berücksichtigt. Weitere Untersuchungen ergaben jedoch einen deutlichen Standorteinfluss auf diese Koeffizienten, wenn sie einem Anpassungsprozess an die Ergebnisse aus vielen Dauerversuchen unterzogen werden. Als Beispiel sind in Abbildung 5 die Fruchtartenkoeffizienten der STAND-Methode dargestellt worden, aus der eine erhebliche Bandbreite durch die Standortbedingungen abgeleitet werden kann. Zu diesen Standortbedingungen gehören nicht nur die Berücksichtigung der jeweiligen Bodenarten und klimatischen Durchschnittswerte, sondern auch die jeweils stark unterschiedlichen Durchschnittserträge der Fruchtarten in der bestehenden Standortdifferenzierung Mitteleuropas.

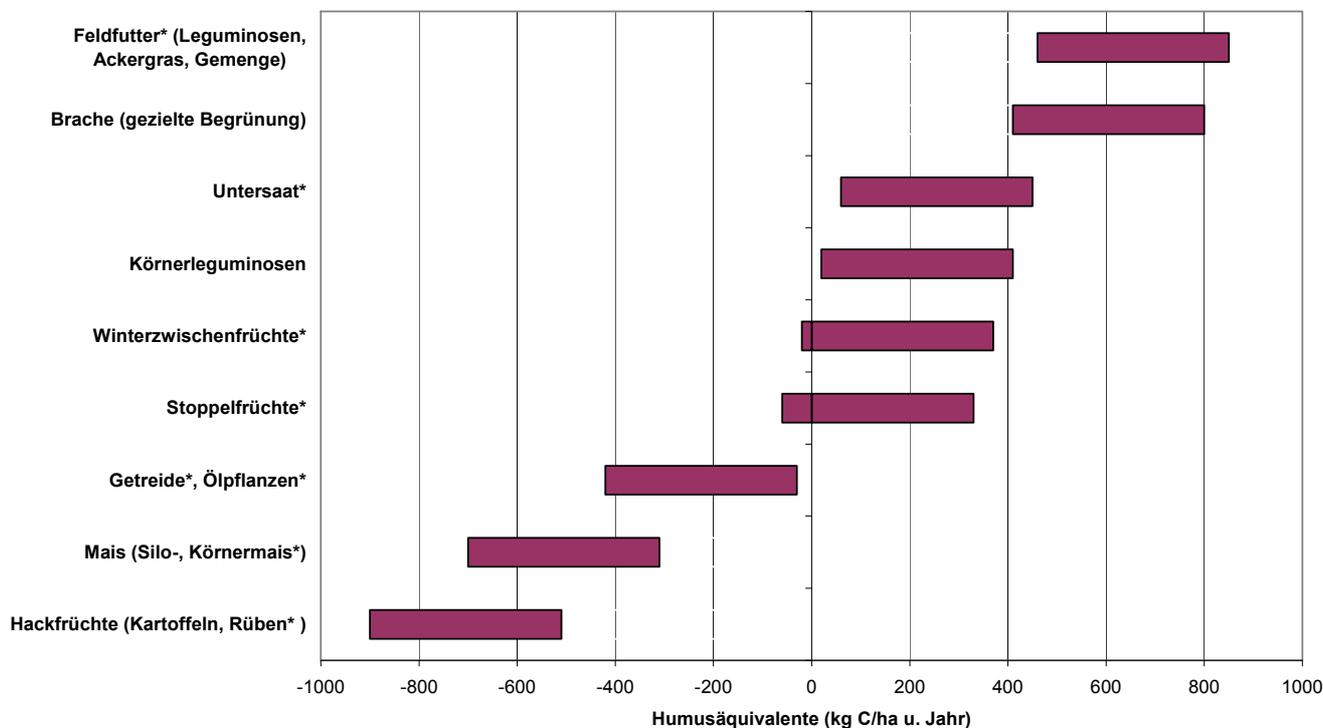


Abbildung 5: Bandbreite der fruchtartenspezifischen Veränderung der Humusvorräte der STAND-Methode (* = Koppelprodukte bzw. Aufwuchs abgefahren)

Bei den dynamischen Verfahren wie z. B. beim CCB gehen die Mengen an EWR direkt in die Berechnungen ein. Es werden Fruchtarten- und ertragsabhängige Mengen an EWR berechnet, die dann mit fruchtartenspezifischen Synthesekoeffizienten multipliziert werden, um die umsatzfähige organische Substanz zu berechnen. Auf Grund dieser komplexeren Zusammenhänge können für die Methoden STAND und CCB keine einfachen Korrelationen zwischen den Koeffizienten und den Felddaten erstellt werden.

3.1.2 Koeffizienten für die organischen Materialien

Bei der Überprüfung der Koeffizienten der organischen Materialien konnte die Rangfolge der Humifizierung entsprechend der generellen Einstufung durch die VDLUFA-Methode bestätigt werden: Kompost > Stalldung > Gülle > Stroh > Gründüngung. Es wurde diese Koeffizienten-Rangfolge ins Modell STAND übernommen, weil hierdurch eine gute Anpassung mit experimentellen Daten erreicht werden konnte (siehe Abb. 6). Die dargestellte Bandbreite der Koeffizienten bestand jedoch nicht nur durch Unterschiede in den TM-Gehalten der organischen Materialien, wie aus anderen Zusammenstellungen abgeleitet werden kann (REINHOLD, mündl. Mitteilung). Weitere detaillierte Auswertungen einer hohen Anzahl an Dauerversuchen brachten darüber hinaus auch substratmengenabhängige Unterschiede der Humifizierung zutage.

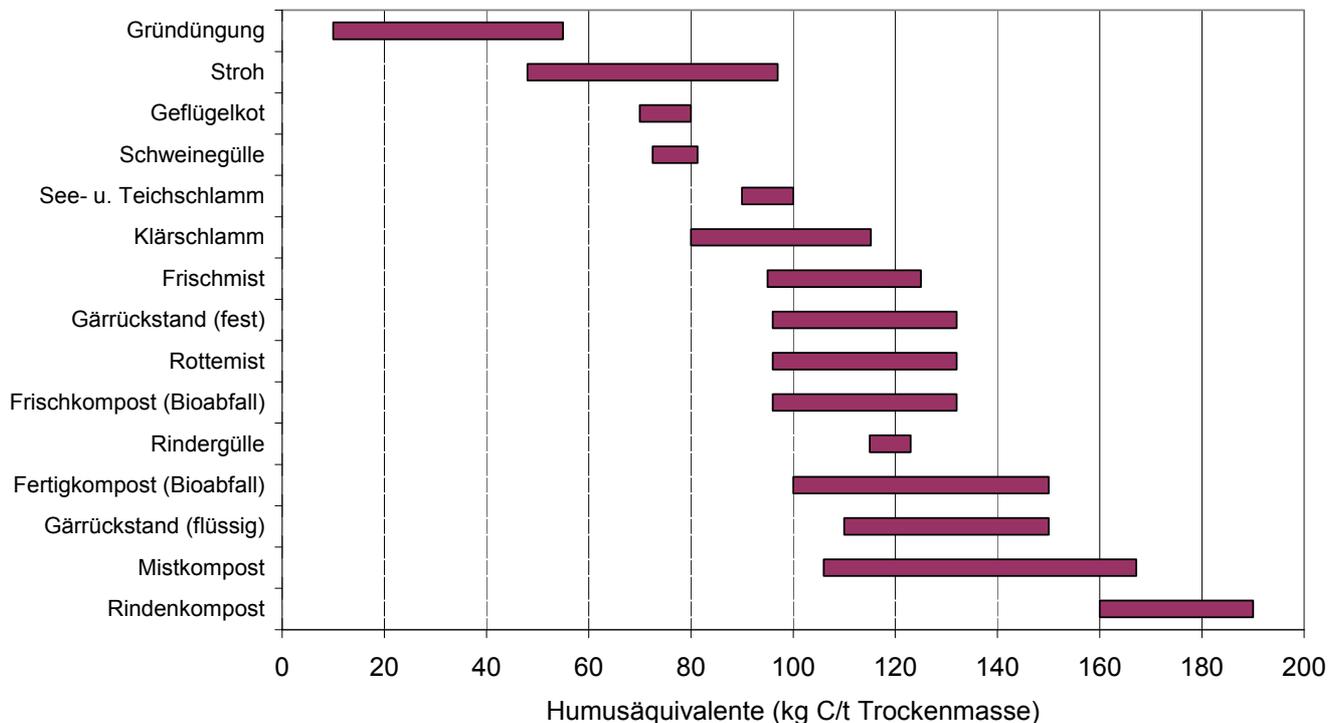
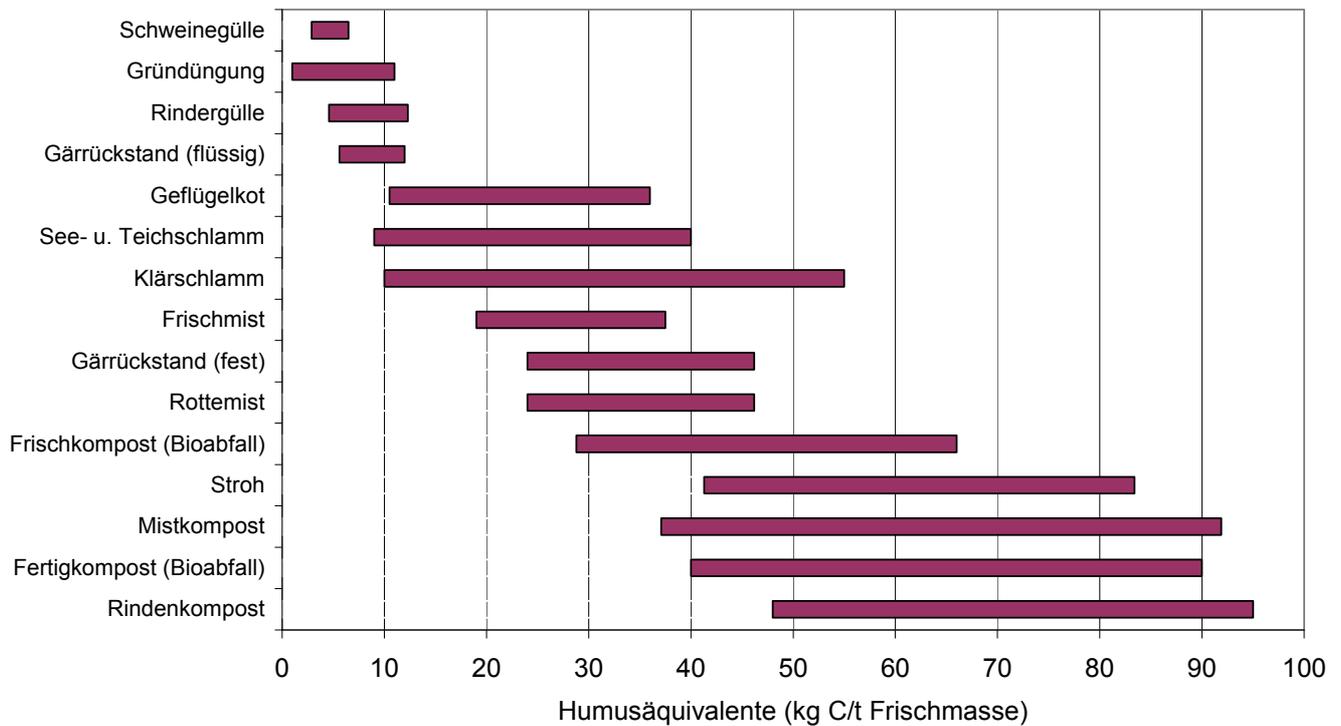


Abbildung 6: Humifizierungskoeffizienten der organischen Materialien in der STAND-Methode, berechnet nach Frischmasse (oben) und Trockenmasse (unten)

Für die Ermittlung der Zusammenhänge zwischen der Zufuhr an organischen Materialien und der Humuswirkung wurden für jede Art die entsprechenden Varianten aus insgesamt 240 Dauerversuchen ausgewählt (siehe Kap. 2.3). Hierzu wurde bei jeder Variante von der Differenz der C_{org} -Gehalte zwischen Versuchsbeginn und -ende jeweils die Wirkung der Standard-Varianten abgezogen, in denen keine Zufuhr an diesen organischen Materialien erfolgte. Danach wurden die erhaltenen C_{org} -Differenzen auf jeweils 1 t TM bezogen und einer steigenden Zufuhr an diesen organischen Materialien gegenübergestellt sowie nach zwei statistischen Methoden ausgewertet (siehe Beispiel Kompost in Abb. 7).

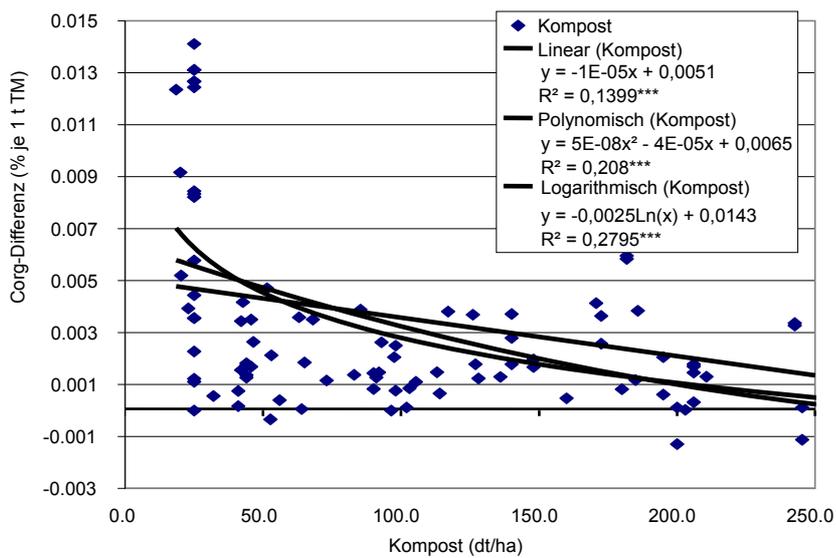
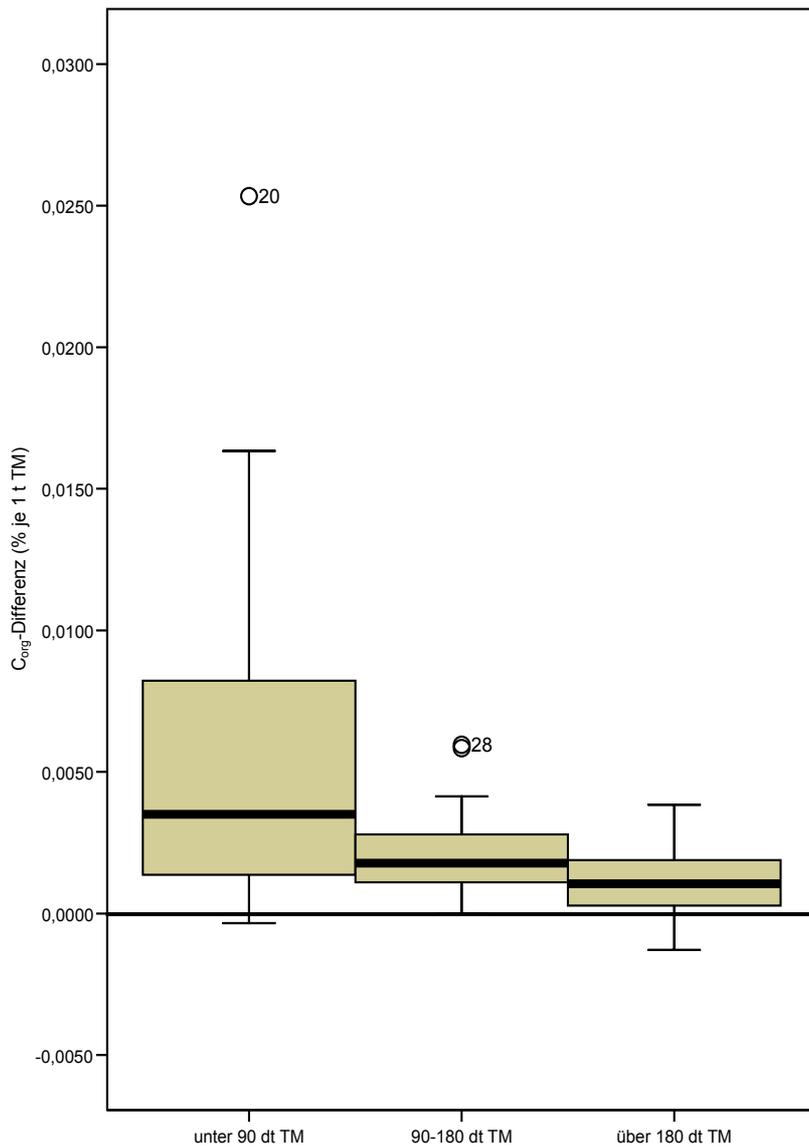


Abbildung 7: Boxplot (oben) bzw. Regression (unten) zum Einfluss der Zufuhrhöhe an Kompost (dt TM/ha und Jahr) auf die Veränderung der C_{org} -Differenzen je 1 t Kompostzufuhr

Ähnlich dem dargestellten Kompost-Beispiel war bei allen untersuchten organischen Materialien im Durchschnitt je zugeführter TM-Einheit eine abnehmende Humusbildung mit steigender Zufuhrhöhe ermittelt worden (siehe frühere Auswertungen bei KOLBE & KÖHLER 2008). Es sollte aber auch auf die sehr hohe Streuung der Werte besonders nach geringen Zufuhrhöhen hingewiesen werden, die im Wesentlichen auf bodenbürtigen und klimatischen Unterschieden in den einzelnen herangezogenen Versuchen beruhen. Auf diese Weise wurden dann die erhaltenen Werte nochmals umgerechnet, damit sie mit den Maßeinheiten, wie sie bei den Bilanzierungsmethoden zum praktischen Einsatz üblich sind, verglichen werden können. Nach Umrechnung dieser Werte (Spez. Gewicht = 1,5; 30 cm Ackerkrume) können in Folge steigender Zufuhrhöhen z. T. deutlich unterschiedlich hohe Reproduktionskoeffizienten für den Kompost berechnet werden (Tab. 4).

Tabelle 4: Ableitung von Reproduktionskoeffizienten für Kompost (55 % TM, Humusäquivalente in kg C/t Kompost-Frischmasse, ermittelt aus 104 Versuchsvarianten mit Kompostdüngung)

	unter 90 dt TM/ha	90-180 dt TM/ha	über 180 dt TM/ha
Regression			
30 cm Ackerkrume	111,3	86,5	37,1
25 cm Ackerkrume	93,8	72,1	30,9
Box-Plot			
30 cm Ackerkrume	124,4	52,9	28,7
25 cm Ackerkrume	103,7	44,1	23,9

In dieser Tabelle wurden entweder entsprechend den Regressionsgleichungen Schätzwerte für drei Zufuhrgruppen zugrunde gelegt oder es wurden Mittelwerte aus den Boxplot-Auswertungen direkt entnommen. Für niedrige Kompostanwendungen liegen diese Werte z. T. deutlich über den Werten, die z. B. bei der VDLUFA-Methode zur Humusbilanzierung (KÖRSCHENS et al. 2004) empfohlen werden. Bei höheren Anwendungsmengen liegen diese Werte dagegen z. T. deutlich unter den Werten der VDLUFA-Methode. Entsprechend den in der Praxis üblichen Anwendungsmengen wurde diese abnehmende Reproduktion bisher lediglich bei der standortangepassten Methode berücksichtigt (KOLBE 2010a).

Bei Stallung treffen die nach geringer Anwendung ermittelten Werte noch ganz gut mit denen in der VDLUFA-Methode hinterlegten Werten überein. Dagegen liegen die nach höherer Stallunganwendung ermittelten Werte deutlich niedriger (Tab. 5). Die berechneten Werte für die Reproduktion von Gülle aus Rinder- und Schweinehaltung zeigen ebenfalls, dass die Werte bei niedrigen Zufuhrmengen durchaus im Bereich der VDLUFA-Methode angesiedelt sind. Weil diese Koeffizienten auch mit steigender Aufwandmenge an Gülle abnehmen, werden offenbar für höhere Aufwandmengen dann zu hohe Koeffizienten unterstellt (Tab. 6).

Tabelle 5: Ableitung von Reproduktionskoeffizienten für Stallung (25 % TM, Humusäquivalente in kg C/t Stallung-Frischmasse, ermittelt aus 471 Varianten mit Stallunganwendung)

	unter 20 dt TM/ha	20-40 dt TM/ha	über 40 dt TM/ha
Regression			
30 cm Ackerkrume	37,1	29,3	19,1
25 cm Ackerkrume	30,9	24,4	15,9
Box-Plot			
30 cm Ackerkrume	40,7	23,7	23,6
25 cm Ackerkrume	33,9	19,8	19,7

Tabelle 6: Ableitung von Reproduktionskoeffizienten für Flüssigmiste (7 % TM, Humusäquivalente in kg C/t Gülle-Frischmasse, ermittelt aus 147 Varianten mit Gülleanwendung)

	unter 20 dt TM/ha	20-40 dt TM/ha	über 40 dt TM/ha
Regression			
30 cm Ackerkrume	11,0	7,9	3,8
25 cm Ackerkrume	9,2	6,6	3,2
Box-Plot			
30 cm Ackerkrume	11,2	8,6	5,1
25 cm Ackerkrume	9,3	7,2	4,3

Im Vergleich zu den Werten der VDLUFA-Methode (80-110 kg C/t Stroh) wird deutlich, dass die Werte für eine Zuführung von Stroh viel zu hoch angesetzt worden sind. Außerdem ist ein abnehmender Trend auch bei diesen Auswertungen in Folge steigender Zufuhrhöhe zu erkennen (Tab. 7). Im Vergleich zu den in der VDLUFA-Methode hinterlegten Werten ist auch für die Gründünger festzustellen, dass deutlich niedrigere Reproduktionskoeffizienten aus den experimentellen Ergebnissen hervorgegangen sind. Auch die Werte für den geringen Anwendungsbereich sind bereits niedriger fixiert worden. Diese Zusammenhänge sind in der standortangepassten Humusbilanzmethode berücksichtigt, sodass deren Werte besser mit den in den Versuchen ermittelten Werten übereinstimmen (Tab. 8).

Tabelle 7: Ableitung von Reproduktionskoeffizienten für Stroh (86 % TM, Humusäquivalente in kg C/t Stroh-Frischmasse, ermittelt aus 245 Varianten mit Strohanwendung)

	unter 21 dt TM/ha	22-43 dt TM/ha	über 43 dt TM/ha
Regression			
30 cm Ackerkrume	77,6	58,2	38,8
25 cm Ackerkrume	64,7	48,5	32,3
Box-Plot			
30 cm Ackerkrume	68,3	56,5	52,5
25 cm Ackerkrume	56,9	47,1	43,7

Tabelle 8: Ableitung von Reproduktionskoeffizienten für Gründünger (15 % TM, Humusäquivalente in kg C/t Gründünger-Frischmasse, ermittelt an 156 Varianten mit Gründüngung)

	unter 10 dt TM/ha	10-20 dt TM/ha	über 20 dt TM/ha
Regression			
30 cm Ackerkrume	8,1	3,4	1,0
25 cm Ackerkrume	6,8	2,8	0,8
Box-Plot			
30 cm Ackerkrume	7,1	3,4	1,9
25 cm Ackerkrume	5,9	2,8	1,6

3.2 Merkmale des Bodens

Die Genauigkeit der aufgeführten Bilanzierungsmethoden ist bereits von verschiedenen Arbeitsgruppen und Autoren an Ergebnissen aus Dauertestflächen und Dauerversuchen aus Mitteleuropa überprüft worden. Eine Zusammenfassung dieser Ergebnisse ist aus Tabelle 9 ersichtlich, in der die mathematisch-statistische Güte zwischen den berechneten Humussalden bzw. den berechneten C_{org} - und N_t -Gehalten und den experimentell ermittelten Merkmalen des Bodens mit Hilfe von Korrelationskoeffizienten bewertet worden ist. Zur Berechnung der Korrelationen sind entweder die durch die Anwendung der Methoden ermittelten Differenzwerte der Humusbilanzierung den in den Versuchen gemessenen Differenzwerten oder die entsprechenden Absolutwerte der Bodenmerkmale verwendet worden.

Die Ergebnisse zeigen zunächst auf, dass die Höhe der Korrelationskoeffizienten von der Güte der Versuchsanstellung überlagert wird. So liegen die Koeffizienten bei Verwendung von Ergebnissen aus Dauertestflächen sowie aus Dauerfeldversuchen mit kurzer Laufzeit z. T. deutlich niedriger als bei Nutzung von Feldexperimenten mit längerer Laufzeit und einer hohen Versuchsgüte. Testflächen der landwirtschaftlichen Praxis sind hiernach wesentlich schlechter für derartige Aufgaben geeignet als Dauerfeldversuche. Die Ursache liegt in einer unsicheren Datenerfassung und Datenqualität, wodurch eine deutliche Zunahme der Versuchsstreuung verursacht wird. Das trifft besonders für experimentell ermittelte Merkmale zu, für die erfahrungsgemäß eine lange (über 10-jährige) Versuchszeit vorliegen muss, bevor statistisch gesicherte Unterschiede zwischen den geprüften Varianten in Erscheinung treten. Hierzu zählen vor allen Dingen die zur Beurteilung der Humusversorgung wichtigen Merkmale wie C_{org} - und N_t -Gehalte des Bodens.

Eine unzulängliche Versuchsbasis kann daher auch daran erkannt werden, dass zu diesen Merkmalen verhältnismäßig niedrige Korrelationen berechnet werden (siehe Arbeiten von BROCK et al., 2008; BROCK 2009; Tab. 9). Zu Merkmalen wie der mikrobiellen Biomasse (C_{mik}) oder dem heißwasserlöslichen Kohlenstoff (C_{hwl}) und verschiedenen Enzymaktivitäten des Bodens, die für die Gesamtbeurteilung des Umsatzes und der Entwicklung der Humusgehalte auf lange Sicht nicht so wichtig sind, werden höhere Korrelationen gefunden, weil diese Merkmale direkt und schneller auf unterschiedliche Bewirtschaftungsmaßnahmen reagieren (siehe auch OVERESCH 2007).

Darüber hinaus sind deutliche Methodenunterschiede in der Übereinstimmung zwischen den Berechnungsergebnissen und den Versuchsdaten zu erkennen (Tab. 9). Die mit Abstand niedrigste Anpassung an die experimentell ermittelten Daten wurde mit dem neuen HUMOD-Verfahren ermittelt. Dieses Verfahren ist als eine Weiterentwicklung des REPRO-dyn-Verfahrens anzusehen, das seinerseits durch die zweitschlechtesten Korrelationen gekennzeichnet ist. Zudem ist die Versuchsbasis dieser Verfahren bisher als äußerst schwach anzusehen. Im Wesentlichen wurden nur einige wenige exemplarische Versuche verwendet. Geeignete Humusbilanzverfahren als Ausgangsbasis für Modelloptimierungen standen zur Verfügung. So wurden auch in den Arbeiten von BROCK et al. (2008) und BROCK (2009) ansteigende Korrelationen zwischen den Modellwerten und den Felddaten über REPRO-stat, LUFA obere Werte bis zu dem LUFA-Verfahren untere Werte berechnet (siehe Tab. 9). Diese relative Vorzüglichkeit der unteren Werte LUFA wurde bereits von KOLBE & PRUTZER (2004) ermittelt.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen den oberen Werten LUFA und dem REPRO-stat-Verfahren besteht in der Verwendung differenzierterer Koeffizienten (höhere positive und negative Werte) für die Fruchtarten als bei den unteren Werten des LUFA-Verfahrens. Darüber hinaus werden beim REPRO-stat-Verfahren für die Bedingungen des Ökolandbaus die nochmals deutlich extremeren Fruchtartenkoeffizienten nach LEITHOLD et al. (1997) verwendet. Offensichtlich sind diese Koeffizienten in geringerem Maße an die landwirtschaftliche Realität angepasst und es kommt zu einer Abnahme der statistischen Sicherheit. Je extremer die Koeffizienten veranschlagt worden sind, um so ungenauer waren die Ergebnisse (vgl. Kap. 3.1).

Tabelle 9: Korrelationskoeffizienten (r) zwischen Ergebnissen von Humusbilanzmethoden und experimentell ermittelten Merkmalen des Bodens von Dauertestflächen und Dauerfeldversuchen des Ackerlandes

Methoden-Name	Literaturquelle	Merkmal ³⁾	BROCK et al. (2008) ⁴⁾	BROCK et al. (2008) ⁴⁾	BROCK (2009) ⁴⁾	KOLBE & PRUTZER (2004), FRANKO et al. (in Vorber.) ¹⁾
HUMOD	BROCK et al. (2008, 2012)	MW	-	0,210	0,400	-
		C _{org}		-0,01	0,02	
		N _t		0,16	0,51	
		C _{hwl}		0,24	0,61	
		C _{mik}		0,46	0,64	
		EA		0,20	0,22	
REPRO-dyn	HÜLSBERGEN (2003)	MW	0,388	0,394	-	-
		C _{org}	0,24	0,14		
		N _t	0,29	0,44		
		C _{hwl}	0,38	0,39		
		C _{mik}	0,64	0,61		
		EA	0,39	0,39		
REPRO-stat	LEITHOLD et al. (1997)	MW	0,416	0,428	0,460	0,460***
		C _{org}	0,25	0,12	-0,03	0,542***
		N _t	0,29	0,43	0,54	0,378***
		C _{hwl}	0,38	0,46	0,68	
		C _{mik}	0,70	0,66	0,76	
		EA	0,46	0,47	0,35	
LUFA obere Werte	KÖRSCHENS et al. (2004)	MW	0,458	0,438	0,454	0,533***
		C _{org}	0,33	0,17	-0,01	0,577***
		N _t	0,35	0,43	0,57	0,488***
		C _{hwl}	0,40	0,45	0,72	
		C _{mik}	0,71	0,66	0,75	
		EA	0,50	0,48	0,24	
LUFA untere W., CC	KÖRSCHENS et al. (2004)	MW	0,488	0,442	0,462	0,554***
		C _{org}	0,36	0,18	0,02	0,594***
		N _t	0,39	0,44	0,57	0,513***
		C _{hwl}	0,43	0,46	0,72	
		C _{mik}	0,73	0,67	0,74	
		EA	0,53	0,46	0,26	
CCB ¹⁾	FRANKO et al. (in Vorbereitung)	MW	-	-	-	0,552***
		C _{org}				0,737***
		N _t				0,366***
		N _t ²⁾				0,395***
STAND	KOLBE (2007b, 2010a)	MW	-	-	-	0,642***
		C _{org}				0,744***
		N _t				0,539***
REGRESS	KOLBE (2009b)	MW ²⁾				0,836***
		C _{org} ²⁾				0,55 – 0,94***
		N _t ²⁾				0,71 – 0,85***
Datenquelle			Praxis- u. DT-Flächen	Praxis- u. DT-Flächen	10 Dauer- versuche	39 bzw. 65 ¹⁾ Dauerversuche
Datenqualität (u. a. Versuchsanteil über 10 Jahre in %)			Eignung fraglich (hohe Streuung, kurze Laufzeit)	Eignung fraglich (hohe Streuung, kurze Laufzeit)	20	97; 92 ¹⁾

¹⁾ FRANKO et al. (in Vorbereitung): Korrelationen ermittelt anhand von 65 Dauerversuchen mit einem Laufzeitanteil von über 10 Jahren von 92 %

²⁾ Korrelationen zwischen experimentell ermittelten und berechneten N_t- und C_{org}-Gehalten bzw. N_t- und C_{org}-Differenzen

³⁾ MW = Mittelwert; C_{org} = organ. gebundener Kohlenstoff (C); N_t = Gesamt-N; C_{hwl} = C heißwasserlöslich; C_{mik} = mikrobielle Biomasse; EA = Enzymaktivität (β-Glucosidase, Katalase)

⁴⁾ ohne Ausweisung des Signifikanzniveaus

Das Verfahren untere Werte LUFA ist bereits auf einer Basis von ca. 20 Dauerversuchen aus dem ostdeutschen Raum erstellt worden (vgl. ENGELS et al. 2010), was zu einer mittleren Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Ergebnissen geführt hat (Tab. 9). Daher wurden die LUFA untere Werte in den eigenen Arbeiten als Ausgangsverfahren für eine Modellverbesserung ausgewählt. Durch Integration der Haupteinflussgrößen des Humusumsatzes (Boden- und Klimafaktoren) und Nutzung einer erweiterten Versuchsbasis von 39 Dauerversuchen (Beschreibung in KOLBE 2005) ist es dann gelungen, eine deutliche Verbesserung der Übereinstimmung der Berechnungsergebnisse mit den experimentell ermittelten Daten durch das STAND-Verfahren zu erbringen (Tab. 9, Abb. 8).

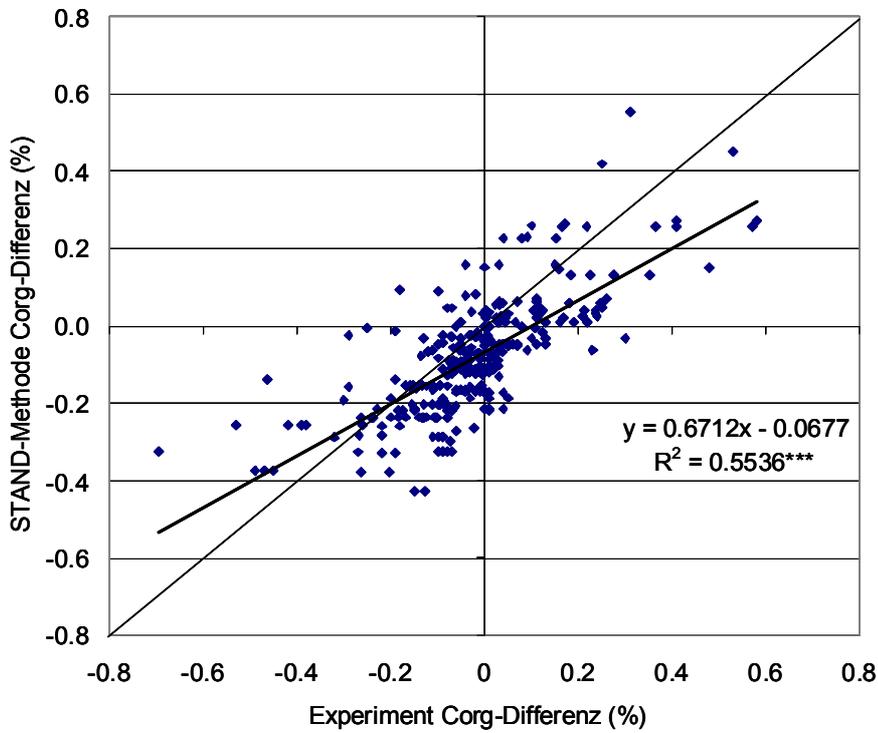


Abbildung 8: Beziehung zwischen den experimentell ermittelten C_{org} -Differenzen der Dauerversuche und den mit der STAND-Methode berechneten Werten, ermittelt anhand von Ergebnissen aus 39 Dauerversuchen

Zunächst war auch mit dem CCB-Verfahren eine erhebliche Streuung der Werte verbunden (siehe KOLBE & PRUTZER 2004). Durch Heranziehung neuer Gesichtspunkte und Erkenntnisse der Bodenforschung und Nutzung einer nochmals erweiterten Anzahl an Dauerversuchen mit hoher Versuchsgüte ist eine Verbesserung erreicht worden. Auch dieses relativ komplexe Verfahren, das zum Einsatz in der Praxis vorgesehen ist, weist jetzt deutlich höhere Korrelationen zwischen berechneten und gemessenen C_{org} -Werten auf, als das vergleichsweise einfache LUFA-Verfahren untere Werte.

Zum Erstellen des REGRESS-Verfahrens wurden Ergebnisse aus 240 Dauerversuchen genutzt. Die Gegenüberstellung mit Ergebnissen aus 39 Dauerversuchen in Tabelle 9 zeigt auf, dass eine hohe Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Werten ermittelt wurde. Dieses Verfahren ist jedoch nicht zur direkten Anwendung in der landwirtschaftlichen Praxis vorgesehen, dazu sind einige Faktoren der Bewirtschaftung (z. B. die Fruchtarten) zu wenig ausdifferenziert worden. Bei dieser Methode stehen andere Fragestellungen im Vordergrund, wie z. B. die Berechnung von regionsdifferenzierten standort- und bewirtschaftungstypischen C_{org} - und N_T -Gehalten des Bodens. Weitere Fragestellungen sind vergleichende Berechnungen zur Wirkung von Klima- und Bodeneigenschaften sowie von verschiedenen Arten organischer Düngemittel (Kompost, Stalldung, Gülle, Stroh, Gründüngung). Eine Eignung verschiedener Methoden der Humusbilanzierung unter Einbeziehung von Gesichtspunkten des Klimawandels wurde bei KOLBE (2009b) vorgestellt.

In einer weiteren Arbeit wurden die LUFA-Verfahren und die STAND-Methode näher miteinander verglichen (Abb. 9). Hierbei sind die Schwankungsbreiten und die mittleren Abweichungen zwischen berechneten Werten und gemessenen C_{org} -Gehalten aus 39 Dauerversuchen grafisch dargestellt, nachdem die Versuche in sechs Standortgruppen aufgegliedert worden sind (vgl. Tab. 2). Je größer die Abweichung zu den Ergebnissen der Dauerversuche (= Nulllinie) ist, umso ungenauer ist die Methode. Im

Idealfall sollten jeweils nur geringfügig positive Werte vorliegen, damit gewährleistet werden kann, dass bei einem ausgeglichenen Humussaldo mit hoher Wahrscheinlichkeit die Humusgehalte des Bodens mindestens gleich hoch bleiben.

Je nach eingesetzter Methode werden ganz verschiedene Ergebnisse erlangt. Mit den oberen Werten der Fruchtartenkoeffizienten der LUFA-Methode sind die größten Abweichungen ermittelt worden. Bei hoher Schwankungsbreite werden im Vergleich zu den Werten der Dauerversuche je nach Standort von -0,10 % bis +0,45 % C_{org} höhere C_{org} -Gehalte erzielt ($s = 0,191$). Beim Einsatz der oberen Werte erfolgt somit im Durchschnitt eine z. T. deutlich erweiterte Reproduktion der Humusversorgung. Entsprechend den Ergebnissen von Tabelle 9 werden mit den REPRO-basierten Verfahren im Vergleich zu den oberen LUFA-Werten noch extremere Ergebnisse ermittelt. So liegen die nach der REPRO-stat-Methode berechneten Durchschnittswerte bei Zunahme der Streuung nochmals um durchschnittlich 0,15 % C_{org} höher als die oberen Werte LUFA. Insgesamt werden dann fast 0,30 % C_{org} höhere Werte ermittelt als in den Dauerversuchen (KOLBE & PRUTZER 2004; KOLBE & KÖHLER 2008).

Beim Einsatz der unteren Werte der LUFA-Methode wird dagegen im Durchschnitt zwar in etwa eine einfache Reproduktion angestrebt (Abb. 9). Es bestehen jedoch auch hier deutliche Unterschiede in der Genauigkeit. Je nach Standort können von einem ausgeglichenen Humussaldo sowohl ein Anstieg der C_{org} -Gehalte von bis zu 0,30 % als auch ein Abfall von bis zu 0,20 % C_{org} erreicht werden ($s = 0,184$). Bei Zugrundelegung eines bestimmten Saldos können somit die Humusgehalte ansteigen, gleich hoch bleiben oder sogar absinken. Die Ergebnisse der VDLUFA-Methode stellen daher nur eine grobe Orientierungsgröße dar.

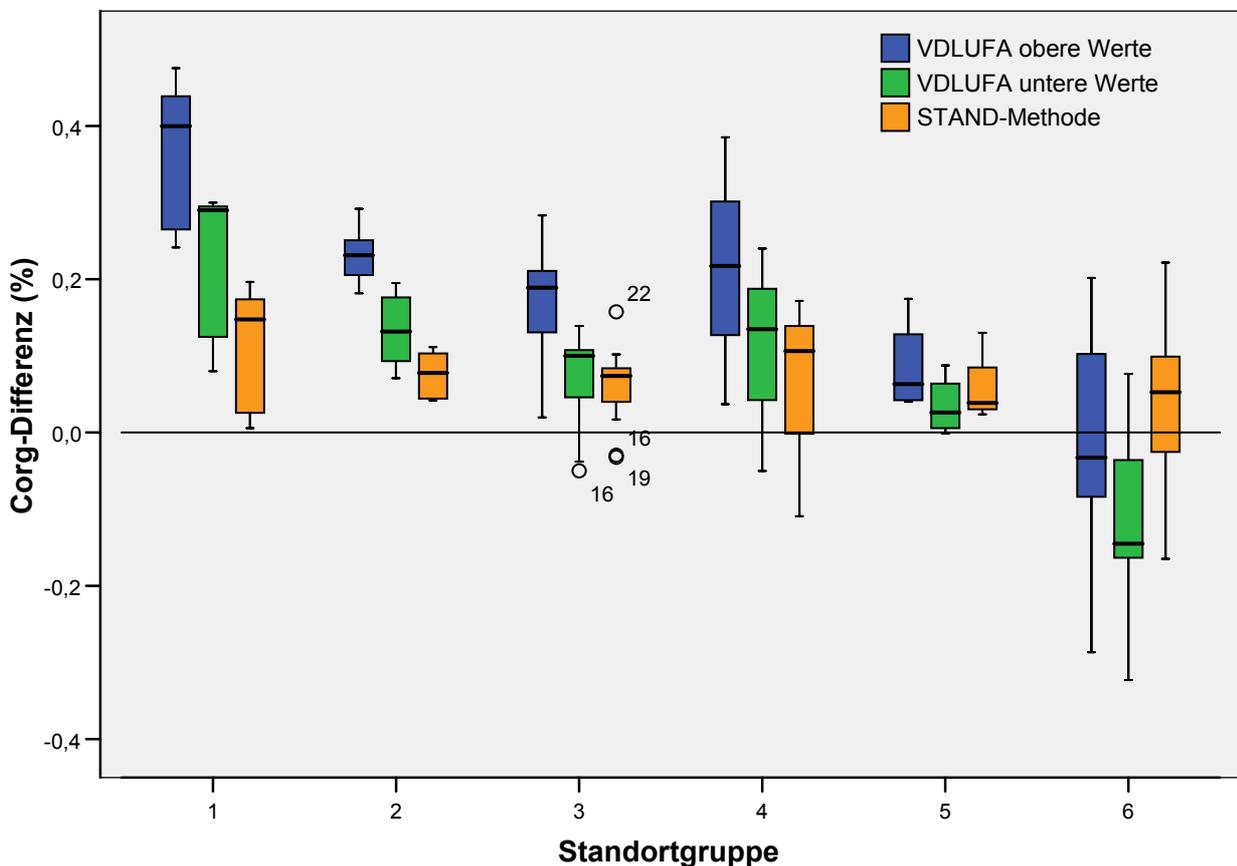


Abbildung 9: Vergleich von berechneten C_{org} -Differenzen mit den oberen und unteren Werten der LUFA- und der STAND-Methode mit C_{org} -Werten der Dauerversuche: Je größer die Abweichung zu Ergebnissen aus Dauerversuchen (Nulllinie = 100%ige Übereinstimmung), umso ungenauer ist die Methode

Mit der STAND-Methode wird eine genauere Abschätzung des Versorgungsgrades mit organischer Substanz erlangt (Schwankungsbreite ca. $-0,05$ bis $+0,20$ % C_{org} ; $s = 0,110$), die auch eine Aussage über die zu erwartenden Auswirkungen auf die Humusgehalte des Bodens erlaubt. Die Ergebnisse der Methode sind so geeicht, dass bei durchschnittlichen Ausgangsbedingungen ein ausgeglichener Saldo mit hoher Wahrscheinlichkeit auch im Boden zu keiner Veränderung der Humusgehalte führt (Tab. 9, Abb. 9).

3.3 Ertragssicherung

Entsprechend der eigenen Vorgehensweise (KOLBE & PRUTZER 2004) haben auch z. B. JOSCHKO et al. (2007) oder BROCK et al. (2008) an Stelle des Ertrages als Zielgrößen die Merkmale C_{org} oder N_t sowie andere Merkmale des Bodens (C_{hwl} , C_{mik} , Aktivitäten von Enzymen) ausgewählt. Von diesen Autoren werden auch die Anfangs- und Endwerte der C_{org} -Gehalte der Dauerversuche mit den Ergebnissen der Humusbilanzierung in Relation gesetzt (vgl. Kap. 3.2). Insbesondere bei dem LUFA-Verfahren wird jedoch oftmals als Ziel der Bilanzierung die Erreichung eines mehr oder weniger optimalen Ertrages der Fruchtarten angesehen (KÖRSCHENS et al. 2004). Ein experimenteller Beweis mit genügend hoher statistischer Güte der Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der Humusbilanzierung und diesem Zielmerkmal ist jedoch bis heute nicht erstellt worden (siehe ENGELS et al. 2010). Auf Grund der Ermangelung an Versuchsergebnissen sollen daher in diesem Kapitel die Relationen zwischen den Erträgen der Fruchtarten und den Ergebnissen der Humusbilanzmethoden näher untersucht werden.

3.3.1 Ertragsniveau der Dauerversuche im Vergleich zur landwirtschaftlichen Praxis heute

Zunächst wurde eine Verteilungsstatistik über die real erzielten Erträge der wichtigsten Fruchtarten in den Dauerversuchen erstellt (Tab. 10). Entsprechend den extrem unterschiedlichen Variantenausprägungen wurde auch ein sehr breites Spektrum an Erträgen für die einzelnen Fruchtarten ermittelt. In den Versuchen befinden sich Varianten mit dauerhafter Unterernährung (ohne Düngung) bis hin zu permanenter Überdüngung insbesondere auch mit Stickstoff. In einem zweiten Schritt werden diese Versuchserträge mit dem in der konventionellen und ökologischen Praxis in Sachsen vorherrschenden Ertragsniveau verglichen.

Es ist zu erkennen, dass im Durchschnitt die Versuchsdaten das Ertragsniveau der Praxis recht gut widerspiegeln. Insgesamt werden oft nur unwesentlich niedrigere Erträge als in der Praxis ermittelt. Das liegt daran, dass in vielen Versuchen aus den letzten Jahrzehnten auch Düngungsvarianten etabliert worden sind, die durchaus mit dem heutigen Niveau des konventionellen Landbaus vergleichbar sind. Die Ansicht, dass das Ertragsniveau der Fruchtarten der Dauerversuche kaum mit der heutigen Situation vergleichbar ist, trifft also nur teilweise zu. Im Wesentlichen gibt es zwischen dem mittleren Niveau und der Streubreite der Düngung und der Erträge aus den hier verwendeten Dauerversuchen und der landwirtschaftlichen Praxis eine hohe Übereinstimmung, was als gute Voraussetzung für die Modellarbeiten gewertet werden kann.

Tabelle 10: Überblick über die Erträge der Fruchtarten (dt FM/ha) ermittelt aus 39 Dauerversuchen im Vergleich zum Ertragsniveau auf D-, V- und Lö-Standorten der konventionellen und ökologischen landwirtschaftlichen Praxis in Sachsen (um das Jahr 2000 nach KOLBE 2009b)

Fruchtarten: ¹⁾	WW	WR	WG	SG	SW	HA	KA	ZR	FR	SM	KG
Leichte Böden (S, SI)											
MW	47,4	44,9		30,2	26,3	37,8	314,6	489,8	780,0	319,9	
S	8,75	10,42		10,33	2,53	13,25	43,57	57,58	281,43	32,87	
MIN	13	16		8	13	14	103	197	433	137	
MAX	68	61		45	31	49	416	616	979	404	
N	68	70		74	22	9	92	60	2	53	
Mittlere Böden (IS, sL)											
MW	56,7	49,3	46,6	41,5		55,0	282,0	489,4		367,2	342,7
S	14,01	9,20	14,05	10,81		1,00	44,36	75,82		52,20	90,71
MIN	19,1	22	27	15		54	95	256		294	144
MAX	77	65	61	52		56	488	649		445	686
N	48	16	10	13		3	41	30		5	15
Schwere Böden (L, IT, T)											
MW	63,7	48,5	46,7	49,3	33,3	35,0	362,2	525,8	460,8	585,5	613,3
S	17,78		12,85	47,14	4,67	9,71	54,62	106,91	12,28	79,04	43,22
MIN	22	48,5	21	19	25	21	95	233	363	294	412
MAX	96	48,5	69	63	42	51	537	682	475	701	750
N	91	1	60	26	11	7	36	56	4	40	13
Vergleichserträge in Sachsen (konventionell)											
D	60	44	54	42			380	528		375	333
V	62	51	57	47			390			415	494
Lö	72	63	68	50			388	568		450	472
Vergleichserträge in Sachsen (ökologisch)											
D	34	25	27	24			205	475		281	316
Lö	43	37	36	30			210	540		351	472

¹⁾ Fruchtarten: WW = W.-Weizen; WR = W.-Roggen; WG = W.-Gerste; SG = S.-Gerste; SW = S.-Weizen; HA = Hafer; KA = Kartoffeln; ZR = Zuckerrüben; FR = Futterrüben; SM = Silomais; KG = Klee gras
 MW = Mittelwert; S = Standardabweichung; MIN = Minimum; MAX = Maximum; N = Anzahl

3.3.2 Beziehung zwischen Humussaldo und Fruchtartenertrag

Beim Aufbau des A-E-Bewertungsschlüssels des VDLUFA im Bereich der Grunddüngung und Kalkung werden seit langer Zeit aus Ergebnissen von entsprechenden Düngungssteigerungsversuchen mit Erfolg die Gehalte des Bodens an pflanzenverfügbaren Nährstoffen den Ertragsdifferenzen der Fruchtarten zwischen keiner Düngung (Standard) und einer unterschiedlich hohen Zufuhr mit den zu prüfenden Düngemitteln gegenübergestellt (siehe u. a. Arbeiten zur P- und K-Düngung von SCHACHTSCHABEL et al. 1976).

In Anlehnung an diese Auswertungen wurden die entsprechenden Ergebnisse der durchschnittlichen Fruchtartenerträge der Dauerversuche den Ergebnissen der Humusbilanzierung gegenübergestellt. Auf der Basis jeweils unterschiedlich hoher berechneter Standard-Versorgungszustände an Humusäquivalenten der Versuchsvarianten (mindestens eine Differenz von 50 kg C/ha zwischen jeweils zwei zu vergleichenden Varianten) wurden die durchschnittlichen Ertragsdifferenzen für die Fruchtarten zwischen den Varianten mit jeweils niedrigerem Versorgungsniveau und den Varianten mit entsprechend höherem Niveau bei zusätzlichen Bewirtschaftungsmaßnahmen (Düngung, Fruchtfolge) ermittelt. Auf diese Weise wurden aus den 39 Dauerversuchen über 1.000 Ertragsvergleiche bei unterschiedlich hohem Versorgungsniveau mit organischer Substanz berechnet.

In Abbildung 10 sind diese nach Fruchtartengruppen aufgegliederten Ertragsdifferenzen in Abhängigkeit von den berechneten Humusbilanzen am Beispiel der STAND-Methode dargestellt worden. Die Schwankungsbreite der ermittelten Ertragsdifferenzen ist erheblich. Sie kann im Maximum auch 300 % des Ertrages der jeweiligen Standard-Variante betragen, wenn ein hoher Fehlbedarf an organischer Substanz vorliegt (hohe negative Beträge an HÄQ).

Bei hohen Fehlbeiträgen an organischer Substanz (unter -200 kg C/ha) kann es durch Bewirtschaftungsmaßnahmen, die eine Verbesserung des Versorgungsniveaus mit organischer Substanz bewirken (organische Düngung, Fruchtfolge-Zusammensetzung), zu einer deutlichen Anhebung der Erträge aller Fruchtarten kommen. Am meisten profitieren von diesen besseren Bedingungen die Gemüsearten sowie Feldgras und Leguminosen- bzw. Nichtleguminosen-Gemenge. Es folgen die Hackfrüchte (inkl. Mais) und am geringsten vorteilhaft wirkt eine höhere Versorgung mit organischer Substanz auf die Getreidearten. Die Differenzen zwischen diesen Fruchtartengruppen sind aber nicht sehr deutlich ausgeprägt (Abb. 10).

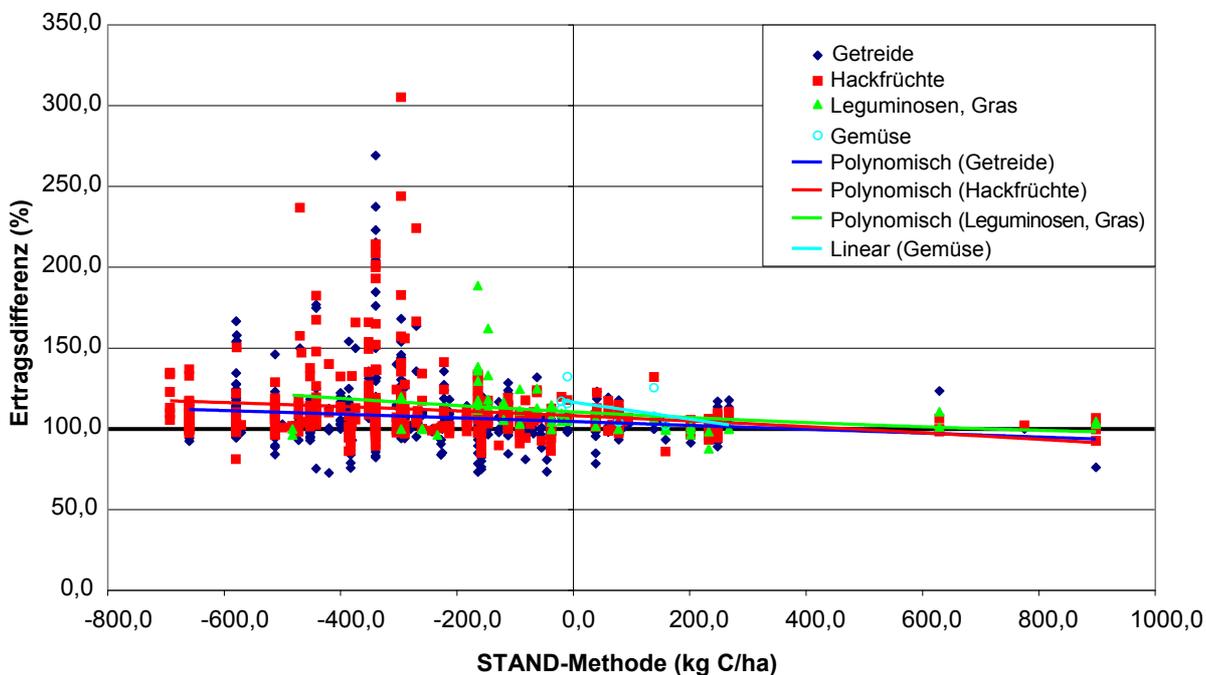


Abbildung 10: Einfluss unterschiedlicher Versorgungsniveaus (Standard) mit organischer Substanz, berechnet mit Hilfe der STAND-Methode auf die mittlere Ertragsdifferenz der Fruchtarten, jeweils ermittelt nach einer zusätzlichen Zufuhr an organischer Substanz, aufgegliedert nach Fruchtarten-Gruppen aus 39 Dauerversuchen

Die durchschnittliche Schwankung der Werte in dem Bereich, in dem keine Ertragseffekte mehr festzustellen sind (hohe positive Beträge an HÄQ) liegt bei $\pm 15 - 20$ % Ertragsdifferenz. Diese Fehlerschwankung liegt damit z. T. etwas über den Werten, die z. B. bei der Grunddüngung mit P- und K-Düngemitteln ermittelt werden (vgl. SCHACHTSCHABEL et al. 1976; KOLBE 2010b), möglicherweise, weil die mit den Bewirtschaftungsmaßnahmen zugeführte organische Substanz eine sehr heterogene Zusammensetzung und Wirkung nach sich ziehen kann. So wird in den meisten Versuchen bei Zuführung von Getreidestroh mit und ohne N-Ausgleichsdüngung oft auch von nur geringen positiven bis z. T. deutlich negativen Wirkungen auf die Erträge berichtet (Literatur über Dauerversuche zu diesem Thema in KOLBE 2005).

3.3.2.1 Konventioneller Landbau

Für die Bewertung von Anbausystemen des konventionellen Landbaus wurden Ergebnisse über den Einfluss der Humusbilanzierung auf die Erträge der Fruchtarten für drei verschiedene Bilanzierungsmethoden erstellt (Abb. 11). Zunächst ist zu erkennen, dass mit den Methoden unterschiedliche Bandbreiten an Humusäquivalenten ermittelt werden:

■ LUFA obere Werte	-1.040 kg C/ha bis	+1.116 kg C/ha (Bandbreite = 2.156 kg C/ha)
■ LUFA untere Werte	-694 kg C/ha bis	+1.376 kg C/ha (Bandbreite = 2.070 kg C/ha)
■ STAND-Methode	-693 kg C/ha bis	+ 898 kg C/ha (Bandbreite = 1.591 kg C/ha).

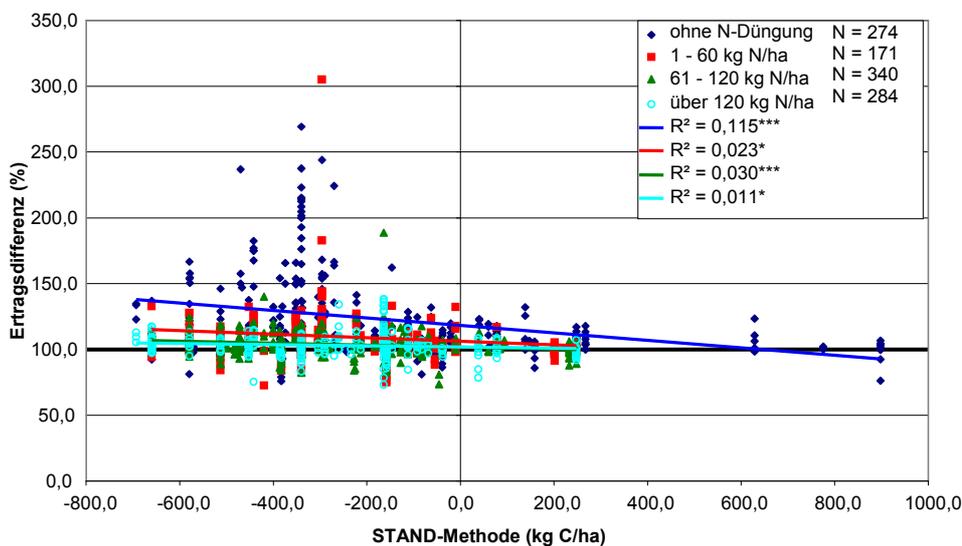
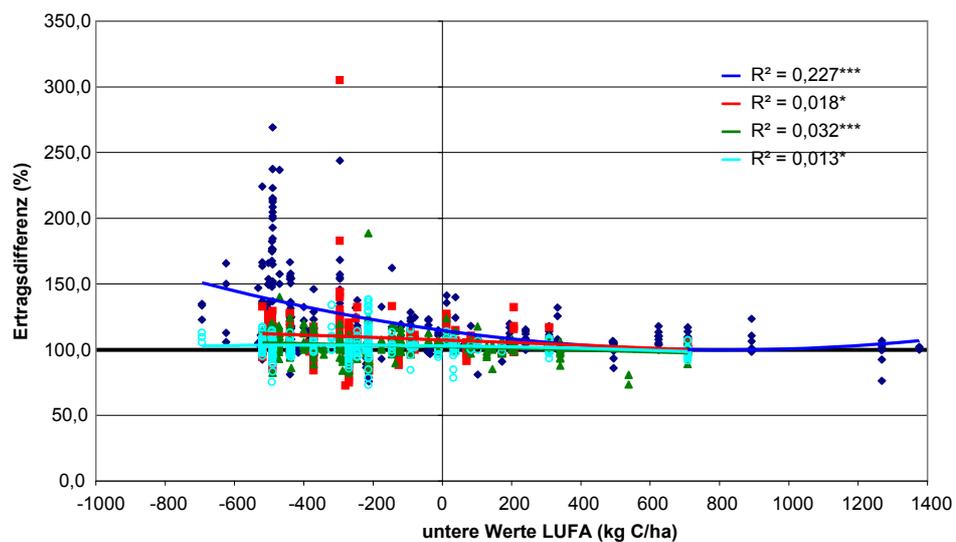
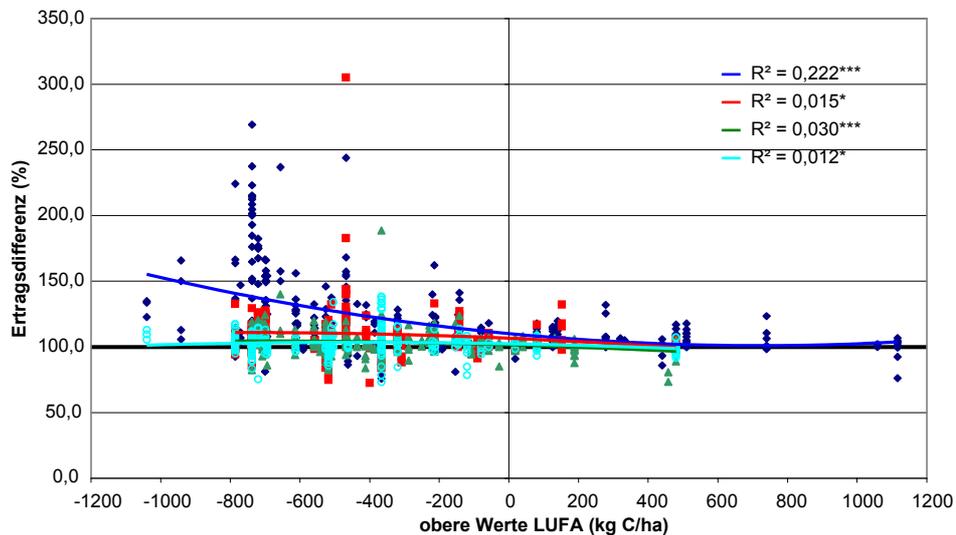


Abbildung 11: Einfluss unterschiedlicher Versorgungsniveaus (Standard) mit organischer Substanz entsprechend den oberen (oben) und unteren Werten (Mitte) der LUFA-Methode sowie der STAND-Methode (unten) auf die mittlere Ertragsdifferenz der Fruchtarten, jeweils ermittelt nach einer zusätzlichen Zufuhr an organischer Substanz in Abhängigkeit von dem N-Düngungsniveau aus 39 Dauerversuchen (A- bis E-Grenzen der Versorgungsgruppen siehe Abb. 3)

Im Vergleich zu dem Bewertungsschlüssel, der lediglich eine Bandbreite von unter -200 bis über +300 kg C/ha einer näheren Betrachtung unterzieht, werden mit den LUFA-Methoden deutlich breitere Spektren sowohl im negativen als auch im positiven Bewertungsbereich ermittelt als mit der STAND-Methode. Diese Spannbreite ist von Bedeutung für Methoden, bei denen eine Umrechnung der Saldoergebnisse in Boden-Gehalte vorgenommen werden kann, wie z. B. bei der standortangepassten Methode (siehe Kap. 4). So entspricht die Spannbreite dieser Methode von 1.591 kg C/ha ungefähr einer maximalen Veränderung der C_{org} -Gehalte durch landwirtschaftliche Maßnahmen nach langer Zeit von 0,90 % C_{org} , während es bei den unteren Werten ca. 1,17 % C_{org} und bei den oberen Werten der LUFA-Methode bereits 1,23 % C_{org} sind. Die durchschnittliche Differenz zwischen den größten negativen und größten positiven C_{org} -Differenzen betrug in den Dauerversuchen um 0,93 % (N = 10) bis 1,01 % C_{org} (N = 5). Die STAND-Methode bildet die Bandbreite der experimentellen Werte daher besser ab als die LUFA-Methode.

Außerdem ist aus Abbildung 11 zu erkennen, dass die Ertragsreaktion in stärkerem Maße abhängig ist von dem Niveau der N-Mineraldüngung. Die Varianten ohne N-Düngung profitieren in den Dauerversuchen am deutlichsten von einer zusätzlichen Zufuhr an organischer Substanz, insbesondere dann, wenn eine relative Unterversorgung vorliegt (Versorgungsgruppen A und teilweise Gruppe B, vgl. Abb. 3). Mit steigender N-Düngung nimmt diese Vorzüglichkeit der organischen Substanz immer mehr ab. Bei hoher mineralischer N-Düngung (120-240 kg N/ha) ist selbst bei starker Unterversorgung kaum noch eine Ertragswirkung durch eine zusätzliche Zufuhr von organischer Substanz zu erkennen. Es besteht also eine starke Wechselwirkung zwischen der N-Düngung und der organischen Substanzzufuhr auf die Differenz der Fruchtartenerträge bei Vorlage einer deutlichen Unterversorgung mit organischer Substanz.

Im Versorgungsbereich A des VDLUFA-Bewertungssystems werden bei allen Methoden deutliche Ertragsreaktionen ermittelt (Abb. 11, Tab. 11). Im Bereich der Gruppe B (-200 bis -75 kg C/ha) liegen die Ertragsreaktionen bei allen Methoden schon niedriger, außer bei den oberen Werten der LUFA-Methode, die in diesem Bereich bereits durch deutlich niedrigere Ertragsdifferenzen gekennzeichnet ist. Im bestimmten Umfang können diese Werte schon zu einem optimalen Ertragsbereich gezählt werden.

Als ordnungsgemäße Bewirtschaftung gilt es, die Versorgungsgruppe C (-75 bis +100 kg C/ha) anzustreben. In diesem Bereich werden von allen Methoden im Prinzip nur noch geringe Ertragsreaktionen ermittelt. Im Detail gibt es jedoch auch hier noch Unterschiede zwischen den getesteten Methoden. Insbesondere im Vergleich zu den oberen Werten der LUFA-Methode weist die standortangepasste Methode deutlich geringere Varianten-Anzahlen den extremen Versorgungsgruppen A und E zu, während die anderen Gruppen B und C bei dieser Methode z. T. deutlich stärker repräsentiert sind. Dieses Ergebnis kann damit interpretiert werden, dass durch die bessere Standortanpassung (Boden, Klima) eine Zuordnung zu durchschnittlichen Werten stärker ausgeprägt ist, während bei den anderen Methoden diese Werte dann bereits extremeren Bedingungen zugeordnet werden (Abb. 11, Tab. 11).

Aus den in Tabelle 11 dargelegten Ergebnissen der relativen Ertragsreaktionen (Standardabweichung, Mittelwert, durchschnittlicher Maximalwert) kann folgende Interpretation abgeleitet werden. In der anzustrebenden Versorgungsgruppe C werden mit den oberen Werten der LUFA-Methode Ergebnisse ermittelt, die z. T. deutlich näher an den maximal möglichen Erträgen der zutreffenden Varianten der Dauerversuche liegen als mit den beiden anderen Verfahren. Die Standardabweichung nimmt bei diesem Versorgungsgrad der Gruppe C bei Anwendung der oberen Werte bereits minimale Werte an, wie sie auch bei höherem Versorgungsgrad in Gruppen D und E vorzufinden sind. Ebenso werden bei dieser Methode in Versorgungsgruppe C bereits minimale Mittelwerte gefunden und die maximalen Werte liegen mit 118 % annähernd bereits im Schwankungsbereich der gesamten Versuche, wenn keine Ertragsreaktionen mehr zu verzeichnen sind (s. oben).

Bei den unteren Werten der LUFA-Methode sowie auch bei der STAND-Methode werden im Bereich der Versorgungsgruppe C noch nicht die niedrigsten Werte dieser drei Parameter gefunden. Aus diesen Ergebnissen geht hervor, dass nach einer zusätzlichen Zufuhr an organischer Substanz im Bereich der Versorgungsgruppe D es noch zu einem weiteren, allerdings nur schwach ausgeprägten Ertragsanstieg kommen kann. Daher kann diesen Methoden eher die Fähigkeit zugesprochen werden, einen optimalen Ertragsbereich in Versorgungsgruppe C anzustreben. Die Festlegung der Versorgungsgruppenbereiche ist also aus der Sicht der Sicherung einer optimalen Ertragsfähigkeit des Ackerbaus für diese beiden Methoden zufriedenstellend gelöst worden.

Tabelle 11: Statistische Daten über die relativen Ertragsdifferenzen der Versorgungsgruppen für organische Substanz, ermittelt mit verschiedenen Methoden zur Humusbilanzierung zur Anwendung im konventionellen Landbau

Versorgungsgruppe	HÄQ (kg C/ha)	Obere Werte LUFA				Untere Werte LUFA				STAND-Methode			
		N	S	MW	MAX	N	S	MW	MAX	N	S	MW	MAX
A	bis -200	799	23,15	111	208	683	24,61	112	231	583	25,42	114	244
B	-200 bis -76	77	10,22	105	131	95	10,45	107	137	238	12,99	104	139
C	-75 bis +100	71	5,64	104	118	102	9,90	106	129	146	8,88	105	125
D	+101 bis +300	44	9,43	107	122	61	8,20	104	115	78	7,48	102	120
E	über +301	77	7,92	102	111	127	7,94	103	115	23	7,96	101	111
		1068				1068				1068			

N = Anzahl; S = Standardabweichung; MW = Mittelwert; MAX = durchschnittlicher Maximalwert (N = 2)

In Abbildung 12 wurde aus den drei statistischen Parametern (S, MW, MAX, Tab. 11) eine zusammengefasste relative Maßzahl ermittelt, bei der für jede Methode die entsprechenden Zahlenwerte für die Versorgungsstufen D + E gleich 100 % gesetzt (= Ertragsmaximum) und die Werte der anderen Versorgungsstufen entsprechend ausgewiesen worden sind. Es ist deutlich zu sehen, dass der Methode obere Werte LUFA in Versorgungsstufe C bereits maximale Ertragsreaktionen zugrunde liegen, während optimale Werte eher der Versorgungsstufe B zuzuordnen sind. Die anderen beiden Methoden weisen fast idealtypische Optimalwerte in Versorgungsstufe C auf.

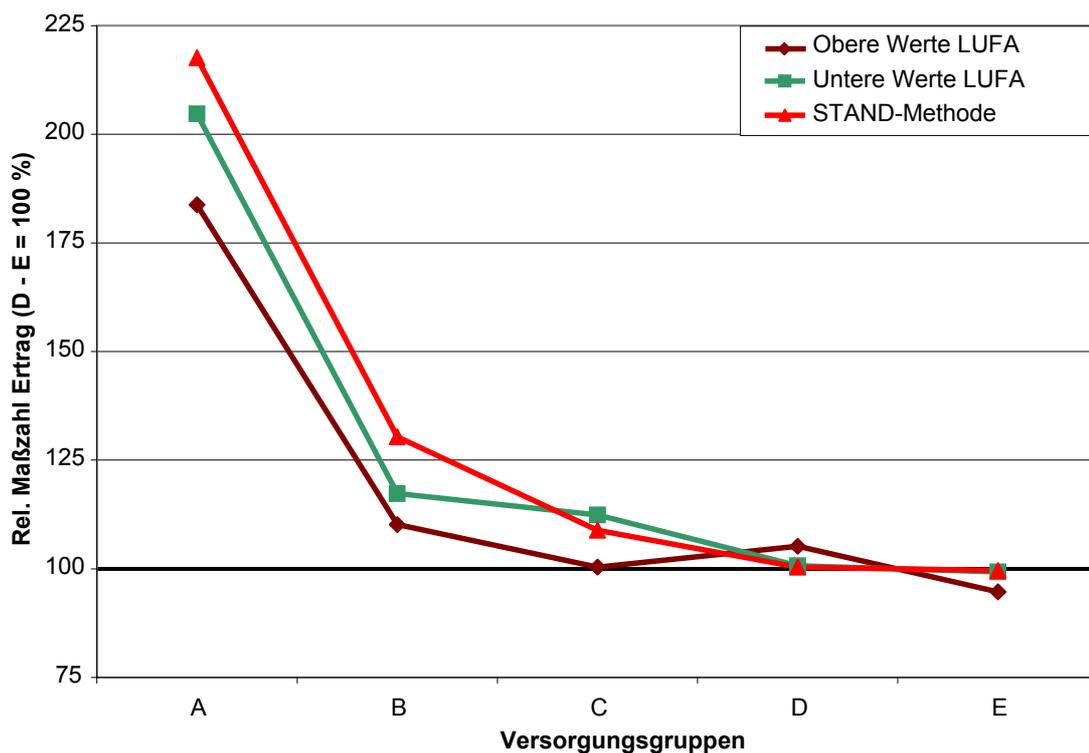


Abbildung 12: Relative Zuordnung der Ertragseffekte auf die Versorgungsgruppen, ermittelt mit drei verschiedenen Bilanzierungsmethoden (Erläuterung siehe Text)

3.3.2.2 Ökologischer Landbau

Aus dem vorherigen Kapitel konnte deutlich herausgearbeitet werden, dass die Ertragsreaktionen sowohl von der Versorgung mit organischer Substanz als auch von der Intensität der N-Mineraldüngung abhängig sind. Zur Bewertung der Beziehungen zwischen den Ergebnissen von vier Humusbilanz-Methoden und den Ertragsreaktionen für die Situation im ökologischen Landbau wurden daher von den 39 Dauerversuchen alle Varianten ohne N-Mineraldüngung herangezogen, wobei die Werte aus Ökoversuchen grün ausgewiesen worden sind. Ein Wertebereich mit relativ niedriger N-Mineraldüngung wurde zum Vergleich separat mit einbezogen (Abb. 13 u. 14).

Der Wertebereich der drei analysierten Ökoversuche (Beschreibung in KOLBE & PRUTZER 2004) liegt im Schwankungsbereich der Werte der konventionellen Varianten, die keine N-Mineraldüngung erhalten haben. Somit dürfte grundsätzlich eine Vergleichbarkeit mit den Bedingungen im extensiven konventionellen und im ökologischen Landbau gegeben sein. Die Bandbreite der gefundenen Humusäquivalente liegt auf dem gleichen Niveau, wie es bereits für die konventionelle Auswertung vermerkt worden ist (siehe dort). Demgegenüber weist die Methode REPRO-stat im Vergleich zu den anderen Methoden mit einer Bandbreite von insgesamt 2.269 (-1.293 bis +976) kg C/ha nochmals einen Anstieg im Bereich der extremen Werte auf, was ungefähr einer C_{org} -Differenz von 1,29 % entspricht, während in den Versuchen lediglich eine Bandbreite von etwas über 0,9 % C_{org} aufgetreten ist.

Unabhängig von der Methode ist zu erkennen, dass sich die Ertragsdifferenzen nach einer zusätzlichen Zufuhr an organischer Substanz (über Düngung oder Fruchtfolgekombination) mit abnehmenden Versorgungsniveaus im positiven Saldoebereich kaum verändern, während die Ertragsdifferenzen im negativen Bereich stark zunehmen. Im Prinzip ist ein vergleichbarer Verlauf festzustellen, wie es schon im vorherigen Kapitel für die konventionellen Anbauverfahren erläutert werden konnte. Es wird auch deutlich, dass selbst durch den Verzicht auf eine geringe zusätzliche N-Mineraldüngung es durch Zufuhr von organischer Substanz zu höheren Ertragssteigerungen im unteren Versorgungsbereich kommt. Systeme ohne Anwendung einer N-Mineraldüngung wie z. B. der ökologische Landbau profitieren daher stärker von einem genügend hohen Versorgungsgrad an organischer Substanz als Systeme mit Mineraldüngung.

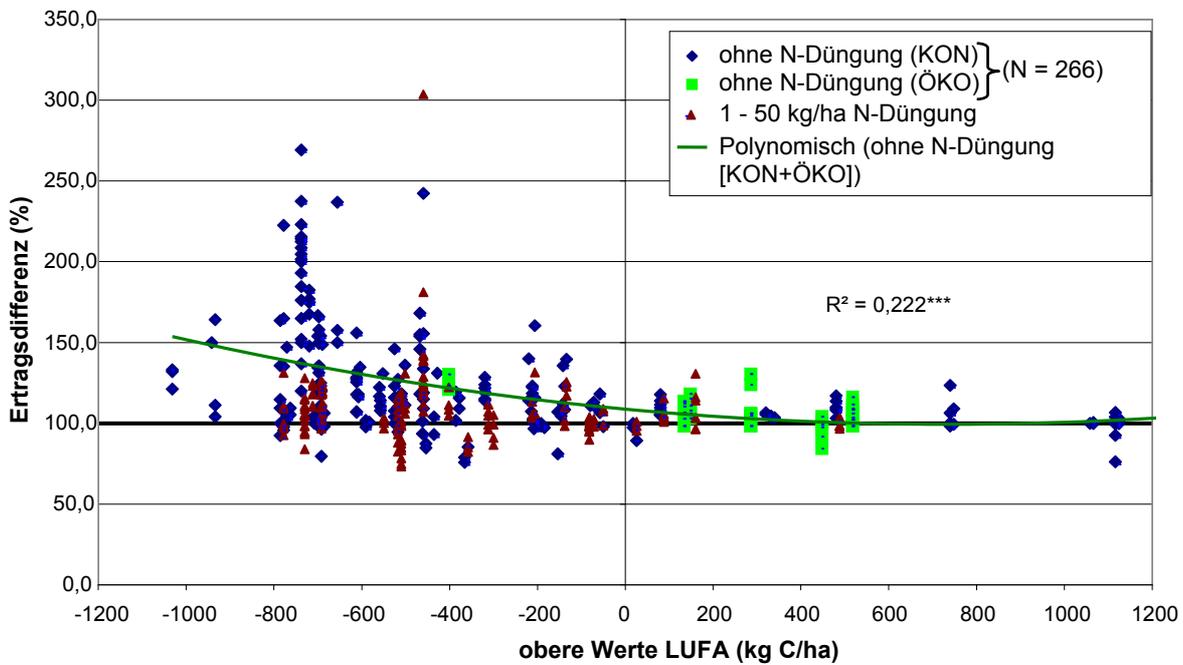
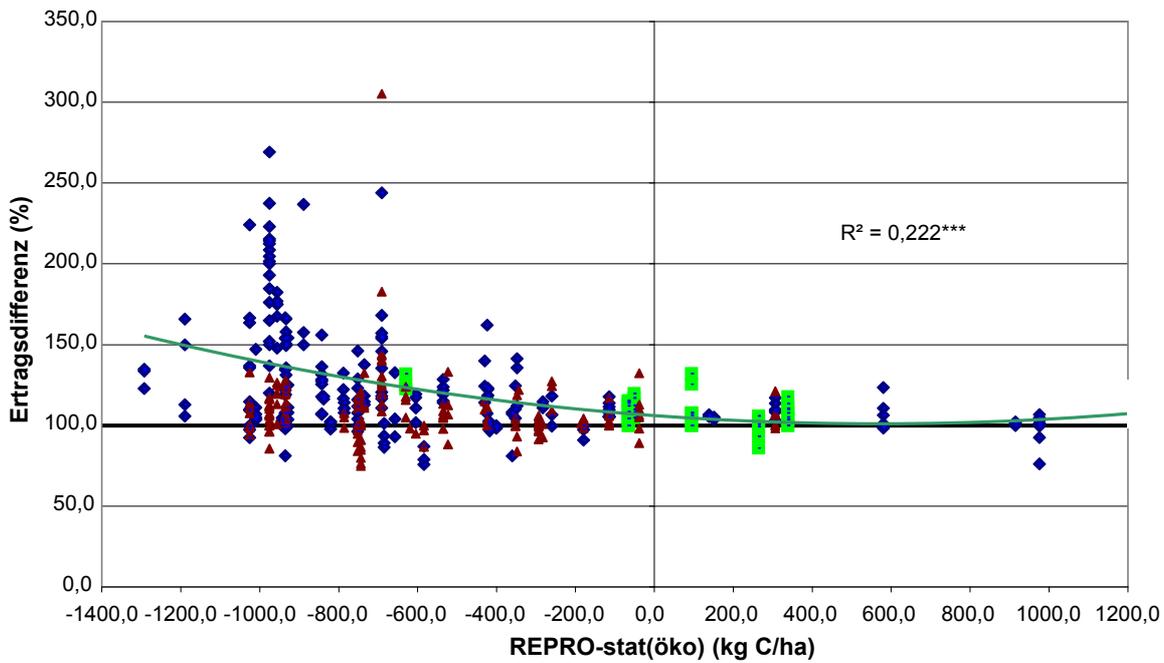


Abbildung 13: Einfluss unterschiedlicher Versorgungsniveaus (Standard) mit organischer Substanz entsprechend der REPRO-stat-Methode (oben) und den oberen Werten (unten) der LUFA-Methode auf die mittlere Ertragsdifferenz der Fruchtarten, jeweils ermittelt nach einer zusätzlichen Zufuhr an organischer Substanz in Abhängigkeit von den extensiven konventionellen (KON) und den ökologischen Varianten (ÖKO) aus 39 Dauerversuchen (A- E-Grenzen der Versorgungsgruppen siehe Abb. 3)

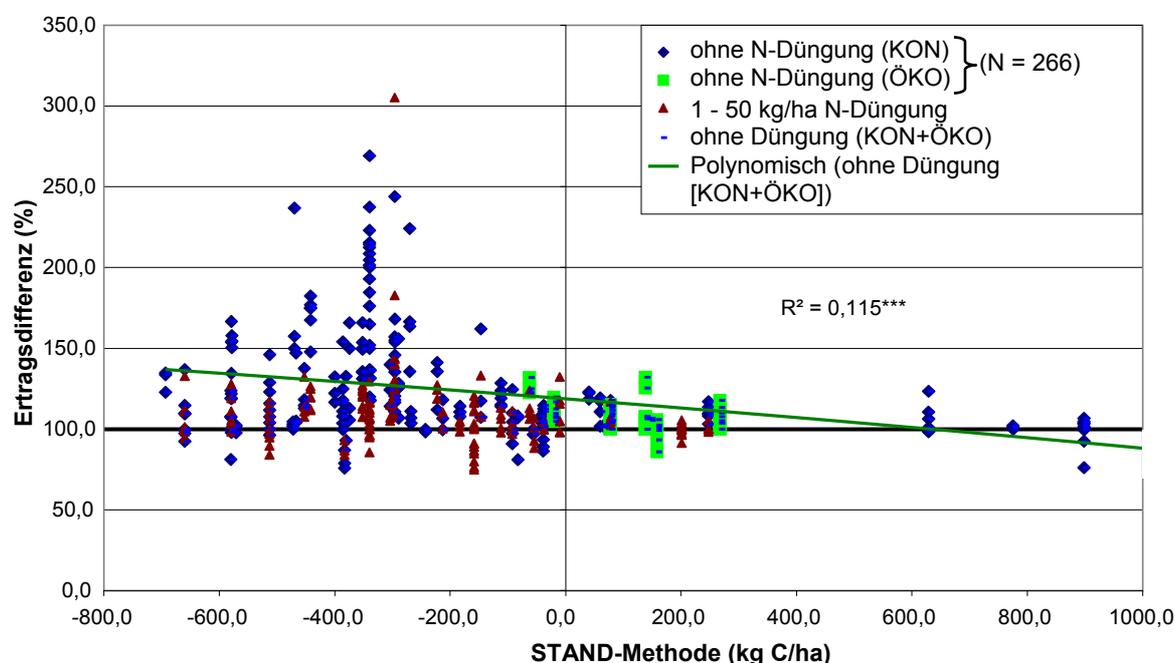
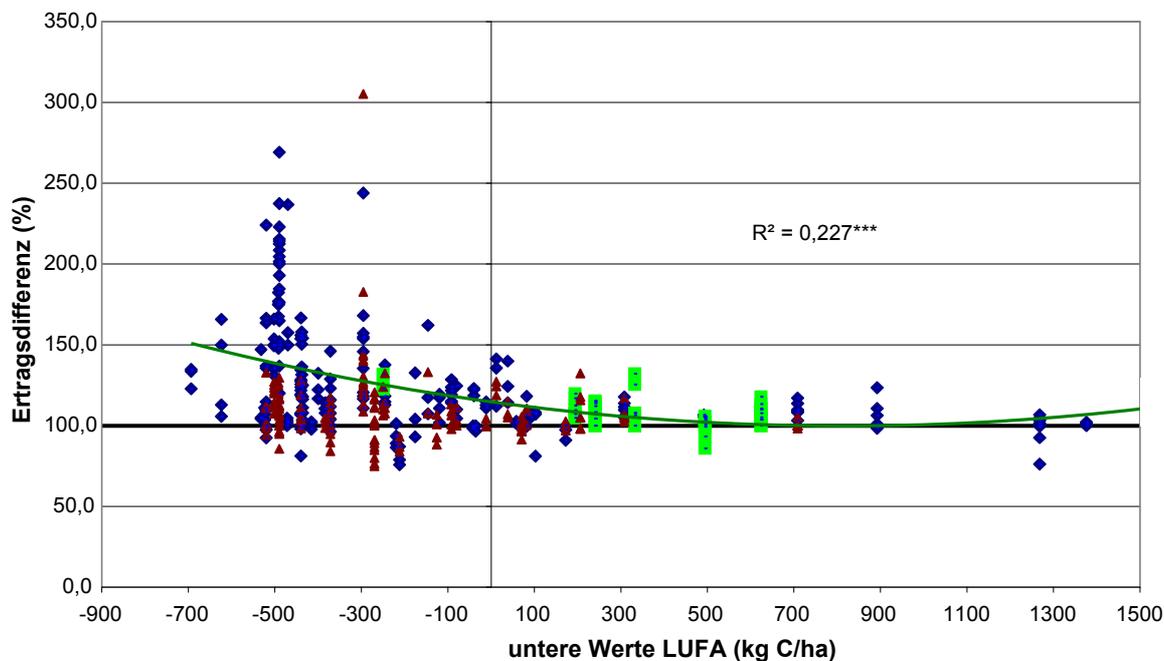


Abbildung 14: Einfluss unterschiedlicher Versorgungsniveaus (Standard) mit organischer Substanz entsprechend den unteren Werten (oben) der LUFA-Methode sowie der standortangepassten Methode (unten) auf die mittlere Ertragsdifferenz der Fruchtarten jeweils ermittelt nach einer zusätzlichen Zufuhr an organischer Substanz in Abhängigkeit von den extensiven konventionellen (KON) und den ökologischen Varianten (ÖKO) aus 39 Dauerversuchen (A- E-Grenzen der Versorgungsgruppen siehe Abb. 3)

Von allen zur Verfügung stehenden Varianten ohne N-Mineraldüngung (N = 274) werden durch die Methoden REPRO-stat und obere Werte LUFA mit ca. 69 % deutlich höhere Anteile der unzureichenden Versorgungsgruppe A (unter -200 kg C/ha) zugeordnet als bei den anderen beiden Methoden mit ca. 53 % (Abb. 13, 14, Tab. 12). Beide Verfahren neigen also, ähnlich den Ergebnissen im konventionellen Landbau, auch bei der Beurteilung der Gruppenzugehörigkeiten zu extremen Lösungen. Dagegen werden von der REPRO-stat-Methode für die Bereiche B (-200 bis -75) und C (-75 bis +400 kg C/ha) die geringsten Anteile von allen geprüften Methoden zugewiesen. In diesem Bewertungsbereich werden jeweils über die Verfahren obere Werte und untere Werte der LUFA-Methode bis zur STAND-Methode immer höhere Bewertungsanteile ermittelt.

Tabelle 12: Statistische Daten über die relativen Ertragsdifferenzen der Versorgungsgruppen für organische Substanz bei Einsatz verschiedener Methoden zur Humusbilanzierung im ökologischen Landbau

Versorgungsgruppe	HÄQ (kg C/ha)	REPRO-stat(ÖKO)				Obere Werte LUFA				Untere Werte LUFA				STAND-Methode			
		N	S	MW	MAX	N	S	MW	MAX	N	S	MW	MAX	N	S	MW	MAX
A	bis -200	188	34,56	130	187	170	35,44	132	208	143	37,39	135	231	147	36,89	135	244
B	-200 bis -76	11	7,67	106	114	15	14,93	111	131	19	14,67	117	137	22	15,69	113	139
C	-75 bis +400	24	8,02	110	118 123*	42	7,60	108	121	61	11,04	110	124	82	8,94	108	122
D	+401 bis +600	12	6,06	101	117 117*	23	7,35	105	112	12	6,06	101	106	-	-	-	116
E	über +601	39	7,78	104	104 111*	23	7,96	101	109	39	7,78	104	113	22	7,96	101	111
		274				273				274				273			

N = Anzahl; S = Standardabweichung; MW = Mittelwert; MAX = durchschnittliche Maximalwerte (N = 2); * = entsprechend Gruppierung wie im konventionellen Landbau (vgl. Abb. 3)

Aus der Verteilung der statistischen Merkmale (Standardabweichung, Mittelwert, Maximalwert) geht hervor, dass bei den Methoden untere Werte LUFA und besonders der standortangepassten Methode im Wertebereich C die statistischen Merkmale noch nicht ganz die minimalen Werte des Streubereiches von ca. $\pm 15 - 20$ % Ertragsschwankung aufweisen, während im Versorgungsbereich B noch deutlich höhere Werte vertreten sind. Mit diesen Methoden wird im Versorgungsbereich C daher ein weitgehend optimales Ertragsniveau erzielt. Demgegenüber werden mit den Methoden REPRO-stat und obere Werte LUFA im Bereich C Merkmalwerte ausgewiesen, die weitgehend im Streubereich anzusiedeln sind und somit bereits maximale Ertragswerte charakterisieren. Besonders mit der für den Ökolandbau entwickelten REPRO-stat-Methode werden sogar relativ niedrige Werte der ausgewiesenen statistischen Merkmale für die Versorgungsgruppe B ermittelt.

Aus diesen Ergebnissen kann abgeleitet werden, dass mit den Methoden REPRO-stat und auch mit den oberen Werten LUFA nicht nur im Bereich C, sondern auch bereits im Bereich der Versorgungsgruppe B ein optimales bis maximales Ertragsniveau ermittelt wird (Abb. 15, Tab. 12). Hieraus lässt sich die Schlussfolgerung ableiten, dass unter Heranziehung der Ertragsdifferenzen die Festsetzung der Grenzen der Versorgungsgruppen besonders für die Methode REPRO-stat deutlich unvorteilhaft erscheinen und einer Korrektur bedürfen, während für die anderen Methoden die bisher vom Autor festgesetzten Werte für den Ökolandbau bestätigt werden können (siehe Abb. 3 sowie KOLBE & KÖHLER 2008).

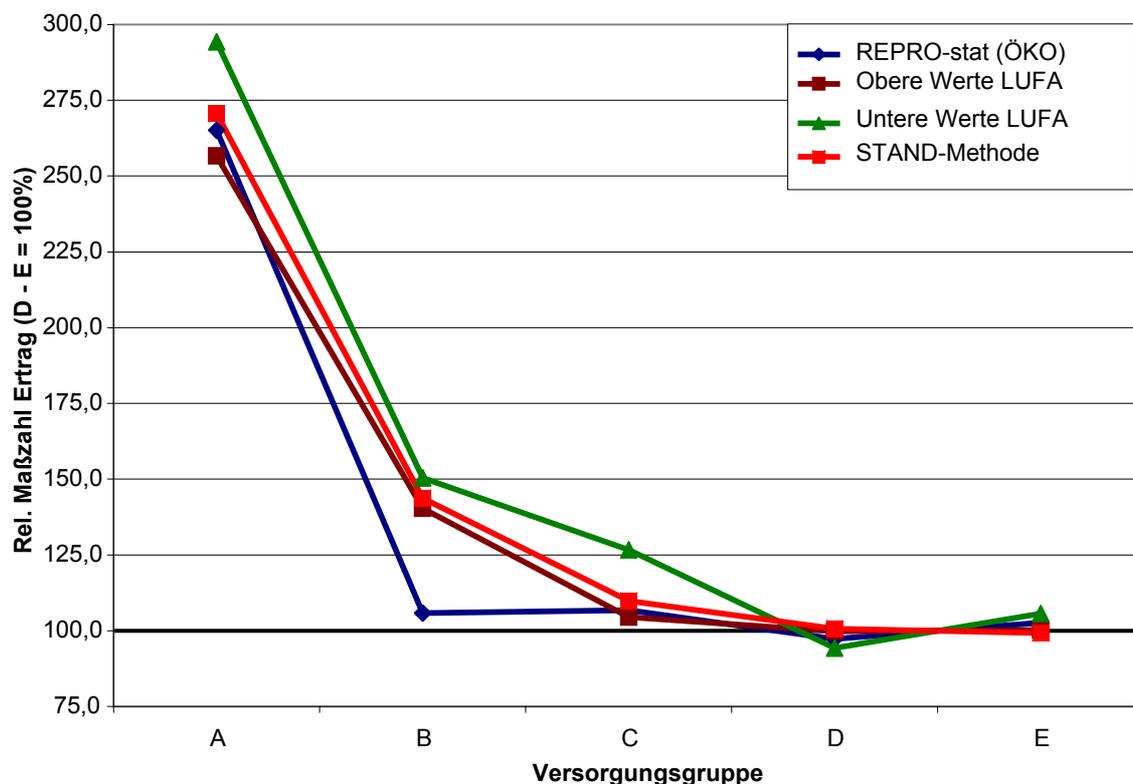


Abbildung 15: Relative Zuordnung der statistischen Ertragseffekte auf die Versorgungsgruppen, ermittelt mit vier verschiedenen Bilanzierungsmethoden für ökologische Anbauverfahren (Bildung einer relativen Maßzahl aus den statistischen Parametern S, MW u. MAX bei Zuweisung der Gruppen D u. E = 100 %, siehe Tab. 12)

Diese Zusammenhänge zwischen Humussaldo und Ertrag können auch aus einer bei KOLBE & PRUTZER (2004) erstellten dreidimensionalen grafischen Darstellung zwischen steigender N-Mineraldüngung und organischer Düngung auf die Erträge eines Versuches aus Groß Kreuz abgeleitet werden, wodurch zudem einige Grundlagen der Pflanzenernährung und Düngung aufgefrischt werden können (Abb. 16).

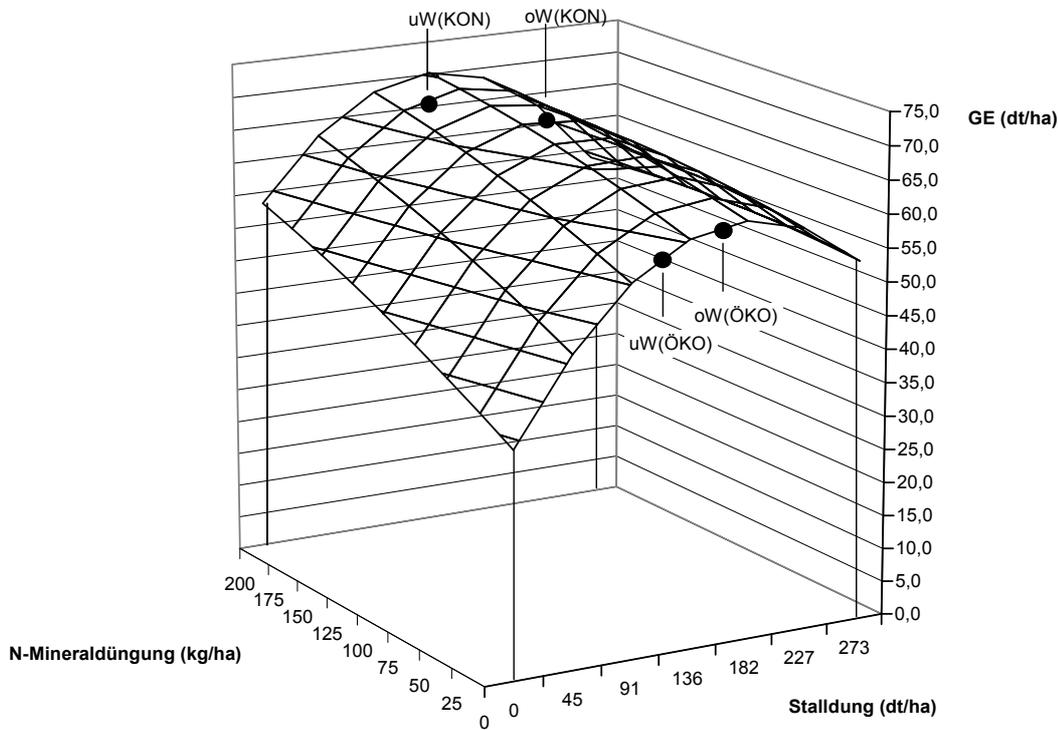


Abbildung 16: Zusammenhang zwischen steigender Zufuhr an N-Mineraldüngung und Stalldung auf die Getreideeinheiten (GE) in einem Dauerdüngungsversuch aus Groß Kreutz (siehe KOLBE & PRUTZER 2004) sowie Einordnung von Optimalvarianten (100 % Bedarfsdeckung an organischer Substanz), ermittelt mit den unteren (uW) und oberen Werten (oW) der LUFA-Methode im konventionellen (KON) und ökologischen (ÖKO) Bewirtschaftungssystem

Wenn zwei Faktoren (in diesem Fall N-Mineraldüngung und organische Düngung in Form von Stalldung) im Einsatz gesteigert werden, kommt es zu immer geringer werdenden Ertragssteigerungen (in diesem Fall an Getreideeinheiten), bis eine bestimmte Kombination an Faktormengen zu maximalen Erträgen führt. Diese Kombination liegt in diesem Beispiel bei N-Mineraldüngermengen von etwas über 200 kg/ha sowie bei einer Stalldungmenge um 135 dt/ha. Wird lediglich eine singuläre Steigerung einzelner Düngerarten vorgenommen, werden für jede Düngerart auch maximale Ertragsniveaus erreicht, diese sind in der Regel aber immer niedriger als bei einer Kombinationssteigerung. Darauf beruht die positive Kombinationswirkung zwischen mineralischer und organischer Düngung, die im konventionellen Landbau zu den bekannten hohen Erträgen führt (SCHILLING 2000).

An der Reaktionsform der Ertragsfläche in Folge der gesteigerten Düngung kann in diesem Fall lediglich eine geringe negative Wechselwirkung festgestellt werden, weil Stalldung in geringem Umfang auch durch N-Düngung ersetzt werden kann (weil Stalldung auch Stickstoff enthält). In diesen Fällen verschiebt sich das Maximum zu etwas höheren Stalldungwerten, wenn die N-Mineraldüngung reduziert wird (siehe Abb. 16). Wenn das nicht der Fall ist, z. B. in Folge steigender N- und P-Düngung, verschiebt sich im Idealfall der Bereich maximaler Erträge zu höheren Werten, wenn gleichzeitig beide Nährstoffe gesteigert werden (positive Wechselwirkung).

Die Analyse der Humusbilanzierung brachte für diesen Versuch folgende Ergebnisse, wenn eine 100%ige Bedarfsdeckung (ausgeglichene Bilanz) unter konventionellen Anbaubedingungen (KON) angestrebt wird:

- bei Einsatz der unteren Werte LUFA: 175 kg/ha N-Mineraldüngung + 114 dt/ha Stalldung
- bei Einsatz der oberen Werte LUFA: 125 kg/ha N-Mineraldüngung + 162 dt/ha Stalldung

Bei Verwendung der unteren Werte wurde ein annähernd optimales Ertragsniveau (N-Mineraldüngung, Stalldung) und bei Nutzung der oberen Werte LUFA jedoch ein bereits weitgehend maximales Niveau beim Stalldungeinsatz erreicht oder gar überschritten, wie aus Abbildung 16 deutlich zu erkennen ist. Es ist weiter zu sehen, dass beide Faktoren in gewissen Grenzen

gegenseitig verändert oder ausgetauscht werden können. So könnte die N-Mineraldüngung um 30 % zurückgenommen werden, wenn mit den oberen Werten LUFA bilanziert wird (LEITHOLD 2011). In gewissen Grenzen führt dieser Faktortausch zu einem ähnlich hohen Ertragsniveau. Bei stärkerer Reduktion eines Faktors trifft das aber dann nicht mehr zu. So deutet sich bei diesem Beispiel bereits an, dass es bei Verwendung der oberen Werte LUFA zur Bestimmung der Zufuhrhöhe an organischer Substanz zu geringfügig geringeren GE-Erträgen (-2 bis -3 dt/ha) gekommen ist. Außerdem wurden ca. 5 kg/ha höhere N-Salden und eine etwas geringere Nährstoffverwertung ermittelt (KOLBE & PRUTZER 2004), weil durch die erhöhte Stalldungzufuhr auf dem dann reduzierten N-Düngungsniveau bereits ein weitgehend maximales Ertragsniveau realisiert worden ist (Abb. 16). Diese in einem Einzelversuch erhaltenen Ergebnisse stimmen somit sehr gut mit den weiteren Auswertungen in dieser Arbeit überein. Bei Verwendung der oberen Werte LUFA steigt die Wahrscheinlichkeit an, dass bereits ein maximales Ertragsniveau erreicht wird, bei dem dann auch ungünstigere N-Salden zu akzeptieren sind. Dieses Ertragsniveau liegt aber niedriger als bei optimaler Kombination zwischen N-Mineraldüngung und organischer Düngung.

In der Regel kann bei einer starken Reduktion des Einsatzes der N-Mineraldüngung auch durch Kompensation durch einen steigenden Stallungeinsatz eine deutliche Absenkung des Ertragsniveaus nicht mehr verhindert werden. Steht lediglich die organische Düngung zur Verfügung wie z. B. im ökologischen Landbau, dann führt eine Düngungssteigerung zwar auch zu einem Ertragsanstieg. Entsprechend dem Gesetz vom abnehmenden Ertragszuwachs ist aber das Ausmaß der Ertragssteigerung deutlicher begrenzt (Abb. 16, ÖKO). Das liegt auch daran, dass sich die erreichbare Ertragshöhe unter ökologischen Anbaubedingungen auf einem niedrigeren Niveau befindet. Im gleichen Versuch führt daher eine Humusbilanzierung zur Bestimmung der optimalen Zufuhrhöhe an Stalldung bei Verwendung der unteren Werte LUFA ebenfalls zu (noch) optimalen Erträgen und bei Verwendung der oberen Werte LUFA wiederum zu weitgehend maximalen Erträgen, jedoch auf einem deutlich niedrigeren Ertragsniveau. Bei Anwendung der REPRO-stat-Methode für den Ökolandbau würde eine noch höhere Stalldunganwendung bei 100 % Bedarfsdeckung berechnet werden. In diesem Beispiel könnten dann sogar Erträge zu ermitteln sein, die bereits jenseits des Ertragsmaximums liegen.

Auf Grund dieser Zusammenhänge ist es kritisch zu hinterfragen und könnte weitgehend als konventionelle Denkungsweise interpretiert werden, dass der Ökolandbau einen höheren Nährstoffbedarf an organischen Düngemitteln hat als der konventionelle Landbau und daher eine entsprechend angepasste Humusbilanzmethode für diese Form der Landbewirtschaftung benötigt (siehe ENGELS et al. 2010). Wie die Ergebnisse dieser Studie zeigen, führen Methoden, die von dieser Sichtweise getragen werden, zu einer Zunahme der Wahrscheinlichkeit, dass bei „optimal“ ausgewiesenen Ergebnissen (= 100 % Bedarfsdeckung; = ausgeglichene Humusbilanz, Versorgungsgruppe C) Zufuhrhöhen an organischen Materialien berechnet werden, die weitgehend zu maximalen Erträgen führen und über erhöhte N-Salden bereits negative Konsequenzen für die Nährstoffausnutzung nach sich ziehen können (siehe Kap. 3.4).

Schlussfolgerung aus diesen Ergebnissen ist es, dass Anbauverfahren des ökologischen Landbaus im Durchschnitt nicht höhere, sondern etwas geringere Nährstoffbedürfnisse aufweisen als konventionelle Verfahren, wie aus vielen Untersuchungen der ökologischen Praxis eindeutig belegt werden kann (KOLBE 2000; HAAS 2010). Eine etwas höhere Versorgung mit organischer Substanz kann angestrebt bzw. geduldet und sollte eher der Versorgungsgruppe D zugeordnet werden, weil dann die Gefahr bereits ansteigt, niedrigere Nährstoffeffizienzen zu erlangen. Daher ist das Versorgungsniveau für den Optimalbereich der Versorgungsgruppe C so zu fixieren, dass derartige Überdüngungserscheinungen mit hoher Wahrscheinlichkeit vermieden werden.

3.4 N-Bilanz-Kriterien

3.4.1 Düngungsbewertung

In der Abbildung 17 wurden von den Ergebnissen der 39 Dauerversuche (siehe Kap. 2.3) die durchschnittlichen Ertragswerte der angebauten Fruchtarten ausgedrückt als N-Entzüge den Ergebnissen der Humusbilanzierung entsprechend den unteren LUFA-Werten gegenüber gestellt. Es ist nur eine geringfügig positive Beziehung zwischen diesen beiden Merkmalen zu erkennen. Lediglich 3 % der Streuung können durch die Ergebnisse der Humusbilanzierung erklärt werden. Die Bestimmtheitsmaße der anderen geprüften Methoden liegen auf ähnlich niedrigem Niveau (ohne Abbildung). Die Reststreuung ist so erheblich, dass keine gesicherten Aussagen möglich sind.

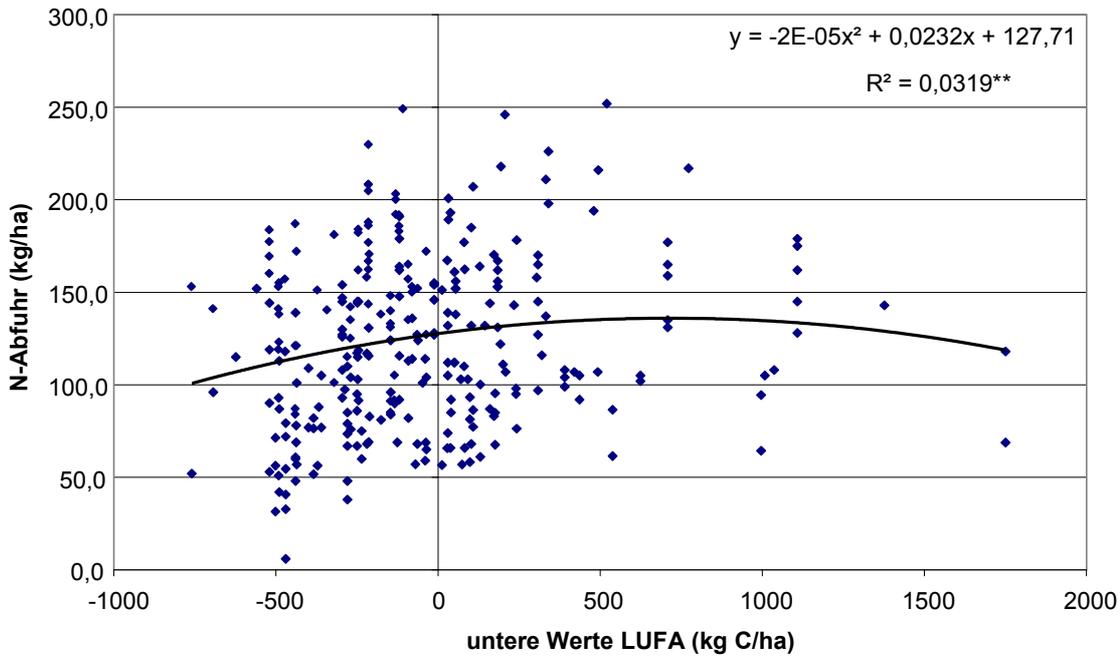


Abbildung 17: Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der Humusbilanzierung entsprechend den unteren LUFA-Werten und den mittleren N-Entzügen der Fruchtarten aus 39 Dauerversuchen

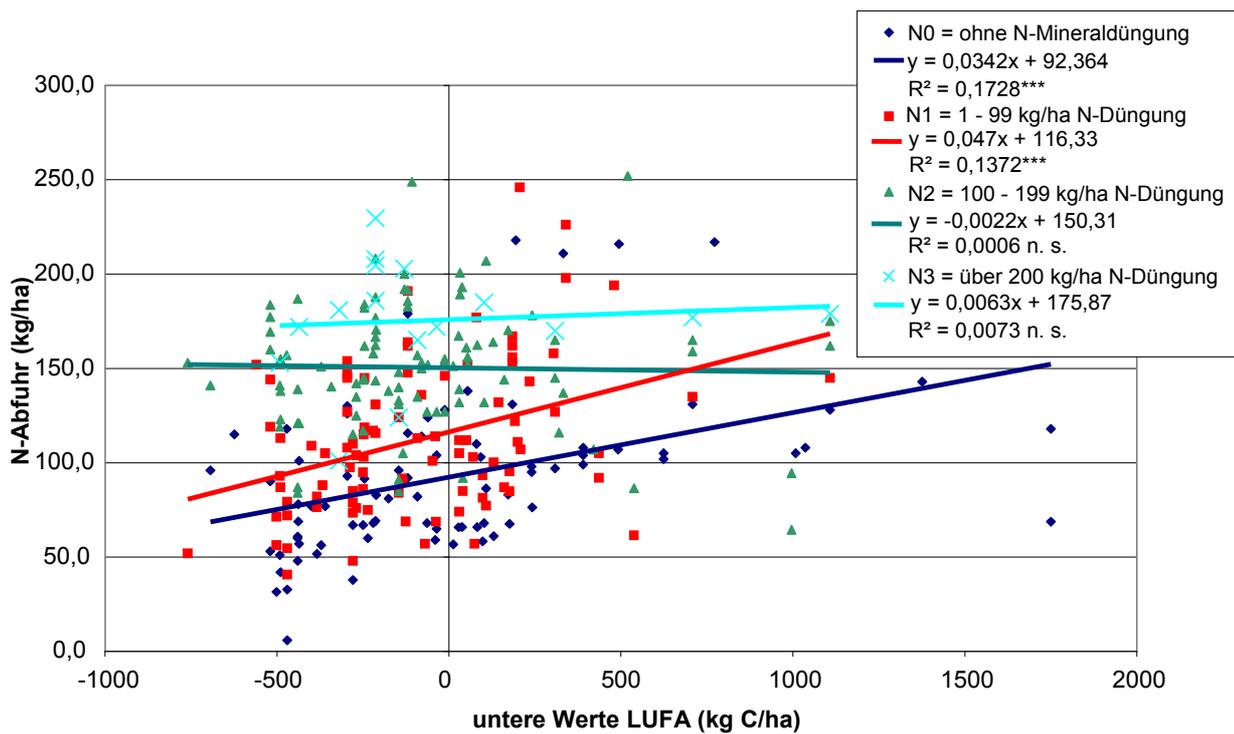


Abbildung 18: Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der Humusbilanzierung nach den unteren LUFA-Werten und den mittleren N-Entzügen der Fruchtarten aus 39 Dauerversuchen, nach N-Düngungshöhe differenziert dargestellt

Dies gilt auch, wenn die Daten nach der Höhe der N-Mineraldüngung aufgliedert werden. Hierbei fallen die Bestimmtheitsmaße mit steigender Höhe der N-Düngung ab (Abb. 18). Anbausysteme ohne N-Mineraldüngung, die auch die Bedingungen des Ökolandbaus widerspiegeln, werden nur mit Bestimmtheitsmaßen zwischen 17 % (Abb. 18, untere Werte; standortangepasste Methode) und 20 % (obere Werte, ohne Abbildung) abgebildet. Andere Faktoren, die in diesen Auswertungen als Zielmerkmale nicht berücksichtigt werden, haben offensichtlich einen viel größeren Einfluss.

Werden dementsprechend die N-Entzugswerte dieser Datensätze den Mengen an Gesamt-N-Zufuhr gegenübergestellt, so ist eine deutlich engere Beziehung zu erkennen (Abb. 19). Im Verlauf steigender N-Zufuhren ist hier der abnehmende Ertragszuwachs deutlich zu erkennen. Allein durch die N-Zufuhr können 53 % der auftretenden Streuung erklärt werden. Für die Ertragsoptimierung ist daher die N-Zufuhr als ein wesentlich geeigneteres Merkmal anzusehen als die Ergebnisse der Humusbilanzierung. Auf Grund dieser Zusammenhänge war es mit Erfolg möglich, die heute weit verbreiteten Düngungsbemessungsverfahren wie die N_{\min} -Methode und verwandte Verfahren zu erstellen (WEHRMANN & SCHARPF 1979). Ein ähnliches System wird jetzt auch für den Einsatz im konventionellen und ökologischen Landbau vorbereitet (siehe CCB). Konsequenterweise wird hierbei die aus dem Humusumsatz abgeleitete N-Dynamik des Systems in Relation zur Ertrags- und N-Entzugsbildung gesetzt. Bei Berücksichtigung weiterer Einflussgrößen (Bodenart, Klima) inkl. Einbeziehung der N-Mineralisation können noch engere Beziehungen abgeleitet werden (FRANKO et al., in Vorbereitung). So steigt z. B. das Bestimmtheitsmaß auf 55 % an, wenn lediglich Varianten ohne N-Mineraldüngung berücksichtigt werden (ohne Abbildung).

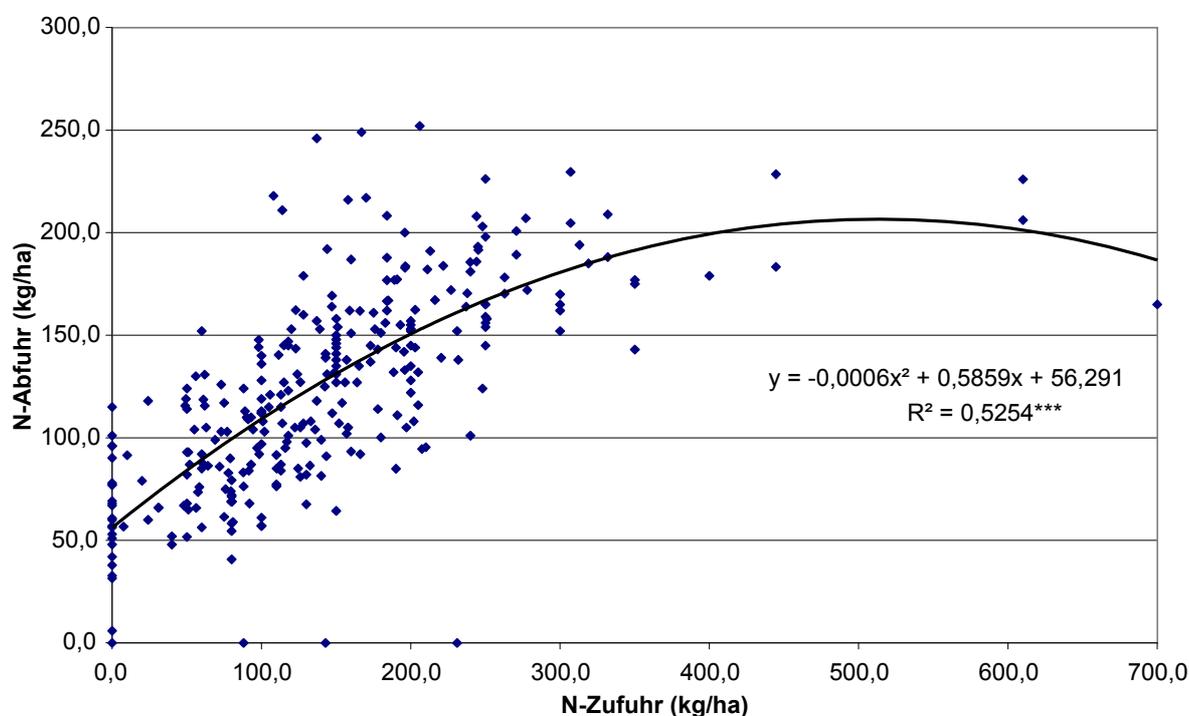


Abbildung 19: Einfluss der Gesamt-N-Zufuhr auf die N-Entzüge der Fruchtarten, ermittelt aus 39 Dauerversuchen

Unter Einbeziehung einer möglichst großen Anzahl an Dauerversuchen konnte aufgezeigt werden, dass zwischen den Ergebnissen der Humusbilanzierung und den Erträgen bzw. den N-Entzügen der Fruchtarten kaum gesicherte Beziehungen bestehen. Daher sind Methoden der Humusbilanzierung zum Aufbau von Verfahren zur direkten Düngungsbemessung (an organischen Düngemitteln) für konventionelle und ökologische Anbauverfahren als ungeeignet anzusehen.

3.4.2 N-Saldo und Ertragsdifferenzen

Auch zwischen den N-Salden und den Ertragsdifferenzen am Beispiel der extensiven konventionellen und ökologischen Varianten der Dauerversuche bestehen charakteristische Beziehungen, die eine hohe Ähnlichkeit mit den in den vorherigen Kapiteln ausgewiesenen Zusammenhängen zwischen den Humusäquivalenten und den Ertragsdifferenzen aufweisen (siehe Kap. 3.3; Abb. 20). Diese Art der Darstellung könnte dazu verwendet werden, für die N-Schlagbilanzen ein ähnliches A-E-Bewertungssystem zu entwickeln wie zu den Ergebnissen der Humusbilanzierung. So ist zu erkennen, dass im Bereich 0 kg bis +50 kg N/ha ein weitgehend optimales Ertragsniveau zu erreichen ist, aber keinesfalls ein maximales Niveau. Es ist außerdem zu entnehmen, dass auch im Ökolandbau höhere Werte als +50 kg N/ha ermittelt werden können. Ein annähernd maximales Ertragsniveau wird daher schon lange nicht mehr als ordnungsgemäß angesehen, schon gar nicht im ökologischen Landbau. Zur Diskussion des (maximal) erreichbaren Ertragsniveaus im ökologischen Landbau und daraus abgeleiteten Konsequenzen für die Humusbilanzierung und Umweltsicherung siehe KOLBE & PRUTZER (2004).

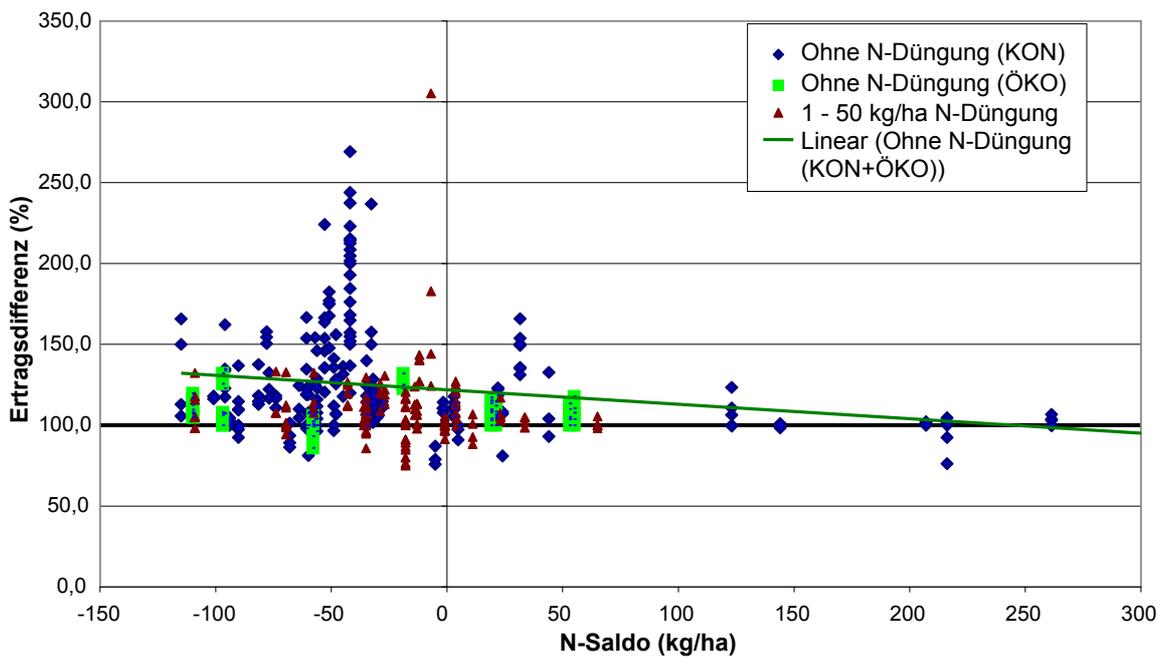


Abbildung 20: Zusammenhang zwischen den N-Salden und den ausgewiesenen Ertragsdifferenzen der Fruchtarten der extensiven konventionellen und der ökologischen Varianten, ermittelt aus 39 Dauerversuchen

3.4.3 N-Saldo und Humusbilanzen

Zwischen den N-Salden und den Ertragsdifferenzen bestehen daher sehr ähnliche Beziehungen, wie es auch zwischen den Ergebnissen der Humusbilanzierung und den Ertragsdifferenzen dargelegt wurde. Daher stehen beide Merkmale in einem fachlichen Zusammenhang, der ebenfalls zur Überprüfung und Optimierung des VDLUFA-Bewertungssystems verwendet werden kann.

3.4.3.1 Auswertungen von Dauertestflächen der landwirtschaftlichen Praxis

In Fortsetzung der Arbeiten zur genaueren Fixierung von Bewertungssystemen für die erlangten Humusbilanzen wurden zunächst entsprechende Auswertungen von Exaktversuchen vorgenommen (KOLBE & KÖHLER 2008). Hierbei stellte sich eine deutliche Beziehung zwischen den N-Salden und den Ergebnissen aus Humusbilanzberechnungen heraus, wenn das unterschiedliche Niveau der mineralischen N-Düngung aus den Versuchen berücksichtigt wird. Daher wurden diese Auswertungen auf die sächsischen Dauertestflächen ausgeweitet, um aufzuzeigen, ob unter den Bedingungen der landwirtschaftlichen Praxis des ökologischen und konventionellen Landbaus diese Relationen ebenfalls zutreffen. Unter Nutzung der Ergebnisse aus 760 Dauertestflächen in Sachsen (siehe Kap. 3.3) wurden die Humusbilanzen nach den unteren Werte LUFA ermittelt (SEIBT 2007) und der N-Zufuhr der Versuche gegenübergestellt (Abb. 21).

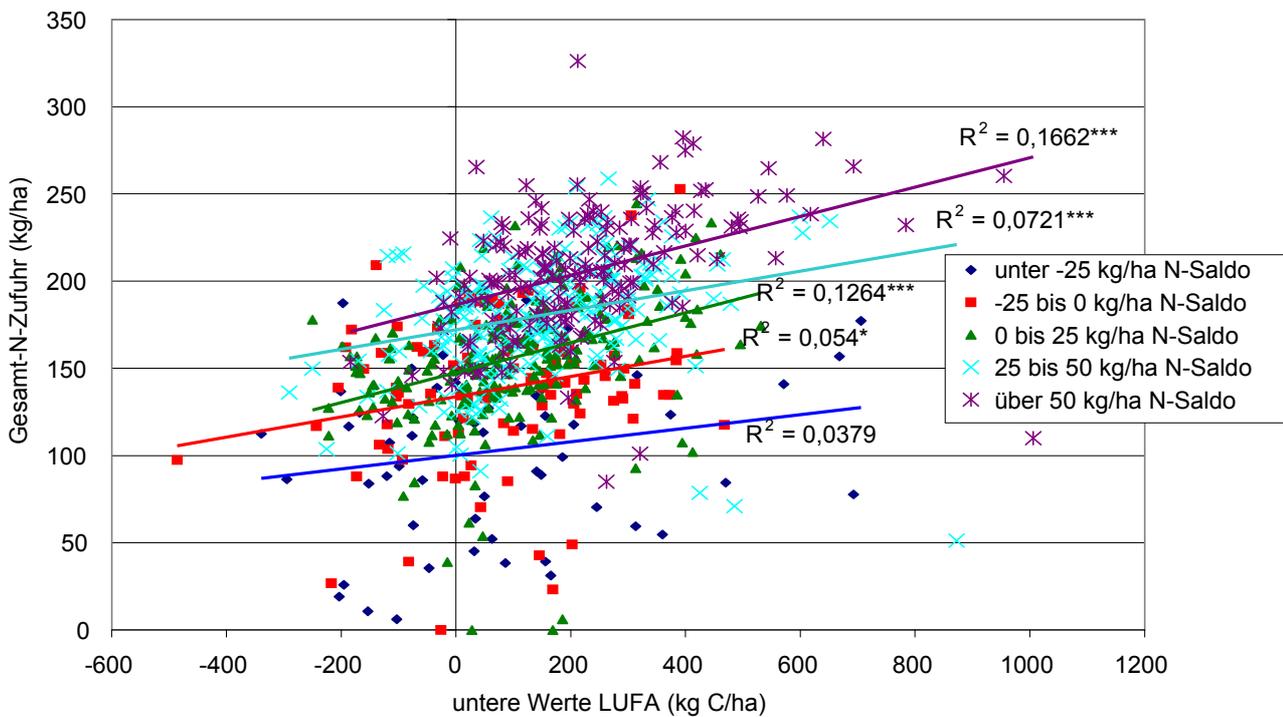
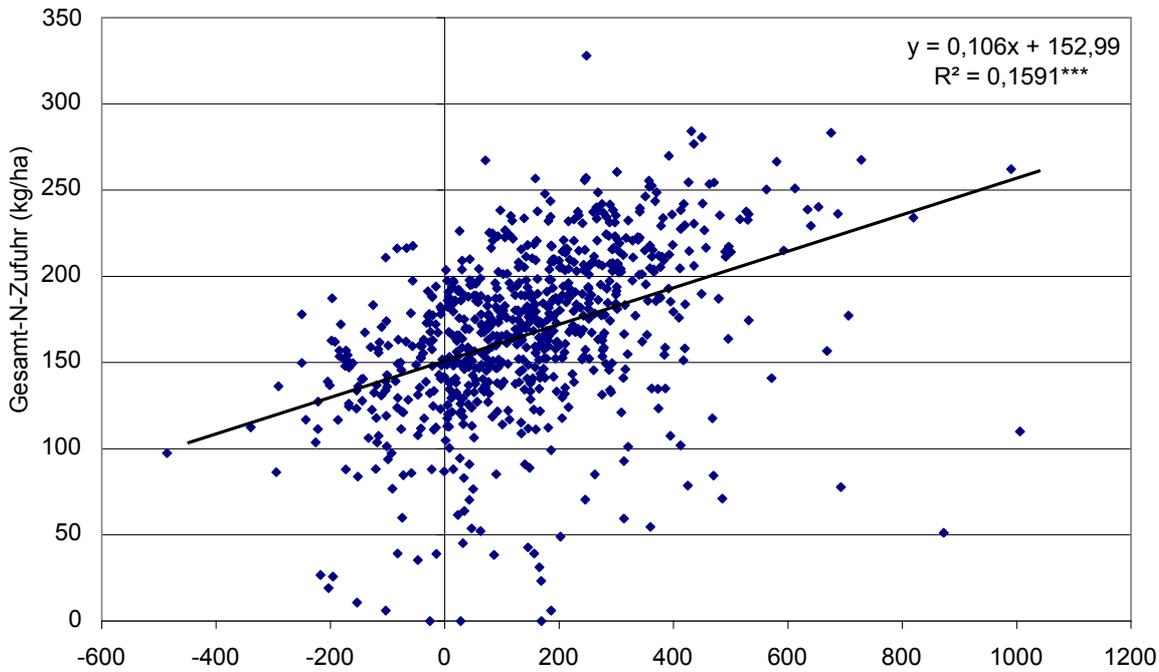


Abbildung 21: Zusammenhang zwischen dem Ergebnis der Humusbilanzierung am Beispiel der unteren Werte LUFA und der Gesamt-N-Zufuhr in den Dauertestflächen Sachsens

Unter Einbeziehung aller Daten besteht eine hoch signifikante positive Beziehung zwischen den Humussalden und der Gesamt-N-Zufuhr in den Praxisflächen (Abb. 21, oben). Mit steigenden Humussalden nimmt die N-Zufuhr ebenfalls deutlich zu. Jedoch ist auch eine erhebliche Streuung der Werte zu erkennen, die auf die unterschiedlichen N-Gehalte der verwendeten organischen Materialien zurückzuführen ist. Werden die Ergebnisse nach steigenden N-Salden gegliedert, so ist deutlich zu erkennen, dass mit ansteigenden Humussalden auch die Wahrscheinlichkeit zunimmt, dass die N-Salden ebenfalls höhere Werte erreichen (Abb. 21, unten).

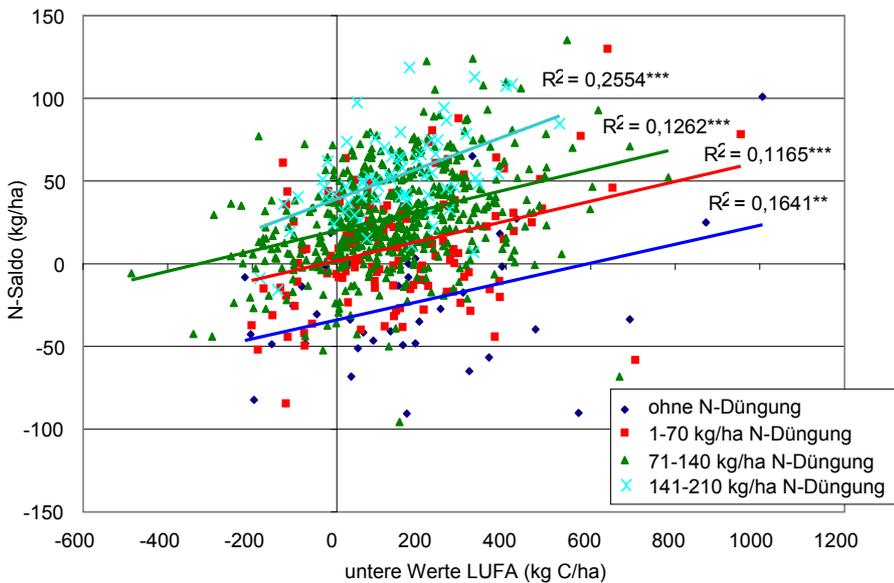
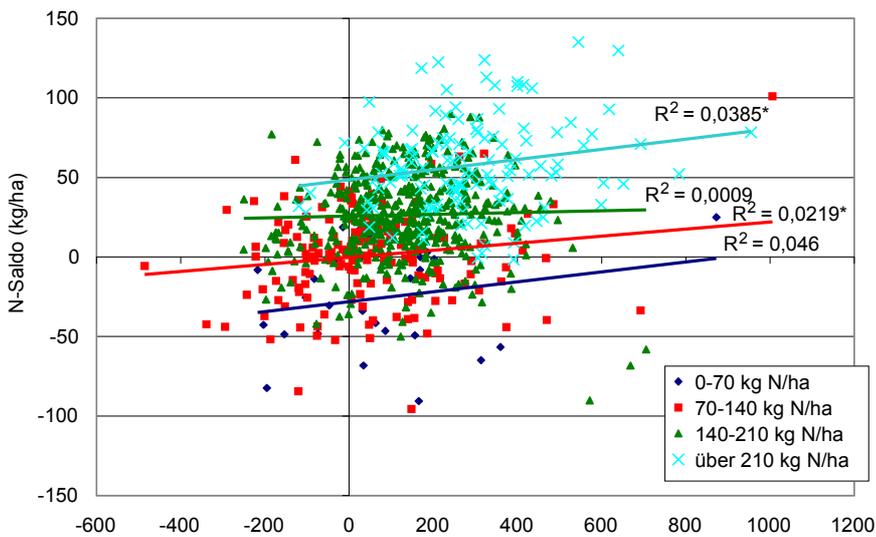
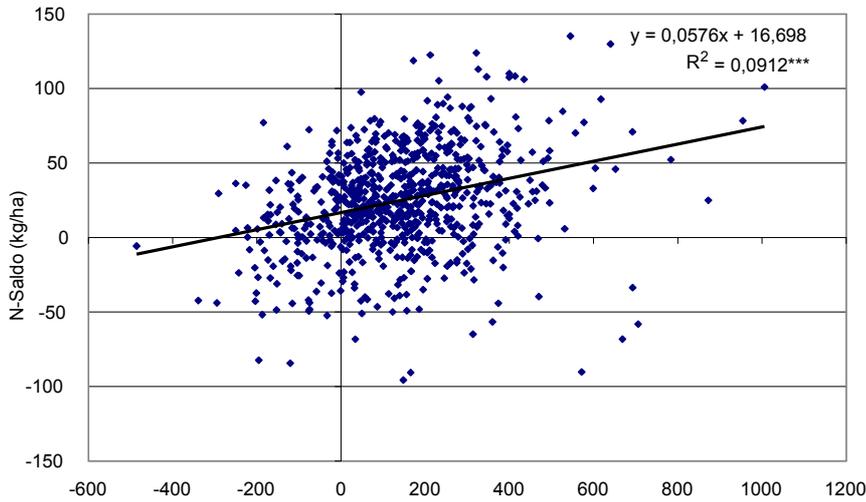


Abbildung 22: Zusammenhang zwischen dem Ergebnis der Humusbilanzierung am Beispiel der unteren Werte LUFA und den N-Salden insgesamt (oben) sowie den N-Salden, aufgeführt nach Gesamt-N-Zufuhr (Mitte) bzw. der N-Mineraldüngung (unten) der Dauertestflächen in Sachsen

In Abbildung 22 sind die Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen der Humusbilanzierung und den N-Salden der Dauertestflächen einer näheren Untersuchung unterzogen worden. Zunächst ist wiederum zu sehen, dass zwischen den Humussalden und den Schlagsalden ebenfalls eine signifikante positive Beziehung besteht. Werden die Ergebnisse entsprechend steigender Gesamt-N-Zufuhren gegliedert, so sind nur schwach signifikante Zusammenhänge zu erkennen. Auch nach dieser Darstellung steigt jedoch die Wahrscheinlichkeit an, dass es besonders bei hoher N-Zufuhr mit zunehmenden Werten in der Humusbilanzierung auch zu hohen positiven N-Salden kommt. Werden die Ergebnisse nach ansteigender N-Mineraldüngung gruppiert (Abb. 22, unten), so ergeben sich wiederum engere statistische Beziehungen zwischen den Humus- und den N-Salden.

Durch diese Untersuchungen aus der landwirtschaftlichen Praxis können bisherige Ergebnisse aus den Dauerversuchen bestätigt werden (u. a. KOLBE & PRUTZER 2004). Auch bei der umfangreichen Analyse von Betriebsdaten aus fast allen Bundesländern konnten ähnliche Zusammenhänge ermittelt werden (BREITSCHUH 2010; BREITSCHUH & GERNAND 2010). Hierbei wurden Daten aus 385 Betrieben mit insgesamt 685 Auswertungen aus den Jahren 1994-2010 herangezogen. Es bestanden deutliche Zusammenhänge zwischen steigenden Humussalden, ermittelt mit den unteren Werten LUFA und der N-Düngung, den N-Salden sowie besonders zu einem steigenden Tierbesatz in den Betrieben ($R^2 = 0,212^{***}$).

Ab einem Besatz von 0,5 GV/ha steigt der Anteil an Betrieben, deren Salden 300-400 kg C/ha übersteigen und damit eindeutig der Versorgungsgruppe E zuzuordnen sind. Bei einem Besatz von 1 GV/ha sind es ungefähr 50 % der Betriebe, die eine Humusversorgung von 300 kg C/ha übersteigen. Die Gesamt-N-Zufuhr liegt dann im Bereich 200-250 kg/ha und die N-Salden bei durchschnittlich 100 kg/ha (ohne N-Deposition, Abzüge entsprechend Düngeverordnung). Bei 2 GV/ha sind es dann sogar 50 % der Betriebe, deren Humussalden bereits höher als 400 kg C/ha liegen, bei einer N-Zufuhr von über 250 kg/ha und N-Salden, die auch 200 kg/ha überschreiten können. Es kann deutlich aufgezeigt werden, dass mit steigenden Humussalden die Wahrscheinlichkeit ansteigt, dass neben einer hohen N-Versorgung und hohen Tierbesatzstärken es auch zu einer Belastung durch zu hohe N-Salden kommen kann, die weit jenseits einer „ordnungsgemäßen Landbewirtschaftung“ liegen. Die Ursache für diese hohen Humussalden liegt daher nicht in der Anwendung einer „falschen“ Methode zur Humusbilanzierung (vgl. LEITHOLD 2011), sondern beruht eindeutig auf einer zu hohen Versorgung mit organischer Substanz und den Problemen, die damit verbunden sind.

Diese aufgeführten Zusammenhänge bestehen aber nicht nur bei Daten, die aus Erhebungen der konventionellen Praxis stammen, bei der meistens eine unterschiedlich hohe organische und mineralische N-Düngung angewendet wird. Im Nachfolgenden sollen hierzu auch erste Ergebnisse einer Reihe von Auswertungen aus der ökologischen praktischen Landwirtschaft herangezogen werden:

- Betriebe aus Sachsen-Anhalt (N = 15): Methode REPRO-stat, aggregierte N-Flächenbilanz Betrieb (ohne N-Deposition) (HARZER 2006)
- Dauertestflächen aus Sachsen (N = 28): Methode STAND, N-Schlag-Salden ohne N-Deposition (SEIBT 2007)
- Betriebe aus Deutschland (N = 9): Methode LUFA, aggregierte N-Schlag-Salden (SCHMIDT 2007)
- Praxisbetriebe und Flächen (Betriebe N = 8; Seeben N = 21; Wiesengut N = 12): verschiedene Methoden, N-Betriebsalden (BROCK et al. 2008)
- Gladbacher Hof (N = 52): Methode REPRO-stat, aggregierte N-Flächensalden je Jahr (ohne N-Deposition) (SOMMER 2010)

Zunächst soll auf vier unabhängig voneinander erhobene Datensätze aus verschiedenen Regionen Deutschlands verwiesen werden (Abb. 23). Zwischen den Humusbilanzsalden und den N-Salden der Dauertestflächen oder Betriebe bestehen jeweils hoch signifikante positive Beziehungen. Die ermittelten Bestimmtheitsmaße liegen zwischen 30 % und 82 %. In der Tendenz ist zu sehen, dass die N-Salden den Wert Null unterschreiten, wenn die Humussalden negative Werte annehmen. Bei Humussalden von 400 kg C/ha werden N-Salden berechnet, die im Bereich 0-100 kg N/ha liegen können.

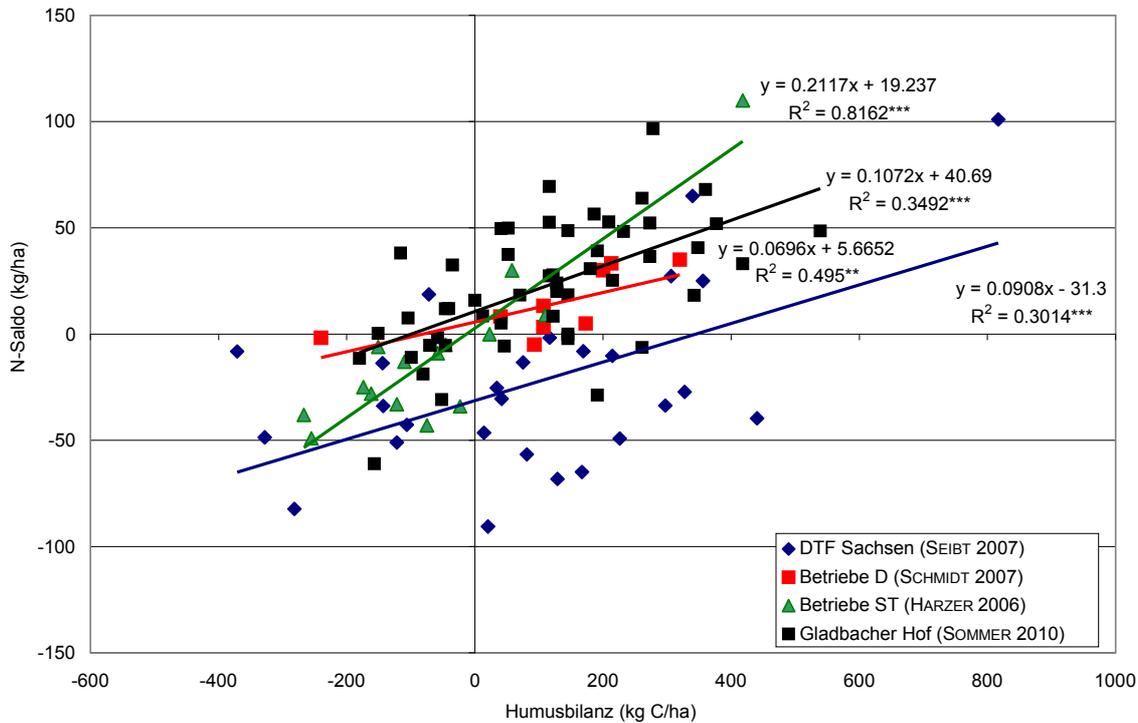


Abbildung 23: Zusammenhang zwischen den Humusbilanzen und den N-Salden, ermittelt aus Dauertestflächen Sachsens sowie aus Betriebserhebungen aus verschiedenen Regionen Deutschlands

Anhand von zwei weiteren Untersuchungen wurden die mit unterschiedlichen Methoden ermittelten Humusbilanzen den N-Salden gegenübergestellt (Abb. 24). Der Anstieg der Geraden infolge steigender Humussalden erfolgt bei Anwendung der REPRO-Verfahren jeweils etwas flacher und ist mit niedrigeren Bestimmtheitsmaßen als bei Verwendung der LUFA- oder der STAND-Methode versehen. In beiden Untersuchungen steigen die Bestimmtheitsmaße, ausgehend von den REPRO-Verfahren mit den jeweils niedrigsten Werten, über die oberen Werte der LUFA-Methode zu den unteren Werten der LUFA- und der STAND-Methode an. Auch in diesen Untersuchungen werden erneut die bereits bekannten Unterschiede in den Genauigkeiten der Methoden wiedergefunden (vgl. Tab. 9).

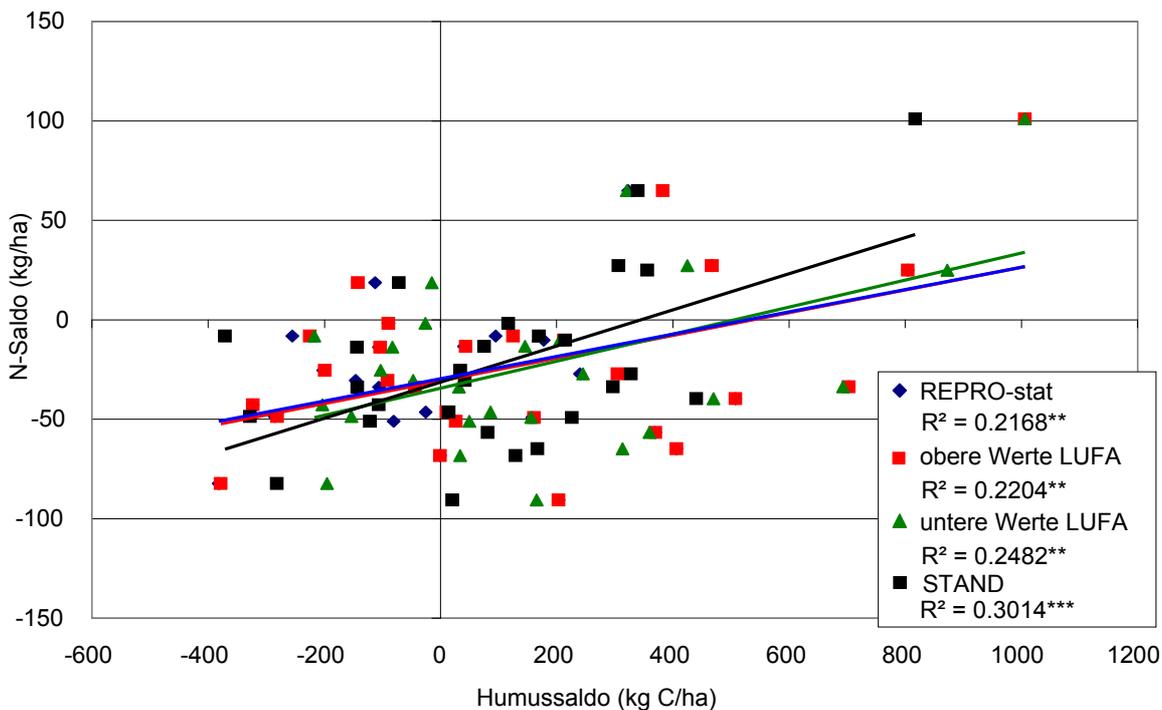
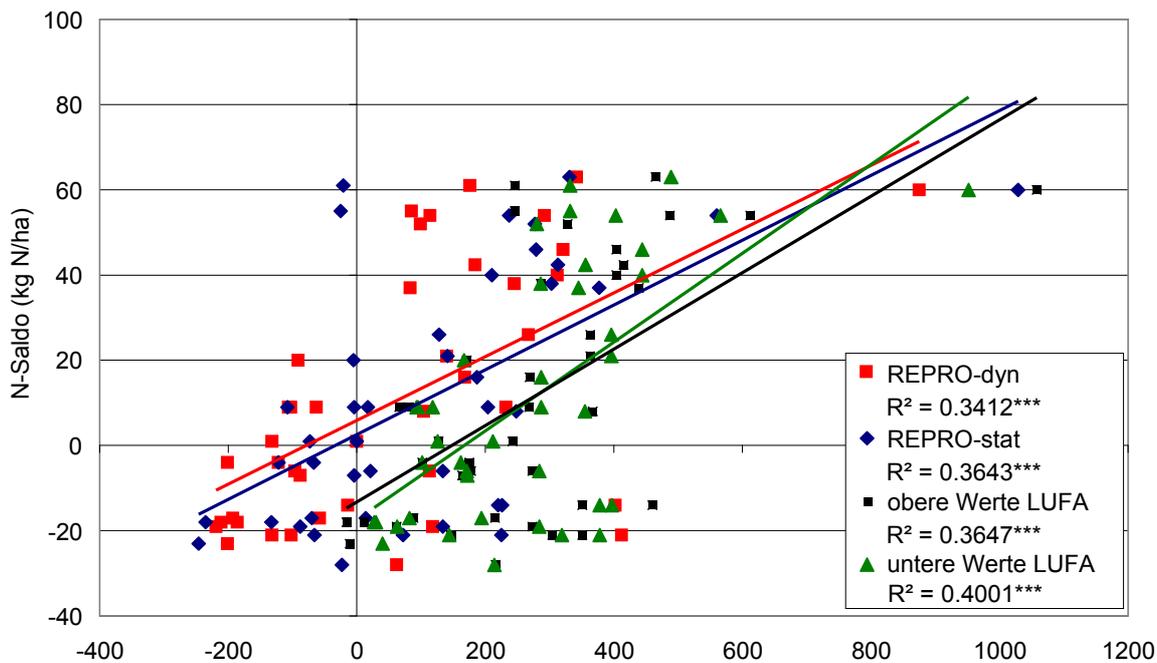


Abbildung 24: Zusammenhang zwischen den mit verschiedenen Methoden ermittelten Humussalden und den N-Salden, ermittelt in den Studien von BROCK et al. (2008) (oben) sowie den DTF in Sachsen (SEIBT 2007) (unten)

Aus den Arbeiten von HARZER (2006) und SOMMER (2010) konnte auch eine Gegenüberstellung von Humusbilanzen mit den P- und K-Salden der Flächen bzw. Betriebe aufgestellt werden (Abb. 25). Auch aus diesen Daten können meistens hoch signifikante Zusammenhänge zwischen den Merkmalen ermittelt werden. Infolge steigender Humussalden nehmen bei hoher Streuung auch die P- und K-Salden zu. Im Bereich ausgeglichener Humussalden werden auch P- und K-Salden um den Wert Null berechnet. Im Bereich um 300 kg C/ha liegen die P-Salden zwischen ca. 0-30 kg und die K-Salden zwischen ca. 0-100 kg/ha. Aus diesen Ergebnissen kann wiederum der übergeordnete Charakter der Humusbilanz erkannt werden

(vgl. Tab. 1). Auch aus diesen Untersuchungen könnten untere und obere Grenzen einer ordnungsgemäßen ökologischen Bewirtschaftung abgeleitet werden.

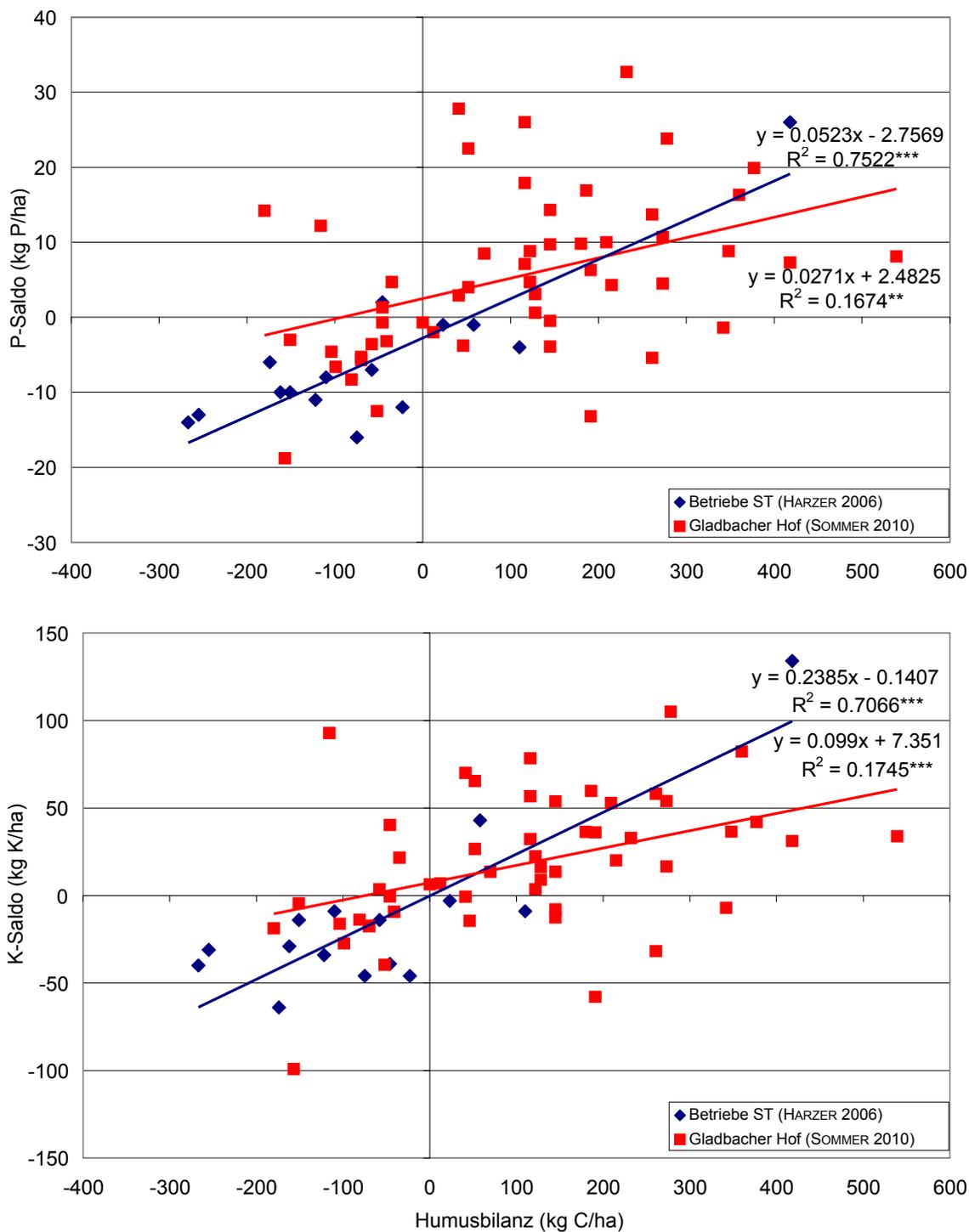


Abbildung 25: Zusammenhang zwischen den Humusbilanzen und den P-Salden (oben) und den K-Salden (unten), ermittelt aus verschiedenen Betriebsuntersuchungen

3.4.3.2 Auswertungen von Dauerfeldversuchen

Für die Situation im konventionellen Landbau wurden in Abbildung 26 entsprechende Ergebnisse von drei Humusbilanzverfahren den N-Salden aus 39 Dauerversuchen gegenübergestellt.

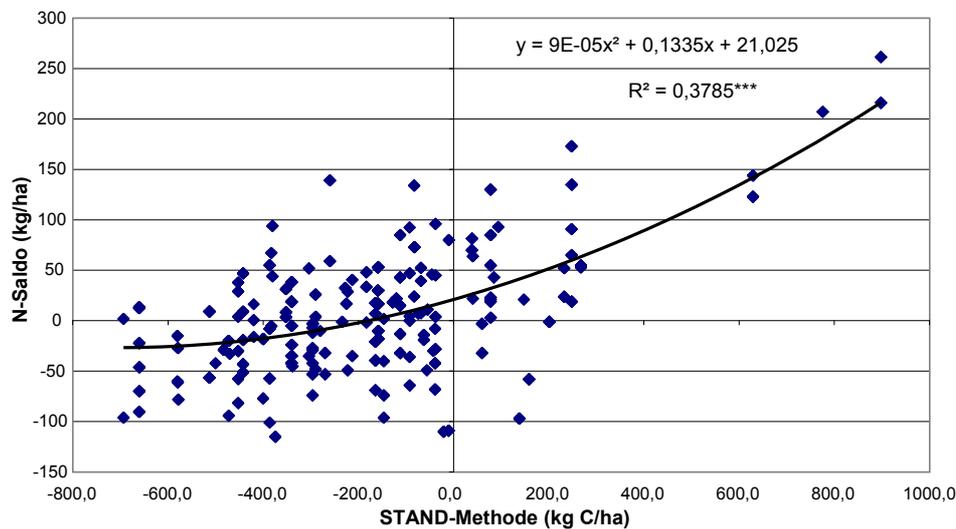
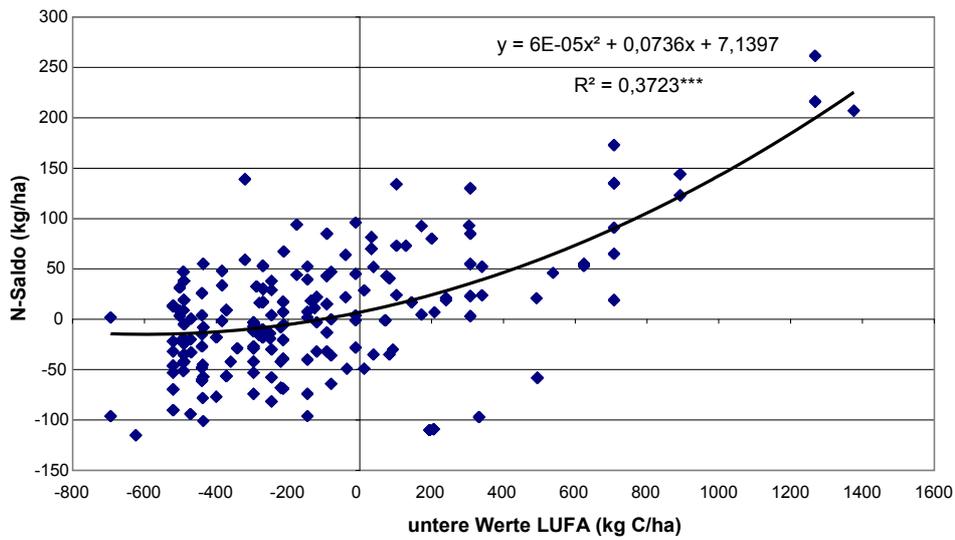
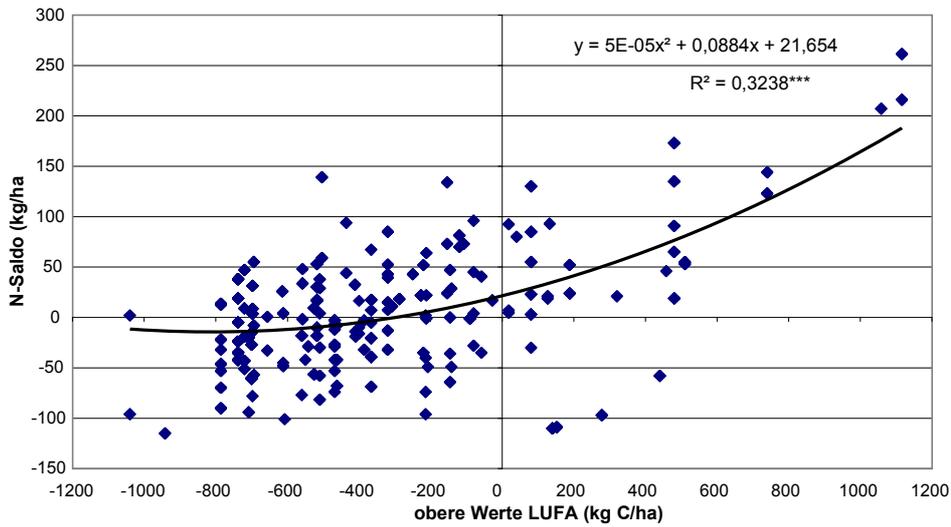


Abbildung 26: Beziehungen zwischen den Ergebnissen der Humusbilanzierung mit den oberen Werten (oben), den unteren Werten (Mitte) der LUFA-Methode und der standortangepassten Methode (unten) und den N-Salden, ermittelt aus 39 Dauerversuchen (Grenzen des VDLUFA-Bewertungssystems zwischen Versorgungsgruppe A/B = -200 kg und D/E = +300 kg C/ha)

Zwischen den Ergebnissen der Humusbilanzierung und den N-Salden bestehen positive Beziehungen hoher statistischer Güte. Zwischen 32 % (obere Werte LUFA) und 38 % (standortangepasste Methode) der Streuung können durch die Humusäquivalente erklärt werden. Mit steigenden Humusäquivalenten nehmen die N-Salden deutlich überproportional zu. Die angegebenen Grenzen zwischen den Versorgungsgruppen A/B und D/E sollen als Orientierung für deren richtige Festlegung dienen (vgl. KOLBE 2010a). Bei allen drei Bilanzierungsmethoden werden in etwa mittlere N-Salden von 0 kg/ha dann unterschritten, wenn die Versorgungsgruppe A (-200 kg C/ha) erreicht wird. Auf der anderen Seite wird die Versorgungsgruppe E (+300 kg C/ha) erreicht, wenn die N-Salden in etwa +50 kg/ha überschreiten. Hierdurch wird deutlich, dass die Festlegung der Gruppengrenzen zur Anwendung im konventionellen Landbau auch aus dem Gesichtspunkt des Umweltschutzes und der Nachhaltigkeit in Ordnung ist.

Aufgrund dieser Zusammenhänge können auch im ökologischen Landbau zur Bewertung der Grenzen der Versorgungsgruppen zur Humusbilanzierung die N-Salden herangezogen werden (Abb. 27 u. 28). Zunächst ist festzustellen, dass verhältnismäßig enge Beziehungen zwischen den berechneten Humus- und den N-Salden für die Varianten ohne N-Mineraldüngung gefunden werden. Diese Beziehungen sind deutlich enger als unter konventionellen Bedingungen einer stark ausdifferenzierten N-Mineraldüngung (vgl. Abb. 26). Darüber hinaus steigen die Bestimmtheitsmaße von der REPRO-stat-Methode über die unteren Werte der LUFA-Methode zur standortangepassten Methode an. Auch für die Bedingungen des ökologischen Landbaus scheint das Merkmal N-Saldo für die Fixierung der Bewertungsgruppen gut geeignet zu sein.

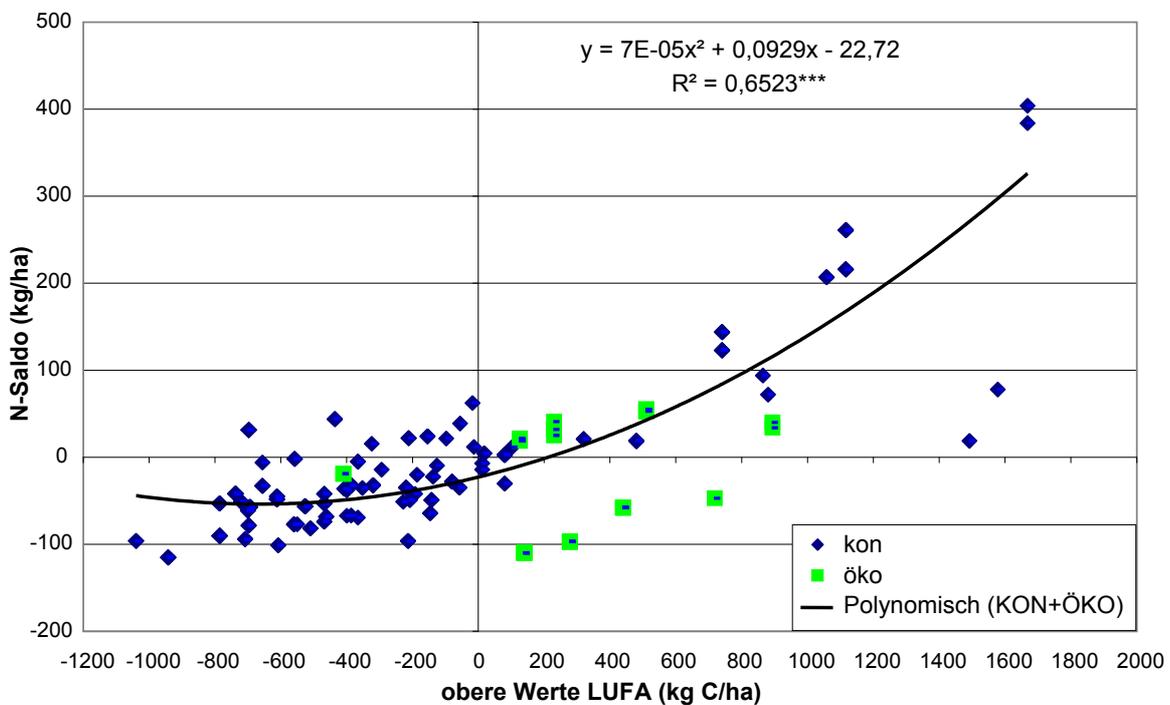
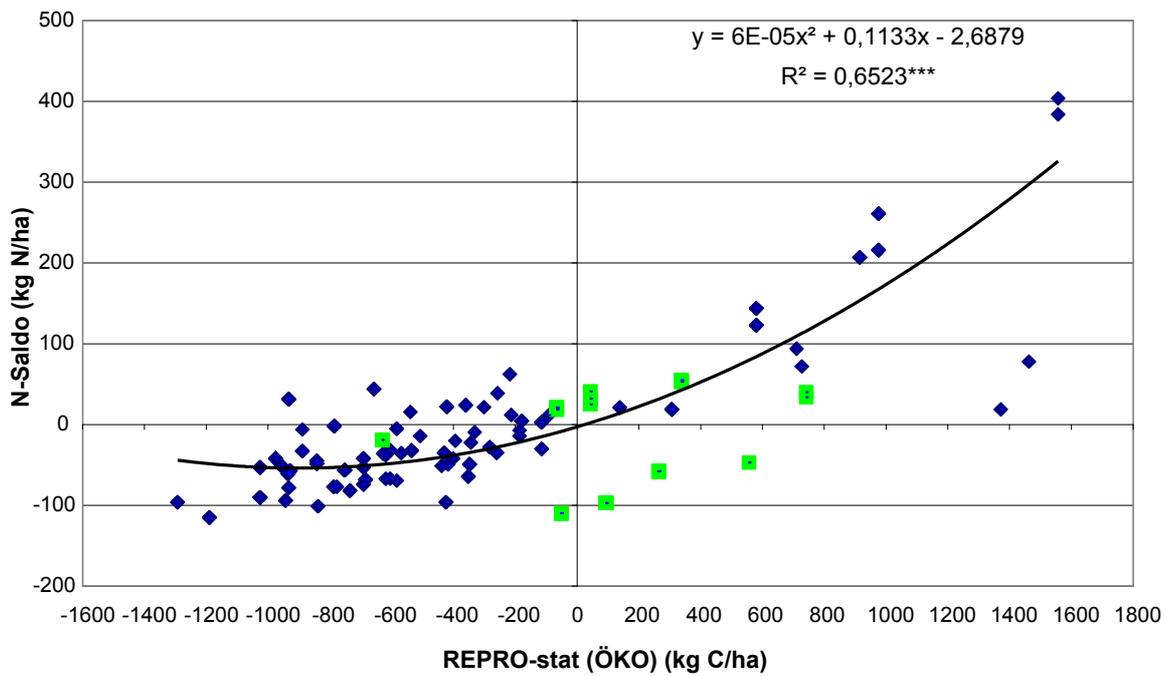


Abbildung 27: Beziehungen zwischen den mit REPRO-stat (oben) und den oberen Werten LUFA (unten) berechneten Humusäquivalenten und den N-Salden, ermittelt von den Varianten ohne N-Mineraldüngung aus 39 Dauerversuchen (Grenzen der Versorgungsgruppen A/B = -200 kg und D/E = +600 kg C/ha)

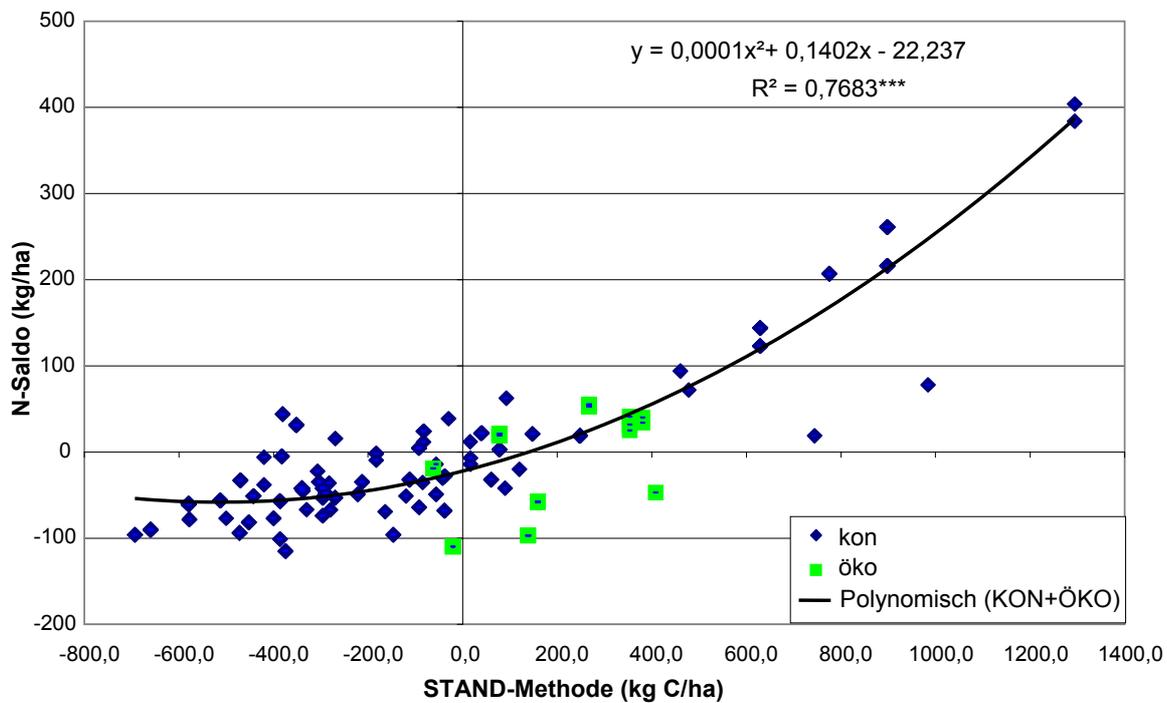
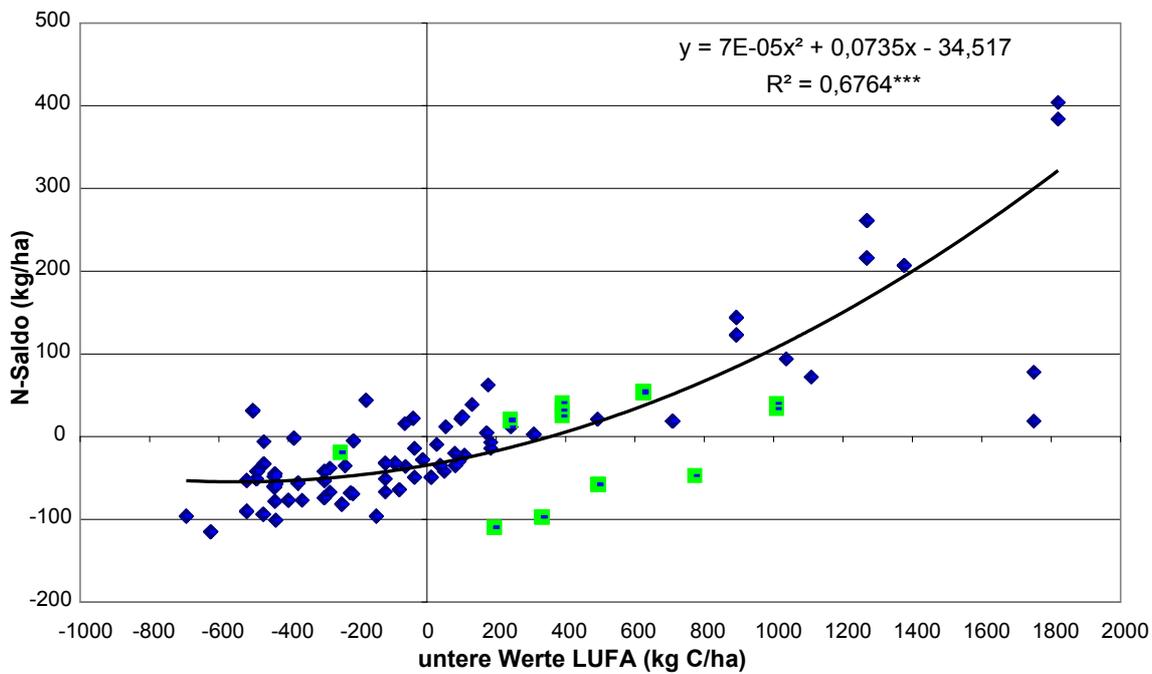


Abbildung 28: Beziehungen zwischen den mit den unteren Werten (oben) der LUFA-Methode und der standortangepassten Methode (unten) berechneten Humusäquivalenten und den N-Salden, ermittelt von den Varianten ohne N-Mineraldüngung aus 39 Dauerversuchen (Grenzen der Versorgungsgruppen A/B = -200 kg und D/E = +600 kg C/ha)

Wie aus dieser Gegenüberstellung der vier Methoden hervorgeht, sind die unteren Grenzen (Übergang von Versorgungsgruppe A zu Gruppe B) bei allen Methoden recht gut fixiert, weil hier jeweils in etwa die N-Salden den angestrebten mittleren Bereich von -50 kg/ha unterschreiten. Bei der Festlegung der oberen Grenze für den Übergang zwischen Versorgungsgruppe D und E (+600 kg C/ha) sind methodenbedingte Unterschiede festzustellen. Bei der REPRO-stat-Methode wird bei 600 kg C/ha bereits ein mittlerer N-Saldbereich von 100 kg N/ha überschritten. Für diese Methode sollten daher als Grenze deutlich niedrigere Humusäquivalente festgelegt werden. Geeignet erscheint z. B. die Übernahme des konventionellen Bewertungssystems mit einer Festlegung auf 300 kg C/ha zwischen den Versorgungsgruppen D und E, damit ein N-Saldo von +50 kg/ha nicht überschritten wird. Bei längerfristigem Einsatz dieser Methode steigt die Gefahr, dass es besonders nach Eintreten des Bodengleichgewichtes (wenn kein N mehr im Boden festgelegt wird) über deutlich höhere N-Salden zu einer Abnahme der Umweltverträglichkeit kommen kann.

Für die oberen und unteren Werte der LUFA-Methode sind die Grenzen für den Übergang zur Versorgungsgruppe E mit ausreichender Sicherheit festgelegt worden. Bei Humusäquivalenten von 600 kg C/ha werden im Allgemeinen N-Salden im Bereich um 50 kg/ha vorgefunden. Für die standortangepasste Methode kann jedoch festgestellt werden, dass offenbar ebenfalls die Grenze zwischen den Versorgungsgruppen D und E etwas hoch angesetzt worden ist. Bei einem Wert von 600 kg C/ha können bereits N-Salden im Bereich von 100 kg/ha ermittelt werden. Sollten sich diese Hinweise in Zukunft verstärken, so wäre es vorteilhaft, eventuell die Grenze zwischen diesen beiden Gruppen z. B. auf 400 kg C/ha herabzusetzen, wie es vom Autor bereits allgemein für bestimmte Standorte und Anbauverfahren im Ökolandbau vorgeschlagen wurde (KOLBE & KÖHLER 2008; vgl. Abb. 3).

Die zunehmende N-Versorgung bei hohem Versorgungsgrad und Zufuhr an organischer Substanz kommt zustande, weil aus genauen experimentellen Auswertungen von Dauerversuchen ermittelt worden ist, dass es bei steigender durchschnittlicher Zufuhr zu einer überproportionalen Zunahme des mengenbezogenen Humusumsatzes kommt (siehe Kap. 3.1). Die bei diesen Auswertungsarbeiten ermittelten entsprechend differenzierten Humifizierungskoeffizienten sind in die standortangepasste Methode bereits integriert worden. Im hohen Zufuhrbereich an organischer Substanz werden bei Anwendung dieser niedrigeren Koeffizienten zwar geringere Anreicherungsraten an Humus ermittelt, weil höhere CO₂-Verluste entstehen. Gleichzeitig wird aber auch eine höhere Menge an N freigesetzt, die dann zu den geschilderten höheren N-Salden führen kann.

Wenn es darum geht, die Schlagsalden in einem gewissen Rahmen zu halten, so können Anbauverfahren mit geringer oder gar keiner N-Düngung sowie die Verfahren des Ökolandbaus eine höhere Versorgung mit organischer Substanz über höhere Humussalden anstreben. In Anbauverfahren mit hoher N-Mineraldüngung sollte eine geringere Zufuhr an organischer Substanz erfolgen, damit obere Grenzen an N-Salden nicht überschritten werden. In gewissen Grenzen kann hierdurch eine N-Mineraldüngung durch eine bessere Zuteilung an organischen Düngemitteln ersetzt werden. Dies kann allerdings nicht durch Anwendung von Methoden der Humusbilanzierung erfolgen, weil diese Verfahren hierfür viel zu ungenau sind (siehe Abb. 16 u. Kap. 3.4.1). Die meisten heute zur Verfügung stehenden Methoden zur N-Düngungsbemessung im konventionellen Landbau können aber diese aus der Mineralisation stammenden N-Mengen bisher gar nicht oder nur ungenau berücksichtigen (z. B. ALBERT et al. 2006). Daher wird es erst Fortschritte auf diesem Gebiet geben, wenn es gelingt, Verfahren für die breite Praxis zu etablieren, die über die Humusdynamik auch die N-Mineralisation besser einschätzen können. Außerdem ist zu bedenken, dass in konventionellen Anbauverfahren ein Ersatz der mineralischen N-Düngung durch entsprechende organische Düngemittel nur in gewissen Grenzen möglich ist. So ist allgemein aus vielen Versuchen bekannt, dass das höchste Ertragsniveau nur bei kombinierter mineralisch-organischer Düngung zu erreichen ist (u. a. SCHILLING 2000).

3.4.4 Humusumsatz und N-Verfügbarkeit

Die N-Verfügbarkeit speziell unter extensiveren Anbaubedingungen hängt von sehr vielen Quellen ab:

- N-Freisetzung aus frisch hinzugefügter organischer Substanz (z. B. Gründüngung, organische Düngung, EWR)
- Tonfraktion des Bodens (z. B. NH₄-N)
- N-Deposition über die Atmosphäre
- Umfang der N-Verlagerung und Auswaschung
- N-Bindung über die Leguminosen sowie asymbiotische N-Bindung
- Differenz an N_{min} zwischen Frühjahr vor der Aussaat und nach der Ernte im Herbst bzw. dem N-Entzug durch die Ernten
- N-Zufuhr aus dem Untergrund des Bodens
- N-Festlegung im Humus bzw. N-Freisetzung aus dem Humus

Von den ermittelten N-Entzügen stammt je nach Anbauverfahren ein unterschiedlich hoher Nettoanteil an Stickstoff aus der Humusumsetzung (Tab. 13). Besonders in Anbausystemen mit geringem N-Input wie z. B. den Bedingungen im Ökolandbau kann die N-Verfügbarkeit auch zu einem nennenswerten Anteil direkt von der N-Freisetzung aus dem Humus abhängen. Wie aus weiteren Auswertungen von Dauerversuchen hervorgeht, nehmen die N-Entzüge aus dem N_t-Gehalt des Boden-Humus bei hohen Schwankungsbreiten von ca. 26 kg bei keiner Düngung (= ca. 0,52 % der im Humus gebundenen N_t-Menge je Jahr) bis auf ca. 16 kg bei einer mittleren N-Gesamt-Zufuhr von 100-149 kg N/ha ab. Vom Ertrag des Hauptproduktes sind das ungefähr 52 % des N-Entzuges bei keiner Düngung und ca. 14 % des Entzuges bei einer mittleren Düngung.

Der Ökolandbau weist N-Entzugswerte zwischen 55 kg und 141 (Mittelwert 89) kg N/ha auf (KOLBE 2000), sodass in diesen Systemen mit geringer bis mittlerer N-Zufuhr über organische Düngemittel lediglich mittlere N-Freisetzungsanteile aus dem Humus zwischen 14 % und 21 % des durchschnittlichen N-Entzuges angenommen werden können. Systeme ganz ohne N-Zufuhr kommen nur als spezielle Standard-Varianten in Dauerversuchen vor und die N-Freisetzung aus dem Humus umfasst dann einen höheren Anteil der N-Entzüge. Die Varianten mit mittlerer bis hoher Düngung kennzeichnen demgegenüber die Situation im konventionellen Landbau. In diesen Systemen spielt die N-Freisetzung aus dem Humus nur eine untergeordnete Rolle (Tab. 13).

Tabelle 13: Einfluss steigender Gesamt-N-Zufuhr aus organischer und mineralischer Düngung auf die N-Entzüge sowie die C_{org}- und N_t-Differenzmengen des Bodens, ermittelt aus ca. 240 Dauerfeldversuchen Mitteleuropas

Variantengruppe Gesamt-N-Zufuhr (kg N/ha x a)	N-Entzug (kg N/ha x a)	C _{org} -Mengen Anzahl Varianten	C _{org} -Differenz (kg C/ha x a)	Standard- abweichung	N _t -Mengen Anzahl Varianten	N _t -Differenz (kg N/ha x a)	Standard- abweichung
0	50,9	191	-243,9	469,7	143	-25,8	36,4
1 - 49	69,8	179	-153,6	396,7	105	-21,8	25,8
50 - 99	94,8	513	-151,6	545,6	368	-19,9	46,6
100 - 149	112,5	444	-19,8	456,4	349	-16,2	43,5
150 - 199	137,1	319	-62,7	673,2	266	-16,4	58,8
200 - 299	147,5	238	109,9	855,7	208	7,4	56,2
> 300	173,3	105	1152,5	2400,1	91	51,9	115,1
N		1989			1530		

In weiteren Auswertungen der Dauerversuche werden die Gesamt-N-Zufuhren den experimentell ermittelten N-Entzügen gegenübergestellt (Abb. 29). Mit steigenden N-Zufuhren ist eine überproportionale Zunahme der N-Salden von hoher statistischer Güte zu erkennen ($R^2 = 79\%$). Die Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass bei Berücksichtigung der üblicherweise anzurechnenden N-Herkünfte bei der Schlagbilanz (siehe KOLBE & KÖHLER 2008), es trotzdem auch zu deutlich

negativen N-Salden insbesondere im Bereich zwischen 0 kg und 100 kg/ha Gesamt-N-Zufuhr kommen kann. Im Bereich ohne N-Zufuhr können N-Salden ermittelt werden, die im Durchschnitt des gesamten Zeitrahmens der Versuche (Mittelwert von über 20 Jahren) ungefähr zwischen 0 kg und -100 kg/ha und Jahr liegen können (Mittelwert ca. -55 kg/ha, Abb. 29).

Nach Anrechnung von ca. 25 kg N/ha aus dem Bodenfonds (siehe Tab. 13) aus noch jüngeren Versuchen, in denen noch kein Humusgleichgewicht erreicht wurde, müssen von den Pflanzen aus tieferen Bodenschichten und dem Untergrund sowie über die Deposition aus der Atmosphäre im Durchschnitt der Versuche N-Mengen von ca. 35 kg/ha und Jahr zugeführt worden sein. Aus relativ alten Dauerversuchen, in denen die C_{org} -Gehalte nicht mehr abnehmen bzw. sich nicht mehr verändern, muss der gesamte N-Entzug von ca. 50 kg/ha und Jahr aus dem Untergrund und aus der Deposition stammen (vgl. KÖRSCHENS & MAHN 1995).

Besonders durch diese zusätzlichen, kaum abschätzbaren N-Quellen aus dem Untergrund werden Bemühungen zur Quantifizierung und Modellierung der N-Verfügbarkeit nochmals erschwert, weil diese Quellen in extensiveren Anbauverfahren mit geringer N-Zufuhr und periodischem Anbau von Tiefwurzlern (z. B. Luzerne) einen auch dauerhaft erheblichen Umfang annehmen können (vgl. KRISTENSEN et al. 2006). Hierin ist die Ursache zu sehen, dass diese ökologischen Anbauverfahren schon in wenigen Jahren nach der Umstellung erhebliche N-Mengen auch aus dem Untergrund entnehmen können (KOLBE et al. 1999).

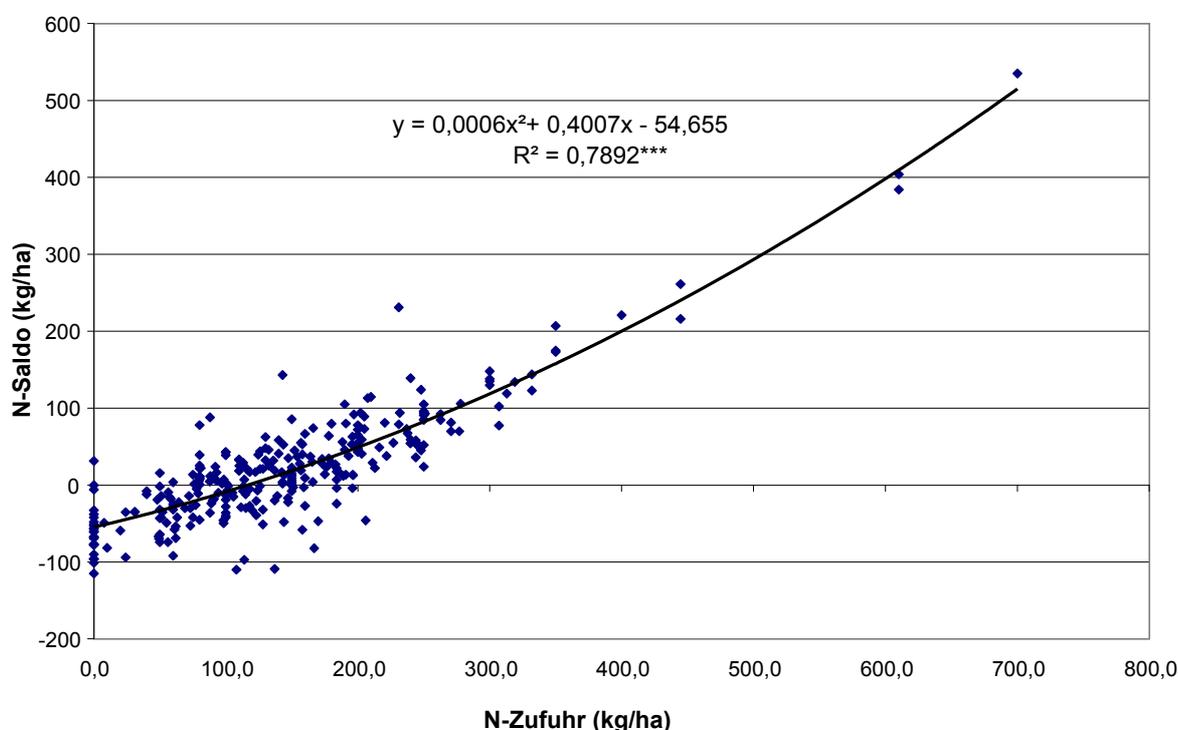


Abbildung 29: Beziehung zwischen Gesamt-N-Zufuhr und N-Saldo aus 39 Dauerversuchen (ohne Berücksichtigung der N-Herkünfte aus Deposition, N_T -Saldo Boden und N-Zufuhr aus dem Untergrund)

Wie in Abbildung 30 zu sehen ist, kommt es durch abnehmende Hackfruchtanteile (bzw. steigende Getreideanteile) in der Fruchtfolge zu keiner deutlich gerichteten Veränderung der C_{org} - und N_T -Differenzen im Boden. In diesen Standard-Varianten (ohne Zufuhr an organischen Materialien) weisen die Anbauverhältnisse leicht negative Werte um 196-396 kg C und eine Abnahme von 19-30 kg N/ha x a auf. Die Streuung der Werte, hervorgerufen durch andere Faktoren, ist so groß, dass lediglich Bestimmtheitsmaße zwischen 0,3 % und 10 % für die Entwicklung der C_{org} - und zwischen 0 % und 39 % für die Entwicklung der N_T -Mengen dokumentiert werden können. Die Abbildungen vermitteln den Anschein, dass mit steigenden N-Entzügen der Humusabbau nur geringfügig intensiviert wird.

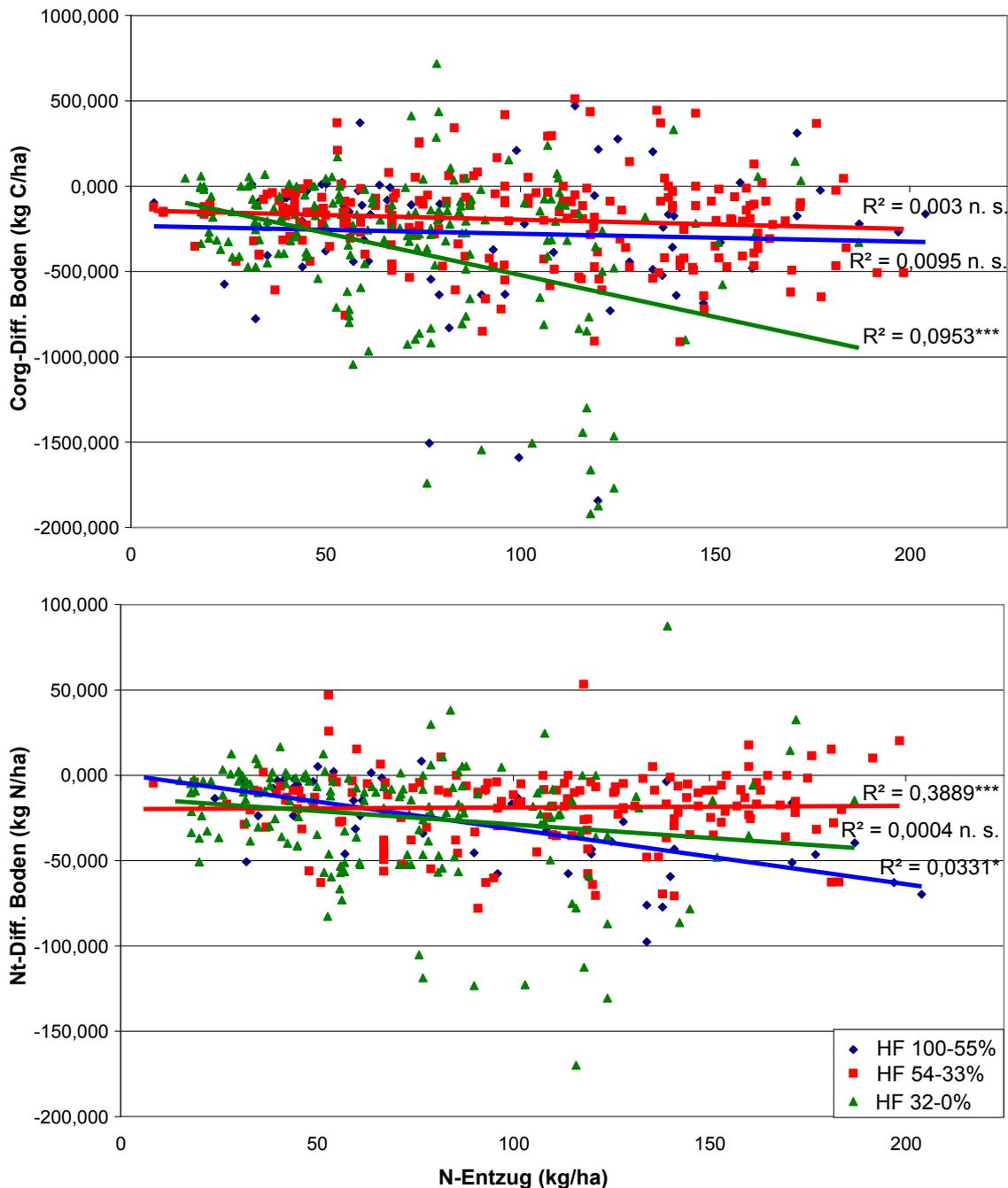


Abbildung 30: Zusammenhang zwischen den N-Entzügen der Standard-Varianten mit unterschiedlichen Hackfrucht- (HF- bzw. reziprog Getreide-)Anteilen in der Fruchtfolge (ohne Leguminosen- und Ackerfutter sowie ohne Varianten mit organischer Düngung) und der Entwicklung der C_{org} - (oben) und N_t -Mengen (unten) aus 240 Dauerversuchen Mitteleuropas (479 C_{org} -, 381 N_t -Standard-Varianten)

Als Schlussfolgerung aus diesen Ergebnissen scheint auf Grund der Vielzahl an Quellen und der großen Streuung eine quantitative Rückrechnung der Humusumsetzung aus der über den Ertrag und den N-Entzug der Fruchtarten entzogenen N-Mengen kaum möglich zu sein (vgl. BROCK 2009; BROCK et al. 2012). Im Durchschnitt dürfte der N-Anteil aus dem Humus nicht größer als 20 % des Ernteentzuges betragen. Außerdem widerspricht diese Vorgehensweise den fachlichen Grundlagen. Es erscheint nur in ganz engen Grenzen durch eine Pflanzenart möglich zu sein, auf den Humusumsatz überhaupt einen aktiven Einfluss ausüben zu können. Aus weiteren Modellanalysen ist bekannt, dass zwischen dem aktuellen N-Entzug der Pflanzen eines Jahres und der berechneten N-Mineralisation kaum statistische Beziehungen bestehen (FRANKO et al., in Vorbereitung). Der Einfluss von Qualität und Menge an zugefügter organischer Substanz sowie die Standortfaktoren Boden und Klima sind demgegenüber ausschlaggebend für den Humusumsatz.

Der aktive Einfluss der Pflanzenarten auf diesen Vorgang (ein Teil der Nährstoffmobilisierung) ist daher nur von untergeordneter Relevanz. Steigende N-Entzüge tragen nur tendenziell zu höheren Humusabbauraten bei. Außerdem wird der anbauspezifische Anteil, der über eine unterschiedlich aktive Bodenbearbeitung z. B. zwischen Getreide- und Hackfruchtanbau abgeleitet wird, offensichtlich ebenfalls überschätzt. Auch nach jüngeren Auswertungen von Dauerversuchen mit verschiedener intensiver Bodenbearbeitung (KRAWUTSCHKE 2007) werden auf lange Sicht im Durchschnitt nur geringe Unterschiede in den Humusmengen zwischen den Bodenbearbeitungsvarianten ermittelt. Ob es zu Veränderungen der Humusmengen kommt, ist offenbar ebenfalls von bestimmten Standortfaktoren abhängig.

Durch Nutzung von Fruchtarten-Koeffizienten von Humusbilanzmethoden zur Bestimmung der aus dem Humus stammenden N-Menge kann es daher zu deutlichen Fehlkalkulationen bei der Berechnung von N-Bilanzen kommen. So wird z. B. einer Hackfrucht über den deutlich negativen Humifizierungskoeffizient ein hoher „Humusbedarf“ zugewiesen, woraus dann auf Grund des unterstellten starken Humusabbaus eine erhebliche N-Freisetzung kalkuliert wird (ABRAHAM 2001; HARZER 2006). So wurden nach HEINITZ et al. (2010) für Hackfrüchte wie z. B. der Zuckerrübe eine N-Freisetzung aus dem Humusabbau von annähernd 100 kg/ha und Jahr und deshalb exorbitant hohe N-Salden für dieses Anbauglied berechnet, die im Vergleich zu anderen Methoden (BEFU) bei den Hackfrüchten und Mais nicht nachzuweisen waren. Diese freigesetzten N-Mengen werden auch im Boden nicht wiedergefunden (z. B. N_{\min} -Differenz).

Außerdem ist zu bedenken, dass eine Nettofreisetzung aus bzw. eine Zufuhr von Stickstoff in den Bodenfonds nur erfolgt, wenn die Humusdynamik nicht im Gleichgewicht ist, also nur jeweils in den ersten Jahren nach einer deutlichen Änderung der Fruchtfolge. Wird aber die Anbausequenz für einen längeren Zeitabschnitt fortgeführt, wie dies im Durchschnitt der o. a. Betriebsanalysen der Fall war, dann wird im Boden zwischen Humusabbau und -aufbau ein Gleichgewicht erreicht, und es findet aus diesen Anbaugliedern (ohne N-Zufuhr über Leguminosen) keine Nettofreisetzung an Stickstoff mehr statt. Um hier zu verlässlichen Berechnungen zu kommen, sind jeweils zwei Analysen erforderlich (s. KOLBE 2009b).

Diese Ergebnisse führen dann zu der Erkenntnis, dass das Prinzip der Humusbilanzierung, wie es in Abbildung 1 niedergelegt worden ist, aus wissenschaftlicher Sicht und auch in der praktischen Anwendung kritisch zu hinterfragen ist. Eine Fruchtart kann keinen „Bedarf an Humus“ bzw. daraus freigesetztem N haben. Dieser Prozess kann, wenn überhaupt, durch die Fruchtart nur in einem geringen Umfang gesteuert werden.

Der hauptsächliche Wirkungsprozess läuft genau andersherum ab. Der Standort zeichnet sich über Boden- und Klimafaktoren durch eine spezifische Umsatzaktivität aus. Die Pflanzenarten bringen in diesen Prozess im Wesentlichen unterschiedliche Mengen und Qualitäten an Ernte- und Wurzelreste ein und unterscheiden sich eventuell noch etwas in der Intensität des Anbaugliedes und der Bodenbearbeitung. Die daraus freigesetzte N-Menge kann dann von den Pflanzen der nachfolgenden Fruchtart zur Ertragsbildung aufgenommen werden. Auf diesem Weg kommt man schließlich zu einer etwas anderen fachlichen Ansicht über das Prinzip der Humusbilanzierung (Abb. 31), was den Bedingungen in der Realität sicherlich näher kommt und auch aus didaktischer Sicht günstiger erscheint. In vereinfachter Form liegt diese Sichtweise nicht nur den eigenen Arbeiten zur Verbesserung der LUFA-Methode und des CCB-Verfahrens zugrunde, sondern ist auch allgemeine Basis der Ansicht über die Funktionsweise der dynamischen Simulations-Modelle (vgl. NIEDER et al. 2003).

Humuszufuhr	—	Humusabbau	=	Humussaldo
Reproduktionsleistung organischer Materialien (Ernte- und Wurzelrückstände, organische Dünger)		Wirkung von Bodenart, Klima und Anbauverfahren		Veränderung der Humusvorräte des Bodens

Abbildung 31: Prinzip der Humusbilanzierung (KOLBE 2007a)

Die Hackfrucht Zuckerrübe führt als Ergebnis dieser Überlegungen nicht zu einer Freisetzung hoher Mengen an Stickstoff, sondern der Humussaldo ist bei dieser Fruchtart deshalb relativ niedrig, weil in diesem Anbauglied im Vergleich zur Umsetzungsgeschwindigkeit im Wesentlichen über die nur geringe Hinterlassung an Ernte- und Wurzelresten eine sehr niedrige Zufuhr an organischer Substanz erfolgt.

Die Reproduktionskoeffizienten der Fruchtarten und organischen Materialien können daher auch als Ergebnis von Umsetzungsraten angesehen werden. Sie geben die (relativen) Mengen an organischer Substanz an, die sich bei stetigem Anbau einer Fruchtart (Monokultur) oder stetiger und gleich hoher Verabreichung als Gleichgewichtsmengen zwischen Zufuhr und Abbau im Boden einstellen. Werden Anbau oder Zufuhr beendet, so erfolgt entsprechend der Umsetzungsaktivität des Standortes wieder eine Veränderung bzw. Abnahme der Mengen bis auf das Ausgangsniveau und bis sich wieder ein neues Gleichgewicht einstellt.

3.5 Vergleich von Berechnungsergebnissen verschiedener Standorte

In diesem Kapitel werden Unterschiede zwischen einigen geprüften Methoden mit Hilfe von Kalkulationsbeispielen aufgezeigt. Hierzu werden die Methoden herangezogen, die auf Grund der bisherigen Ergebnisse eine verhältnismäßig vertrauenerweckende Anwendung versprechen. Die STAND-Methode wurde als Vergleichsmaßstab gewählt, weil sie bisher bei vielen Kriterien als die genaueste Methode anzusehen ist (Tab. 14). Die Auswahl der Standorte erfolgte auf Basis der Tabelle 3. Es werden allerdings aus Standortgruppe 1 nur Sandböden betrachtet, in den Gruppen 2-5 nur leichte bis mittlere Böden und in den Gruppen 5 und 6 auch schwere Böden. Alle anderen aufgeführten Böden werden nicht in die Untersuchung einbezogen.

Tabelle 14: Vergleich von Berechnungsergebnissen der unteren und oberen Werte der LUFA-Methode mit der STAND-Methode von ökologischen und konventionellen Beispielen des Getreideanbaus (Auswahl von leichten Böden in Gruppe 1 bis schwere Böden in Gruppe 6, siehe Tab. 3)

Methode	Standortgruppe 1		2		3		4		5		6	
Getreide mit Strohabfuhr (konventioneller und ökologischer Landbau)												
STAND	-30	-130	-230	-180	-280	-280	-420					
Untere Werte LUFA	-280	-280	-280	-280	-280	-280	-280					
Obere Werte LUFA	-400	-400	-400	-400	-400	-400	-400					
Getreide (40 dt/ha) mit Strohzufuhr (4,4 t/ha, Korn/Stroh-Verh. 1,1) (ökologischer Landbau)												
STAND	-30	-130	-230	-180	-280	-280	-420					
	299	299	299	299	299	299	299					
	269	169	69	119	19		-121					
Untere Werte LUFA	-280	-280	-280	-280	-280	-280	-280	-280	-280	-280	-280	-280
	484	484	484	484	484	484	352 ¹⁾	484	484	352 ¹⁾	484	352 ¹⁾
	204	204	204	204	204	204	72	204	204	72	204	72
Obere Werte LUFA	-400	-400	-400	-400	-400	-400	-400	-400	-400	-400	-400	-400
	484	484	484	484	484	484	352 ¹⁾	484	484	352 ¹⁾	484	352 ¹⁾
	84	84	84	84	84	84	-40	84	84	-40	84	-40
Getreide und Strohzufuhr (standortgemäße Erträge, ökologischer Landbau)												
Ertragsniveau (dt/ha):	25 dt	30	35	40	45	55						
Strohzufuhr (t/ha):	2,75	3,30	3,85	4,40	4,95	6,05						
STAND	-30	-130	-230	-180	-280	-420						
	229	224	261	299	336	411						
	199	94	31	119	56	-9						
Untere Werte LUFA	-280	-280	-280	-280	-280	-280	-280	-280	-280	-280	-280	-280
	303	363	424	484	545	396 ¹⁾	666	484 ¹⁾	666	396 ¹⁾	666	484 ¹⁾
	23	83	144	204	265	116	386	204	386	116	386	204
Obere Werte LUFA	-400	-400	-400	-400	-400	-400	-400	-400	-400	-400	-400	-400
	303	363	424	484	545	396 ¹⁾	666	484 ¹⁾	666	396 ¹⁾	666	484 ¹⁾
	-97	-37	24	84	145	-4	266	84	266	-4	266	84
Getreide und Strohzufuhr (Korn/Stroh-Verh. 0,8) (standortgemäße Erträge, konventioneller Landbau)												
Ertragsniveau (dt/ha):	40	50	60	70	80	90						
Strohzufuhr (t/ha):	3,2	4,0	4,8	5,6	6,4	7,2						
STAND	-30	-130	-230	-180	-280	-420						
	217	272	326	380	264	297						
	187	141	96	200	-16	-123						
Untere Werte LUFA	-280	-280	-280	-280	-280	-280	-280	-280	-280	-280	-280	-280
	352	440	528	616	704	512 ¹⁾	792	576 ¹⁾	792	512 ¹⁾	792	576 ¹⁾
	72	160	248	336	424	232	512	296	512	232	512	296
Obere Werte LUFA	-400	-400	-400	-400	-400	-400	-400	-400	-400	-400	-400	-400
	352	440	528	616	704	512 ¹⁾	792	576 ¹⁾	792	512 ¹⁾	792	576 ¹⁾
	-48	40	128	216	304	112	392	176	392	112	392	176

¹⁾ = abbauintensiver Koeffizient (80 kg C/ha); blaue Werte = Differenz ≤ 50 kg C/ha gegenüber STAND-Methode; rote Werte = Differenz ≥ 150 kg C/ha im Vergleich zur STAND-Methode; unterstrichene Werte = Saldo

Für die berechneten Humussalden werden im Bereich des ökologischen und konventionellen Getreideanbaus mit Strohabfuhr deutliche Unterschiede zwischen den Standorten ermittelt. Während für die unteren Werte der LUFA-Methode nur eine Übereinstimmung mit den Ergebnissen der STAND-Methode im Bereich der Standortgruppe 5 zu erkennen ist, trifft dies für die oberen Werte nur noch für extreme Lehm-Standorte mit hohem Humusumsatz (Standortgruppe 6) zu. Dieser Standort trifft für bestimmte Lehmböden mit engen C/N-Verhältnissen und hohem Humusabbau zu.

Auf den anderen Standortgruppen in Richtung abnehmende Ton- bzw. Feinanteile des Bodens nimmt die Übereinstimmung der LUFA-Methode mit der STAND-Methode immer mehr ab. Aus diesen Ergebnissen kann nochmals erkannt werden, dass die geringe Übereinstimmung besonders der oberen Werte der LUFA-Methode im Wesentlichen auf den experimentell nicht genügend abgesicherten Fruchtartenkoeffizienten beruht. Für die meisten Standorte treffen diese Koeffizienten nicht zu und liefern z. T. deutlich ungenaue Berechnungsergebnisse.

Die Differenz ist in Standortgruppe 1 zwischen den oberen bzw. unteren Werten LUFA und der STAND-Methode so groß, dass nur ein im gleichen Jahr zusätzlich durchzuführender Anbau von Klee gras als Gründ eckfrucht bzw. als Untersaat oder z. B. eine Strohzu fuhr zwischen 4,5 t bzw. 3,1 t/ha zu einem Ausgleich der Differenz führen würde. Aus den Ergebnissen wird sichtbar, dass man nicht alle Standorte sozusagen „über einen Kamm scheren“ kann. Einige Standorte werden durch Anwendung der LUFA-Methode stark benachteiligt (Gruppen 1-4) oder sogar z.T. deutlich besser gestellt, als sie in Wirklichkeit zu bewerten sind (Gruppe 6). Hierdurch kann es zu deutlichen Fehleinschätzungen kommen, wenn es z. B. darum geht, Abfuhrpotenziale an organischen Reststoffen (Stroh) möglichst genau zu berechnen. Oder es werden für den Ökolandbau Fruchtfolgebeispiele vorgeschlagen, die für Betriebe der meisten Standorte eher als mangelhaft einzuordnen sind.

Bei den anderen in Tabelle 14 aufgeführten Beispielen geht es um die Berechnung von Getreideanbaugliedern mit Zufuhr von Stroh unter Einbeziehung eines Durchschnittsertrages oder von standortangepassten Erträgen. Zunächst wird deutlich, dass die LUFA-Methode unter diesen mehr durchschnittlichen Anbaubedingungen jeweils im Bereich der leichten bis mittleren Böden (Gruppen 2-4) die größte Übereinstimmung mit der standortangepassten Methode aufweist. Genau aus Feldversuchsergebnissen dieser Standorte des ostdeutschen Trockenraumes stammt die experimentelle Basis der heutigen LUFA-Methode (siehe KOLBE & PRUTZER 2004).

Bei Unterstellung gleich hoher Erträge auf allen Standorten zeigen sich darüber hinaus extremere Ergebnisse mit der STAND-Methode, während die Ergebnisse der anderen Methoden dann nur Unterschiede zwischen der Verwendung unterschiedlicher Strohkoeffizienten aufweisen. Bei Beachtung der standortüblichen Erträge, wodurch die Bedingungen in der Realität deutlich besser abgebildet werden, wird demgegenüber ein genau umgekehrtes Ergebnis erzielt. Bei Verwendung der STAND-Methode werden dann unter ökologischen und konventionellen Anbaubedingungen deutlich geringere Schwankungen zwischen den Standorten vorgefunden als bei Anwendung der LUFA-Methode. Hierbei zeigt es sich, dass in der Entwicklung der STAND-Methode bei der Fixierung der Fruchtartenkoeffizienten auch die z. T. stark unterschiedlichen EWR-Mengen auf Grund der Unterschiede im Ertragsniveau der Standorte der Dauerversuche berücksichtigt worden sind (vgl. Tab. 10).

Aus den aufgeführten Ergebnissen geht weiterhin hervor, dass im Vergleich zur STAND-Methode durch die unteren Werte der LUFA-Methode oft ein zu optimistisches Bild über den Versorgungsgrad mit organischer Substanz vermittelt wird (Gruppen 5-6), während mit den oberen Werten sowohl eine etwas zu optimistische Sicht als auch eine zu pessimistische Ergebnisdarstellung insbesondere für die Standortgruppen 1-2 unter konventionellen und ökologischen Anbaubedingungen erfolgt. Zu dieser unregelmäßigen Genauigkeit trägt erheblich bei, dass außerdem bei der LUFA-Methode die Humifizierungskoeffizienten der organischen Materialien nicht ausdifferenziert sind. Besonders wenn relativ hohe Zufuhrmengen an organischen Materialien anzurechnen sind, treten unrealistische Ergebnisse auf.

So beträgt bei Standortgruppe 1 die Differenz zwischen den oberen Werten LUFA und der STAND-Methode 235 kg C/ha, was einer Unterversorgung von umgerechnet nicht ganz 3,0 t/ha und Jahr an Stroh bedeuten würde. Bei Standortgruppe 6 besteht demgegenüber eine Differenz in den Humusäquivalenten zwischen 299 kg und 515 kg C/ha (je nach verwendeten Humifizierungskoeffizienten für Stroh), was einer Überversorgung von 3,7-6,4 t/ha Stroh gleichzusetzen wäre. Bei Verwendung der unteren Werte LUFA würden sogar Strohdifferenzen zwischen 5,2-7,9 t/ha entstehen, die eingespart werden könnten, wenn man auf diesem Standort den Ergebnissen dieser Methode folgen würde.

Auf Grund dieser ersten positiven Erfahrungen wurde auf Basis der sechs Standortgruppen ein erweiterter Vergleich für Anbauverfahren mit Getreide, Kartoffeln, Mais und Klee gras durchgeführt. Die erlangten Humusbilanzen (in kg Humusäquivalente/ha) wurden mit dem Faktor 0,0005672 in C_{org} -Gehalte (% TM) umgerechnet, wodurch die durch das Anbauverfahren zu erwartende Änderung der C_{org} -Werte in 20-25 Jahren veranschaulicht werden kann (siehe Kap. 4 Schlussfolgerungen). Diese Vorgehensweise wurde gewählt, damit die erlangten Ergebnisse mit allen nachfolgend genannten Methoden zur Humusbilanzierung verglichen werden können:

- **STAND:** Anwendung ohne weitere Spezifizierung; Ergebnis ist Änderung des C_{org} -Gehaltes durch das Szenario
- **LUFA untere und obere Werte:** Anwendung ohne weitere Spezifizierung; Ergebnis ist Änderung des C_{org} -Gehaltes durch das Szenario
- **REGRESS:** zwei Berechnungen erforderlich: 1. standortangepasste Ausgangssituation für eine Fruchtfolge mit 75 % Getreide und 50 % Strohabfuhr, ca. 14 % Hackfrüchte und 11 % Leguminosen, angepasste N-Düngung; 2. Anbauszenario der zu prüfenden Fruchtart als Monokultur, angepasste N-Düngung; erhaltene C_{org} -Werte für Anbauszenario minus Ausgangssituation ergibt die zu erwartende C_{org} -Änderung
- **CCB:** Berechnungen für zwei zeitliche Perioden erforderlich: 1. standortangepasste Ausgangssituation für 20 Jahre für eine Fruchtfolge mit 75 % Getreide und 50 % Strohabfuhr, ca. 14 % Hackfrüchte und 11 % Leguminosen, angepasste N-Düngung; 2. Anbauszenario für 20-34 Jahre als Monokultur, angepasste N-Düngung; erhaltene C_{org} -Werte nach 20-34 Jahren für Anbauszenario minus Ausgangssituation nach 20 Jahren ergibt die zu erwartende C_{org} -Änderung

Aus dieser Aufstellung ist zunächst zu erkennen, dass der Aufwand zur Erstellung der veranschlagten Berechnungen von den einfachen Methoden (STAND, LUFA) über REGRESS und CCB deutlich zunimmt. So kann die Wirkung eines Anbauverfahrens (z. B. Getreide) auf die Humusbilanz bzw. die Veränderung der C_{org} -Werte im Boden nur genau berechnet werden, wenn bei den Methoden REGRESS und CCB zwei Berechnungen erstellt werden. Zunächst ist eine Ausgangssituation zu definieren, die je nach erforderlicher Faktorausstattung der Methode den Standort gut charakterisieren muss und eine möglichst durchschnittliche Bewirtschaftungsintensität enthält. Unter Beibehaltung der fixierten Standortfaktoren erfolgt danach bzw. zeitlich anschließend die Berechnung des gewünschten Bewirtschaftungsszenarios. Diese Rechenwege sind in der Regel bei Nutzung der einfachen Methoden nicht erforderlich, weil die Koeffizienten der LUFA-Methode immer auch in Relation zu einer gemittelten Ausgangssituation, die Koeffizienten der STAND-Methode in Relation zu den sechs definierten Standortgruppen zu bewerten sind.

Die verwendeten standortangepassten Erträge an Haupt- und Nebenprodukten, die organischen Düngungsmengen sowie die erhaltenen Originalergebnisse der Humusbilanzierungen wurden in Tabelle A1 im Anhang dokumentiert. Zunächst wurden zwischen allen getesteten Methoden die mittleren Korrelationen und Standardabweichungen über die zu bewertenden Szenarien der sechs Standortgruppen ermittelt (Tab. 15).

Tabelle 15: Mittlere Korrelationskoeffizienten und Standardabweichung zwischen den Humusbilanzmethoden (Originalergebnisse in Tab. A1)

Methode	STAND	untere Werte LUFA	obere Werte LUFA	REGRESS	CCB 20 Jahre
					Korrelation (r)
STAND		0,871	0,953	0,973	0,147
untere Werte LUFA	0,2594		0,971	0,840	0,601
obere Werte LUFA	0,2893	0,3094		0,938	0,410
REGRESS	0,2483	0,2723	0,3019		0,136
CCB 20 Jahre	0,1828	0,2078	0,2491	0,1955	
	Standardabweichung (S)				

Durch Auswahl möglichst hoher mittlerer Korrelationskoeffizienten und einer möglichst niedrigen Standardabweichung konnte eine Rangfolge der Methoden ermittelt werden. Für das STAND-Verfahren konnte die günstigste Kombination, gefolgt von den unteren Werten LUFA und dem CCB-Verfahren, erreicht werden. Daher wurde wiederum das STAND-Verfahren bestimmt, mit dem alle anderen Methoden in ihren Szenario-Wirkungen verglichen werden (Tab. 16).

Tabelle 16: Ermittelte C_{org} -Differenzen (% TM) sowie Standardabweichungen (S) zwischen der STAND-Methode und den anderen zu testenden Humusbilanzverfahren, ermittelt für Anbauverfahren mit Getreide, Kartoffeln, Klee gras und Mais im konventionellen Landbau

Methode	Szenario	Standortgruppe						MW	S
		1	2	3	4	5	6		
LUFA	Getreide -Stroh	-0,142	-0,085	-0,028	-0,057	0,000	0,079	-0,039	0,0757
untere	Getreide +Stroh	-0,065	0,011	0,086	0,078	0,153	0,251	0,086	0,1097
Werte	Kartoffeln	-0,142	-0,085	-0,028	-0,057	0,000	0,080	-0,039	0,0760
	Kartoffeln +Stalldung	0,085	0,188	0,244	0,261	0,318	0,443	0,257	0,1207
	Klee gras Hauptkultur	-0,142	-0,085	-0,029	-0,057	0,000	0,079	-0,039	0,0756
	Klee gras Anbaujahr	-0,142	-0,085	-0,028	-0,057	0,000	0,079	-0,039	0,0757
	Silomais	-0,142	-0,085	-0,029	-0,057	0,000	0,079	-0,039	0,0756
	Silomais +R.-Gülle	-0,106	-0,065	-0,004	-0,032	0,030	0,109	-0,011	0,0755
	Körnermais +Stroh	0,150	0,227	0,322	0,314	0,389	0,509	0,319	0,1249
	MW	-0,072	-0,007	0,056	0,037	0,099	0,190	0,051	0,0899
	S	0,1116	0,1259	0,1352	0,1490	0,1536	0,1723	0,1411	0,0218
LUFA	Getreide -Stroh	-0,210	-0,153	-0,096	-0,125	-0,068	0,011	-0,107	0,0757
obere	Getreide +Stroh	-0,133	-0,057	0,018	0,010	0,084	0,183	0,018	0,1096
Werte	Kartoffeln	-0,278	-0,221	-0,164	-0,193	-0,136	-0,056	-0,175	0,0760
	Kartoffeln +Stalldung	-0,051	0,051	0,107	0,125	0,182	0,306	0,120	0,1205
	Klee gras Hauptkultur	-0,028	0,029	0,085	0,057	0,114	0,193	0,075	0,0756
	Klee gras Anbaujahr	-0,085	-0,028	0,029	0,000	0,057	0,136	0,018	0,0757
	Silomais	-0,278	-0,221	-0,165	-0,193	-0,136	-0,057	-0,175	0,0756
	Silomais +R.-Gülle	-0,242	-0,201	-0,140	-0,168	-0,106	-0,027	-0,147	0,0755
	Körnermais +Stroh	0,014	0,090	0,186	0,178	0,253	0,373	0,182	0,1251
	MW	-0,143	-0,079	-0,016	-0,034	0,027	0,118	-0,021	0,0899
	S	0,1121	0,1229	0,1300	0,1407	0,1443	0,1597	0,1342	0,0217

Tabelle 16: (Fortsetzung)

Methode	Szenario	Standortgruppe						MW	S
		1	2	3	4	5	6		
REGRESS	Getreide -Stroh	-0,008	-0,031	0,003	-0,034	0,011	0,064	0,001	0,0358
	Getreide +Stroh	-0,002	-0,011	0,020	-0,038	-0,014	0,023	-0,004	0,0229
	Kartoffeln	0,051	-0,067	0,007	-0,024	0,033	0,106	0,018	0,0603
	Kartoffeln +Stallung	-0,063	-0,165	-0,090	-0,137	-0,072	-0,011	-0,090	0,0550
	Kleegras Hauptkultur	-0,059	-0,101	-0,056	-0,098	-0,028	0,040	-0,050	0,0522
	Kleegras Anbaujahr	0,054	0,012	0,058	0,015	0,085	0,153	0,063	0,0521
	Silomais	-0,048	-0,155	-0,093	-0,109	-0,052	0,042	-0,069	0,0673
	Silomais +R.-Gülle	-0,052	-0,215	-0,158	-0,173	-0,136	-0,046	-0,130	0,0679
	Körnermais +Stroh	-0,001	-0,033	0,024	-0,018	0,030	0,097	0,017	0,0462
	MW	-0,014	-0,085	-0,032	-0,068	-0,016	0,052	-0,027	0,0511
S	0,0450	0,0785	0,0709	0,0630	0,0656	0,0612	0,0614	0,0146	
CCB	Getreide -Stroh	-0,096	0,041	0,100	0,070	0,133	0,209	0,076	0,1023
20 Jahre	Getreide +Stroh	-0,171	-0,047	-0,013	0,004	0,040	0,153	-0,006	0,1063
	Kartoffeln	0,188	0,340	0,392	0,398	0,448	0,545	0,385	0,1188
	Kartoffeln +Stallung	-0,057	0,054	0,097	0,156	0,182	0,306	0,123	0,1232
	Kleegras Hauptkultur	-0,545	-0,409	-0,359	-0,369	-0,320	-0,241	-0,374	0,1013
	Kleegras Anbaujahr	-0,432	-0,296	-0,245	-0,256	-0,207	-0,128	-0,261	0,1013
	Silomais	-0,102	-0,026	-0,029	-0,036	-0,036	-0,046	-0,046	0,0284
	Silomais +R.-Gülle	-0,042	0,079	0,095	0,109	0,129	0,231	0,100	0,0880
	Körnermais +Stroh	0,064	0,207	0,242	0,357	0,377	0,550	0,300	0,1670
	MW	-0,133	-0,006	0,031	0,048	0,083	0,175	0,033	0,1041
	S	0,2288	0,2310	0,2296	0,2523	0,2491	0,2768	0,2421	0,0363

Tabelle 16: (Fortsetzung)

Methode	Szenario	Standortgruppe						MW	S
		1	2	3	4	5	6		
CCB	Getreide -Stroh	-0,140	0,031	0,091	0,068	0,134	0,214	0,066	0,1190
30 Jahre	Getreide +Stroh	-0,202	-0,042	-0,004	0,033	0,072	0,203	0,010	0,1338
	Kartoffeln	0,147	0,337	0,388	0,409	0,458	0,563	0,384	0,1389
	Kartoffeln +Stallung	-0,075	0,080	0,120	0,213	0,235	0,386	0,160	0,1567
	Kleegras Hauptkultur	-0,576	-0,407	-0,358	-0,357	-0,309	-0,226	-0,372	0,1171
	Kleegras Anbaujahr	-0,463	-0,294	-0,244	-0,244	-0,196	-0,113	-0,259	0,1171
	Silomais	0,033	0,199	0,252	0,223	0,281	0,352	0,223	0,1073
	Silomais +R.-Gülle	-0,070	0,084	0,102	0,130	0,153	0,265	0,111	0,1090
	Körnermais +Stroh	0,064	0,243	0,280	0,426	0,446	0,644	0,351	0,1998
	MW	-0,142	0,026	0,070	0,100	0,142	0,254	0,075	0,1332
	S	0,2401	0,2436	0,2423	0,2653	0,2605	0,2837	0,2543	0,0296

Blau = max. $\pm 0,065$ % C_{org} ; Rot = über $\pm 0,200$ % C_{org} ; Gleichung: C_{org} -Wert d. zu testenden Methode minus STAND-Methode; MW = Mittelwert; S = Standardabweichung

Zunächst kann an den dargestellten Farben die durchschnittliche Güte der Übereinstimmung der Ergebnisse mit der gewählten Vergleichsmethode (STAND) in Augenschein genommen werden. So besteht zwischen den mehr auf mathematisch-statistischen Prinzipien aufbauenden Methoden (STAND, LUFA, REGRESS) insgesamt eine höhere Übereinstimmung als zu der Methode CCB, die auf erklärenden mathematischen Grundsätzen beruht (Prozessmodell).

Am größten ist die Übereinstimmung der Ergebnisse zwischen dem STAND-Verfahren und dem REGRESS-Modell (Tab. 16). Fast bei allen Anbauverfahren wurden lediglich Differenzen von weniger als 0,065 % C_{org} ermittelt (blau ausgewiesen, was umgerechnet einer max. Strohmenge von ca. 1,5 t/ha entspricht). Nur eine Differenz ist größer als 0,2 % C_{org} (rot ausgewiesen, was ungefähr einer durchschnittlichen jährlichen Strohernte von 4,0-5,0 t/ha entspricht). Auch die Standardabweichungen sind z. T. deutlich geringer als bei den anderen Methodenvergleichen. Lediglich bei der Einordnung des Mais als Hackfrucht sowie bei einigen organischen Düngemitteln bestehen etwas größere Differenzen. So kann im Modell REGRESS nicht zwischen der Wirkung verschiedener Hackfruchtarten unterschieden werden. Daher sind die ausgewiesenen Differenzen hier etwas größer als es mit dem Modell STAND bemessen wird. Auch zwischen den organischen Düngemitteln kann keine differenzierte Humuswirkung berechnet werden, da für verschiedene Arten an organischen Materialien lediglich eine Eingabe der Menge an verabreichter Trockenmasse erfolgt. So wird anscheinend die Humuswirkung von Stallung im Vergleich zu den anderen Methoden etwas unterschätzt. Trotz dieser Vereinfachungen sind die Übereinstimmungen als relativ hoch anzusehen.

Auch zwischen den Standortgruppen mit ihren deutlich zu unterscheidenden Anbauintensitäten (Erträge an Fruchtarten) wird eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der Methode STAND und REGRESS ermittelt. Es kann daher abgeleitet werden, dass diese stark differenzierten Standortbedingungen in beiden Modellen recht gut abgebildet werden. Es ist keine gerichtete Veränderung der ausgewiesenen Differenzbeträge zwischen den Standorten zu erkennen. Beide Methoden beruhen zwar auf mathematisch statistischen Grundsätzen, doch wurden sie mit stark unterschiedlichen Methoden ermittelt (siehe Kap. 2).

Bei allen anderen Verfahren ist mehr oder weniger eine gerichtete Veränderung der Differenzen zwischen den Standorten zu erkennen (Tab. 16). So werden besonders bei der Standortgruppe 1 z. T. deutlich negativere Differenzen berechnet als es bei der REGRESS-Methode der Fall ist. Bei den anderen Standortgruppen werden steigende Werte ausgewiesen, sodass auf Standortgruppe 6 dann relativ hohe positive Differenzen berechnet werden. Die unterschiedliche Veränderung der Humusversorgung in Abhängigkeit von den Standortbedingungen werden daher mit diesen Methoden nicht so genau wiedergegeben wie mit den Verfahren STAND und REGRESS.

So erweitern sich die Differenzen zwischen Standortgruppe 1 und 6 bei der REGRESS-Methode lediglich um 0,066 % C_{org} , während sie bei den LUFA-Methoden bereits 0,262 % C_{org} und bei dem CCB-Verfahren sogar zwischen 0,308-0,396 % C_{org} betragen. Auf den Standortgruppen 1 und 6 werden daher mit diesen Methoden die größten Abweichungen gefunden. Auf Standortgruppe 1 bei hohen C_{org} -Gehalten und weiten C/N-Verhältnissen sind daher geringere Humusverluste aufzuweisen, die im Verlauf der Standortgruppen 2-5 zunehmen, während dann auf Standortgruppe 6 relativ hohe Abbauraten zu verzeichnen sind. Dieser Standort ist gekennzeichnet durch einen Lehmboden, der verhältnismäßig niedrige C_{org} -Werte und sehr enge C/N-Verhältnisse aufweist und als Höchstertragsstandort gekennzeichnet werden kann (vgl. Tab. 3).

Auf den mittleren Standorten der Gruppen 2-5, die den überwiegenden Anteil der Standortvariation Deutschlands repräsentieren, sind die Differenzen zwischen der STAND-Methode und den anderen Verfahren nicht so groß. Neben der REGRESS-Methode, die die geringsten Abweichungen aufweist, liegen auch die Berechnungsergebnisse der unteren Werte der LUFA-Methode meistens im blauen Bereich (mit maximalen Abweichungen von $\pm 0,065$ % C_{org}). So bestehen auch relativ geringe Unterschiede in der Abbildung der Wirkung der geprüften Fruchtarten. Lediglich bei Vorlage großer Mengen an organischen Materialien wie Stroh bei den Getreide- und Maisanbauverfahren sowie bei relativ hohen Stallungsgaben bei Kartoffeln werden zu hohe Humuswirkungen registriert.

Bei den oberen Werten LUFA fällt diese übertriebene Wirkung der organischen Materialien nicht so auf, weil die Fruchtartenkoeffizienten extremere Werte aufweisen. Es muss aber die Gesamtwirkung zwischen Fruchtart und der organischen Materialien betrachtet werden. So werden für Kartoffeln Fruchtartenkoeffizienten mit deutlich negativen Werten veranschlagt. Wenn jetzt eine etwas zu positiv berechnete Stallungswirkung addiert wird, so führt das dann zu einer durchschnittlichen Gesamtwirkung im Vergleich zur STAND-Methode. Die Ursache für die insgesamt geringere Übereinstimmung liegt bei den oberen Werten der LUFA-Methode auch nach diesen Untersuchungen vor allem an den Fruchtartenkoeffizienten, deren Abstufungen zu extrem sind.

Bei den berechneten Differenzen zwischen dem CCB-Verfahren und der STAND-Methode gibt es insgesamt gesehen die geringste Übereinstimmung (Tab. 16). Zu dieser Methode werden bisher bei weitem die meisten Werte mit Differenzen von über 0,2 % C_{org} ausgewiesen (rote Werte). Die Ungenauigkeiten beruhen insbesondere auf einer stark abweichenden Wirkung der Hackfrüchte und des Futterbaus auf die Humusversorgung. So werden von allen anderen Methoden für den Kartoffelanbau deutlich negativere Beträge zwischen -0,24 % bis -0,57 % C_{org} berechnet als mit dem CCB-Verfahren, bei dem lediglich Werte von -0,16 % bis +0,06 % C_{org} ermittelt werden (siehe Tab. A1, Anhang). Als Ursache für diese deutlichen Abweichungen sind die mathematischen Grundsätze der Methode anzusehen. Hierbei werden zwar im Hackfruchtanbau die Ernte- und Wurzelrückstände in der Modellierung in Abhängigkeit vom Fruchtartertrag berücksichtigt. Keine Berücksichtigung findet dagegen bisher die erhöhte Bodenbewegung und Durchlüftung z. B. durch das Auspflanzen und Dammaufsetzen und die späteren Erntearbeiten, wodurch es über die Mineralisation zu einem verstärkten Humusabbau kommt.

Auch für den über- bis mehrjährigen Feldfutterbau werden ebenfalls sehr große Differenzen zwischen den STAND- und dem CCB-Verfahren ausgewiesen. Nach diesen Berechnungen würde bei Nutzung des CCB-Verfahrens der mehrjährige Klee grasanbau (50 % Leguminosen, 50 % Gräser) quasi zu keiner Humusanreicherung führen, während bei allen anderen geprüften Methoden eine deutliche Anreicherung der organischen Substanz des Bodens erfolgt. Für die genannten Früchte sind demnach die im CCB zu Grunde liegenden Parameter zu überprüfen. Darüber hinaus ist aber auch die im Futterbau vorzufindende Bodenruhe als Ursache dieser Differenzen anzusehen. Durch die erhöhte Bodenruhe kann es daher zu einer Verringerung des Humusabbaus kommen.

Auf diese noch im Modell CCB vorzunehmenden Optimierungsarbeiten wurde auch schon in früheren Veröffentlichungen hingewiesen. So wurde bei KOLBE & PRUTZER (2004) diese Fehlermöglichkeit bei den Hackfrüchten und bei KOLBE (2009b) eine deutlich unzureichende Berechnungsgenauigkeit für den Futterbau bei Anwendung des CANDY-Modells ermittelt. Der CANDY-Parametersatz wurde zum Aufbau des CCB-Modells übertragen (FRANKO et al., in Vorbereitung). Weil die beschriebenen Abweichungen in der Berechnungsgenauigkeit als gravierend anzusehen sind (rote Werte), kann das Modell CCB bisher für diese Anbauverfahren nicht empfohlen werden.

Für die Getreide- und Maisanbauverfahren wurden demgegenüber lediglich geringe Differenzen zwischen dem CCB-Verfahren und den anderen Methoden sowie zur Vergleichsmethode STAND ermittelt. Das trifft auch bei Anwendung der Methode für die

Standortgruppen 2-5 zu, wenn eine Zwischenfrucht und eine Gründüngung oder eine zusätzliche Gülledüngung einzubeziehen sind (siehe Tab. A1, Anhang). Somit kann für getreidebetonte Fruchtfolgen, die heute in der Landwirtschaft vorwiegend vorzufinden sind, eine Anwendung des CCB-Verfahrens auf den meisten Standorten mit Erfolg vorgenommen werden. Darüber hinaus erweist sich nach den bisherigen Ergebnissen bei der Methode CCB die Anrechnung einer 20-jährigen Szenarioperiode als ausreichend, um die Wirkung des Anbaugliedes unter praktischen Gesichtspunkten zu fixieren. Eine Einrechnung einer längeren zeitlichen Periode ist hingegen offensichtlich bereits als ungünstig anzusehen, weil die Differenzen zwischen allen anderen Methoden und dem CCB-Verfahren dann zunehmen.

Diese beschriebenen ungenauen Ergebnisse des CCB-Verfahrens konnten bei anderen Modellüberprüfungen bisher nicht herausgearbeitet werden, weil z. B. bei der Überprüfung der Modellgenauigkeit unter Verwendung der Dauerversuche meistens Datensätze zur Anwendung kamen, die aus getreidereichen Fruchtfolgen stammen. Aus diesen Ergebnissen wird deutlich, dass die Modellüberprüfungen auf einer breiten Basis an Methoden beruhen müssen.

Es ist allgemein bekannt, dass besonders in der landwirtschaftlichen Praxis große standörtliche Unterschiede in den Produktionsbedingungen auftreten. Ohne Berücksichtigung der wichtigsten Einflussfaktoren des Standortes sind daher z. B. Verfahren der Grunddüngung oder der N-Düngung kaum mit Erfolg anwendbar. Daher haben sich in diesen Bereichen in den letzten Jahrzehnten zusehends Methoden durchgesetzt, die standortangepasste Berechnungen ermöglichen.

Wie die aufgeführten Ergebnisse gezeigt haben, führt auch die Anwendung von Methoden zur Humusbilanzierung ohne Standortdifferenzierung bei einem hohen Anteil an Berechnungsbeispielen zu unrealistischen Ergebnissen (sowohl Unter- als auch deutliche Überbewertungen sind möglich). Im Ökolandbau haben diese standörtlichen Unterschiede im Allgemeinen eine noch größere Bedeutung. Aus diesen Ergebnissen kann daher zusammenfassend abgeleitet werden, dass in beiden Anbausystemen darauf geachtet werden muss, dass auch Methoden der Humusbilanzierung zur Anwendung kommen, bei denen eine möglichst genaue Berücksichtigung von Standorteigenschaften erfolgen kann.

3.6 VDLUFA-Versorgungsgruppen

Nach der Berechnung von Schlag- bzw. Betriebsbilanzen für Humus werden die erlangten Ergebnisse einer Gruppierung zugeführt, um sie bewerten zu können. Hierfür hat der VDLUFA fünf Gruppen vorgeschlagen mit einer Bewertung von sehr niedrig bis sehr hoch und einer anzustrebenden Gruppe C für eine optimale Versorgung (KÖRSCHENS et al. 2004).

In verschiedenen Studien, in denen die Versorgung landwirtschaftlicher Betriebe mit organischer Substanz berechnet wurde, sind dementsprechende Eingruppierungen der Bilanzierungsergebnisse erstellt worden (Tab. 17). Aus drei Studien geht hervor, dass je nach verwendeter Humusbilanzmethode eine z. T. deutlich unterschiedliche Verteilung der Bilanzergebnisse auf die fünf Gruppen erfolgt ist. Bei Verwendung der REPRO-stat Methode wurde eine Verteilung erlangt, die näher an einer Normalverteilung liegt, mit einer Häufung im Versorgungsbereich C und geringen Nennungen in A und E. Im Gegensatz dazu wurde mit der LUFA-Methode oft eine Einstufung mit einer schiefen Verteilung erlangt, bei der eine Betonung im Versorgungsbereich D vorliegt. Auf Grund der besseren Normalverteilung wurde aus diesen Ergebnissen dann abgeleitet, dass daher die REPRO-basierten Methoden besser für eine Eingruppierung geeignet erscheinen (u. a. VOGT-KAUTE, schriftl. Mitteilung; LEITHOLD 2011).

Hierzu ein vergleichendes Beispiel: Man stelle sich einmal vor, auch die erlangten N-Salden landwirtschaftlicher Systeme würden mit Hilfe der Normalverteilungskurve einem Bewertungssystem zugeführt werden. Es leuchtet sofort ein, dass diese Vorgehensweise zur Beurteilung von N-Salden nicht zu empfehlen ist. In diesem Fall haben sich Systeme durchgesetzt, die eine Bewertung der N-Salden an pflanzenbaulichen Gesichtspunkten sowie an bestimmten Umweltzielen (z. B. Wasserschutz) erlauben. Diese generelle Vorgehensweise sollte natürlich auch für die Aufstellung eines Bewertungssystems für die Humussalden zutreffen.

In Folge einer detaillierten Untersuchung von KOLBE & PRUTZER (2004) wurde festgestellt, dass eine Eingruppierung von Ergebnissen aus ökologisch wirtschaftenden Betrieben nach dem VDLUFA-Standard tatsächlich nicht optimal erfolgen kann. Daraufhin wurde ein etwas abgewandeltes Einstufungsschema für diese Betriebsform entwickelt (vgl. Abb. 3). Diese

verbesserte Einstufung wurde aber nicht deshalb favorisiert, weil die Ergebnisse dann besser einer Normalverteilung entsprechen, sondern auf Grund sachlogischer Zusammenhänge. Bei fehlender N-Mineraldüngung kann ein höherer Versorgungsgrad mit organischer Substanz angestrebt werden, ohne dass bestimmte Grenzen der Nachhaltigkeit und Umweltsicherung verletzt werden, als bei Betriebssystemen mit N-Mineraldüngung (siehe KÖHLER & KOLBE 2008).

Tabelle 17: Einstufung von Humusbilanzsalden in VDLUFA-Versorgungsgruppen (in %), ermittelt mit verschiedenen Methoden aus unterschiedlichen Betriebsauswertungen

Methode/Betriebsanzahl	Humusversorgungsgruppe					Unterversorgung (A + B)	Übersorgung (D + E)
	A	B	C	D	E		
REPRO-stat							
N = 74 Ökobetriebe ¹⁾	3	4	49	35	9	7	44
N = 227 Betriebe (KON + ÖKO) ¹⁾	9	17	44	22	8	26	30
VDLUFA untere Werte							
N = 74 Ökobetriebe ¹⁾	0	1	15	43	41	1	84
N = 227 Betriebe (KON + ÖKO) ¹⁾	1	1	28	42	29	2	71
N = 385 Betriebe (KON + ÖKO) ²⁾	1	1	11	45	42	2	87

¹⁾ HÜLSBERGEN zit. n. VOGT-KAUTE (schriftl. Mittg.)

²⁾ BREITSCHUH et al. (2010)

Eine derartige schiefe Verteilung liegt aber nicht nur bei der Einstufung der Ergebnisse aus den Ökobetrieben vor, sondern auch bei den Ergebnissen, die aus zwei konventionellen Betriebsstudien stammen (Tab. 17). So wird z. B. in der Untersuchung von 385 Betrieben von BREITSCHUH et al. (2010) eine extreme Anhäufung von berechneten Humussalden in den Gruppen D und E ermittelt.

Aus einer weiteren Analyse dieser Ergebnisse (siehe Kap. 3.4) besteht jedoch ein Zusammenhang zwischen den Humussalden und dem Nährstoffkreislauf für Stickstoff. Hieraus kann abgeleitet werden, dass zumindest in den Versorgungsgruppen D und E die Wahrscheinlichkeit stark ansteigt, dass gleichzeitig auch eine zunehmende Übersorgung mit Stickstoff in einer großen Anzahl von Betrieben vorliegt, die offenbar durch eine zu hohe Tierhaltung (über 2 GVE/ha) verursacht wird. Daher kann als Ursache für diese schiefe Verteilung nicht in erster Linie die Auswahl der Methode zur Humusbilanzierung verantwortlich gemacht werden, sondern eine tatsächlich vorhandene Übersorgung mit organischer Substanz, worauf dann auch die erhöhten N-Salden zurückgeführt werden können.

Wie sich diese aufgezeigten unterschiedlich genauen Berechnungsergebnisse der Humusbilanzierungsmethoden auf die landwirtschaftliche Praxis und Beratung auswirken können, kann aus einer sechsjährigen Auswertung einer hohen Anzahl an Dauertestflächen auf sächsischen Betrieben abgeleitet werden (siehe Kap. 2.3; SEIBT 2007). In Abhängigkeit von der verwendeten Methode werden bedeutende Unterschiede zwischen den berechneten Humussalden und der Einstufung entsprechend dem VDLUFA-Bewertungssystem ermittelt (Tab. 18). Zunächst kann festgestellt werden, dass für die anzustrebende optimale Versorgungsstufe C mit allen Methoden die höchsten Einstufungen gefunden werden. Doch sind es bei den REPRO-basierten Verfahren nur gut ein Drittel der Fälle, während es bei der STAND-Methode um 50 % der Flächen sind, die als optimal eingestuft werden.

Dagegen werden mit dem standortangepassten Verfahren und auch mit der LUFA-Methode untere Werte deutlich geringere Flächenanteile als unterversorgt veranschlagt als mit den anderen in diese Untersuchungen eingebundenen Verfahren. Das REPRO-dyn-Verfahren kommt hierbei sogar zu dem Ergebnis, dass annähernd 50 % der Schläge mit organischer Substanz in Sachsen als unterversorgt einzustufen sind. Gleichzeitig war dieses Verfahren auch mit einer sehr niedrigen Übereinstimmung zwischen berechneten und experimentell ermittelten Daten ausgezeichnet (vgl. Tab. 9). Je geringer die Anpassung der berechneten Ergebnisse der untersuchten Methoden an die experimentell ermittelten Werte des Bodens, der N-Bilanzkriterien und der Erträge der Fruchtarten der Dauerversuche ausfiel, umso extremer war die Verteilung der Einstufung der Bilanzergebnisse der sächsischen Dauertestflächen.

Tabelle 18: Einordnung von Humusbilanzsalden sowie der N-Salden in VDLUFA-Versorgungsgruppen in Abhängigkeit von der Untersuchungsmethode am Beispiel der konventionellen und ökologischen Dauertestflächen in Sachsen

Methode	Humusversorgungsgruppe			D	E	Unterversorgung (A + B)	Übersversorgung (D + E)
	A	B	C				
Humusbilanzsalden (in % der Flächen)							
REPRO-dyn ¹⁾	21	26	36	13	4	47	17
-stat ¹⁾	15	21	38	19	7	36	26
-stat ²⁾	16	22	36	15	11	38	26
LUFA obere Werte ²⁾	14	19	40	16	11	33	27
untere Werte ²⁾	4	11	46	26	13	15	39
STAND-Methode ²⁾	9	13	49	19	10	22	29
N-Saldo (Mittelwerte in kg N/ha)							
REPRO-stat ²⁾	3,5	23,4	28,6	31,5	30,6		
LUFA obere Werte ²⁾	4,9	22,0	27,4	31,6	31,9		
untere Werte ²⁾	-8,0	1,9	21,2	29,0	37,2		
STAND-Methode ²⁾	3,7	14,0	25,8	32,6	33,1		
N-Saldo (Anteil in % über 50 kg N/ha)							
REPRO-stat ²⁾	6	15	26	33	33	21	66
LUFA obere Werte ²⁾	6	13	26	32	36	19	68
untere Werte ²⁾	0	5	15	28	38	5	
STAND-Methode ²⁾	4	13	22	31	34	17	65

¹⁾ Dauertestflächen in Sachsen (n = 1.058) nach MÖNICKE et al. (2004)

²⁾ Dauertestflächen in Sachsen (n = 760) nach SEIBT (2007)

Aufbauend auf diesen unterschiedlichen Einstufungen können aus diesen Bilanzierungsergebnissen stark voneinander abweichende Interpretationen und Handlungsempfehlungen für die landwirtschaftliche Praxis abgeleitet werden. So kommen MÖNICKE et al. (2004) und in einer späteren Analyse von 31 Betrieben REINICKE & ALBERT (2011) bei Bevorzugung des REPRO-dyn-Verfahrens zu dem Ergebnis, dass im Durchschnitt ein Großteil der untersuchten Betriebe (zwischen 30-47 %) in die Versorgungsgruppen A und B einzustufen sind. Im Vergleich zu den anderen in Tabelle 18 dargestellten Verfahren (insbesondere den unteren Werten LUFA und der STAND-Methode), wird dadurch der Anschein erweckt, dass in Sachsen eine deutliche Unterversorgung mit organischer Substanz vorliegen müsste. Hieraus könnte dann abgeleitet werden, dass ein erheblicher Beratungsbedarf zur Erhöhung der betrieblichen Versorgung mit organischer Substanz besteht.

Was bei dieser Interpretation der Ergebnisse aber nicht bedacht wird, sind folgende Zusammenhänge: Besonders beim Einsatz der REPRO-basierten stat- und dyn-Verfahren kommt es bei 100 % Bedarfsdeckung im Durchschnitt vieler Vergleichsuntersuchungen nicht zu einer Stabilisierung der Humusgehalte auf dem bisher üblichen Niveau. Sondern es kommt (bei relativ großen Schwankungsbreiten) zu einer „erweiterten Reproduktion“, wodurch die standort- und bewirtschaftungstypischen Humusgehalte z. T. deutlich ansteigen können. Hinzu kommt außerdem, dass diese Zusammenhänge den Anwendern und in der landwirtschaftlichen Praxis nicht bekannt sind. Es wird erwartet bzw. es wird selbstverständlich davon ausgegangen, dass bei einem Versorgungsgrad von 100 % die Humusgehalte in etwa gleich hoch bleiben.

Wie weiter aus Tabelle 18 über die aufgeführten N-Parameter im Detail abgeleitet werden kann, erfolgt bei Anwendung der STAND-Methode und besonders bei den unteren Werten LUFA eine deutlichere Ausdifferenzierung der Ergebnisse in den fünf

Versorgungsgruppen. Die mittleren N-Salden sowie die Wahrscheinlichkeit einer N-Übersorgung (≥ 50 kg N/ha) ist in den Versorgungsgruppen A-C z. T. deutlich niedriger, während in den Versorgungsgruppen D und E für diese Merkmale höhere Beträge ausgewiesen werden, was als Zeichen einer Übersorgung gewertet werden kann. Es ist zu erkennen, dass bei Anwendung der REPRO-stat-Methode und der oberen Werte LUFA bereits in Versorgungsgruppen B und C ein höherer Anteil an Betriebsflächen aufgeführt wird, in denen bereits eine Übersorgung mit Stickstoff vorliegt.

Bei Einsatz der unteren Werte LUFA und der STAND-Methode gelingt daher eine etwas bessere Verteilung, bei der bei Vorlage einer Unter- oder Übersorgung die Wahrscheinlichkeit höher ist, dass das dann auch jeweils für die organische Substanz und für die Stickstoffversorgung gleichzeitig zutrifft. Erst bei einer Aufdüngung mit den unteren Werten LUFA auf Versorgungsgruppe D liegen die N-Salden und der Anteil Salden mit über 50 kg N/ha in etwa auf gleich hohem Niveau wie bei der Versorgungsgruppe C, ermittelt mit der REPRO-stat- oder den oberen Werten der LUFA-Methode.

Nur bei Verwendung von Methoden, die durch eine hohe Genauigkeit der Berechnungsergebnisse gekennzeichnet sind, kann zusammenfassend herausgestellt werden, dass das bestehende fünfstufige VDLUFA-Bewertungssystem zu realistischen Ergebnissen führt. Nicht nur Bilanzergebnisse für eine optimale Versorgung bzw. zur Aufrechterhaltung eines standort- und bewirtschaftungsbedingten Humusgehaltes und -gleichgewichts werden richtig erkannt. Auch Bereiche einer Unter- und Übersorgung können mit ausreichender Sicherheit aufgezeigt werden. Darüber hinaus besteht eine hohe Übereinstimmung zwischen den berechneten Humusbilanzsalden und anderen für die Landwirtschaft und den Umweltschutz wichtigen Kriterien (z. B. Stickstoff). Bei den weniger genauen Methoden könnte zur überschlagsmäßigen Bewertung auch ein dreistufiges System ausreichend sein (vgl. ENGELS et al. 2010).

4 Schlussfolgerungen und Hinweise zur Validierung

4.1 Methodengenauigkeit und Hinweise zur Anwendung

Aus diesen Ergebnissen zum Methodenvergleich kann zunächst die Schlussfolgerung abgeleitet werden, dass immer dann eine hohe Übereinstimmung zwischen Modell und Experiment bestand, wenn die entscheidenden Einflussfaktoren im methodischen Ansatz direkt oder zumindest indirekt berücksichtigt werden. Wie aus den folgenden Tabellen 19 und 20 hervorgeht, sind als wichtige Faktoren des Humusumsatzes vor allem Einflussgrößen des Bodens und des Klimas anzusehen. Für C_{org} tragen diese Faktoren mit ca. 85 % von insgesamt 89 %, und bei N_t mit 88 % von 91 % zur Erklärung der in Mitteleuropa vorkommenden Streubreite der Daten auf terrestrischen Böden bei. Bewirtschaftungseinflüsse (Fruchtfolge, organische Düngung incl. N-Kreislauf) werden hingegen nur mit relativ kleinen Werten ausgewiesen. Die Bestimmtheitsmaße der Bewirtschaftungsfaktoren sind wahrscheinlich bei der regressionsanalytischen Verrechnung aus 240 Dauerversuchen etwas zu niedrig ausgefallen, weil im Gegensatz zur Einwirkung der geprüften Boden- und Klimafaktoren, deren Dauer z. T. Jahrtausende an einem Standort betragen haben, die Bewirtschaftungsfaktoren jeweils nur über die ausgewiesenen Versuchsperioden von durchschnittlich 17 Jahren geprüft worden sind. Dadurch ergibt sich ein gewisses Ungleichgewicht, das bei der Interpretation und Gewichtung dieser Faktoren berücksichtigt werden muss.

Bei unseren Bemühungen zur Verbesserung der Humusbilanzierungsmethoden wurden die wesentlichen Einflussgrößen des Humusumsatzes (entspr. Tab. 19 u. 20) berücksichtigt. Im Bereich der verhältnismäßig einfachen Verfahren wurden die unteren Werte der LUFA-Methode als Ausgangsbasis verwendet, die bereits durch eine vergleichsweise gute Anpassung an die Feldbedingungen gekennzeichnet sind (siehe Tab. 21). Durch eine sorgsame und intensive Validierungs- und Optimierungsphase wurden deren Fruchtartenkoeffizienten an unterschiedliche Standortbedingungen angepasst. Für die Weiterentwicklung des CCB-Verfahrens wurden Prinzipien verwendet, die bei den dynamischen C- und N-Modellen üblich sind (CANDY). Für beide Methoden wurde jeweils ein besonders sorgfältig ausgesuchtes Datenmaterial aus Dauerversuchen mit genügender Versuchslänge (Minimum ca. 10 Jahre) aus dem konventionellen und ökologischen Landbau verwendet, welches zudem möglichst viele Standortbedingungen und Bewirtschaftungsverhältnisse abdeckt. Dieses Datenmaterial von ca.

65 Versuchen aus über 40 Standorten Mitteleuropas steht auch für weitere Aufgabenstellungen im SOMNET-Datenspeicher zur Verfügung: <http://www.ufz.de/somnet>.

Die **CCB-Methode** hat hierdurch eine deutlich bessere Methodensicherheit erlangt (siehe Tab. 19). Das CCB-Verfahren befindet sich zurzeit in einer Testphase und zeigt bisher gute Ergebnisse in getreidebetonten Fruchtfolgen. Wegen der Ausrichtung der Verfahren CCB und STAND auf die Humusgehalte des Bodens sind sie auch geeignet, den gesetzlichen Ansprüchen zur „Erhaltung standort- und nutzungstypischer Bodengehalte an Humus“ zu erfüllen. Der Vorteil der Methode CCB liegt auch darin, dass es gelungen ist, den Aufwand für notwendige Eingabemerkmale so weit zu reduzieren, dass eine weitgehend unkomplizierte und einfache Anwendung ermöglicht wird. Die Komplexität des Prozessmodells erfordert jedoch auch einen deutlich erhöhten Aufwand zur Parameteroptimierung und zur sogenannten Modellpflege. Eine Anwendung in der landwirtschaftlichen Praxis wird in einigen Jahren erwartet.

Die **standortangepasste Methode (STAND)** wies nach den vorliegenden Ergebnissen eine verhältnismäßig gute Anpassung an die C_{org} -Ergebnisse der Dauerversuche auf (Tab. 21). Obgleich die Abstände in den Korrelationskoeffizienten zwischen den untersuchten Bilanzierungsverfahren in den einzelnen hier zusammengeführten Studien relativ konstant sind, muss einschränkend hinzugefügt werden, dass die Abstände der in Tabelle 21 ausgewiesenen aggregierten Korrelationskoeffizienten zwischen bestimmten Methoden (STAND, CCB, REGRESS) und den anderen Verfahren etwas größer ausgefallen sind als es der Realität entsprechen könnte. Das beruht darauf, dass für die Bestimmung der Koeffizienten dieser Methoden keine Versuchsserien mit geringer Datenqualität verwendet worden sind (siehe Kap. 3.2). Daher sind die Einstufungen als vorläufig anzusehen. Bei Vorlage neuer Erkenntnisse und Ergebnisse können entsprechende Korrekturen vorgenommen werden.

Tabelle 19: Einflussfaktoren auf den C_{org} -Gehalt des Bodens (Multiple Regressionsanalysen an Ergebnissen aus ca. 240 Dauerversuchen, ca. 1.400-1.800 Varianten, R^2 in %)

Faktor	Modell ohne WW-Glieder	Modell mit WW-Glieder	Mittelwert	
<u>Temperatur</u> , Temperatur ²	65,3	12,3	65,3	ca. 48
<u>Tongehalt</u> , Tongehalt ^{2*}	18,3	6,2	18,5	ca. 23
WW Tongehalt x pH-Wert			0,8	
WW Tongehalt x Niederschlag		48,9		
WW Tongehalt x N-Bilanz			0,2	
Bodenart, Bodenart ^{2**}		1,5		
<u>Niederschlag</u> , Niederschlag ²	5,3	5,2	0,9	ca. 14
WW Niederschlag x pH-Wert			5,5	
<u>Fruchtfolge</u> : Getreide-Anteil		4,3		ca. 2,5
Legum.-Anteil, Legum.-Anteil ²	1,7	0,7	1,6	
Hackfrucht-Anteil	0,2			
Gesamt-TM-Zufuhr	0,8	0,3	0,4	ca. 0,5
WW N-Bilanz x Legum.-Anteil			0,2	
N-Bilanz ^{***}		1,5	0,1	ca. 0,4
pH-Wert	0,1		0,4	ca. 0,3
Summe	91,7	80,9	93,9	ca. 89

* bzw. Feinanteil; **1 = S; 2 = SI; 3 = IS; 4 = SL; 5 = sL; 6 = L; 7 = LT; 8 = T; 9 = M

*** N-Bilanzkriterien: Zufuhr, Abfuhr, Saldo; WW = Wechselwirkung

Aufgrund der höheren Methodengenauigkeit ist es sehr wohl möglich, dass auch mit relativ einfachen Methoden die Veränderung der C_{org} -Gehalte des Bodens realitätsnah abgebildet werden können. Wegen dieser Vorteile und der einfachen Handhabung wird die STAND-Methode bereits in der Praxis eingesetzt. Die Ergebnisse der Humusbilanzierung können mit folgender vereinfachter Gleichung in Humusgehalte des Bodens (25-30 cm Bodentiefe, spezif. Gewicht 1,5) umgerechnet werden, die bei Beibehaltung des Saldos in ca. 25 Jahren überschlagsmäßig erwartet werden können: Differenz Gehalt C_{org} (% TM) = Humussaldo (Humusäquivalente in kg C/ha und Jahr) x 0,0005672. Darüber hinaus kann mit der STAND-Methode in Versorgungsgruppe C von allen bisher geprüften Methoden die beste Ausrichtung auf ein optimales Ertragsniveau für konventionelle und ökologische Anbaubedingungen gewährleistet werden. Wegen der gestaffelten Koeffizienten für organische Materialien kann es bei dieser Methode jedoch vorkommen, dass bei Übergang zwischen Versorgungsgruppe D und E (KON: 300 kg; ÖKO: 600 kg C/ha) die Wahrscheinlichkeit der Erlangung ungünstiger N-Salden etwas ansteigt.

Die Haupteinflussgrößen auf die Humusdynamik (Boden, Klima) werden mit dieser Methode ansatzweise berücksichtigt, indem die Fruchtartenkoeffizienten entsprechend angepasst worden sind. Diese Parameter werden in sechs Gruppen ähnlich wirkender Standortfaktoren zusammengefasst und ausgewiesen. Als entscheidender Vorteil der Methode ist auch die Berücksichtigung des standorttypischen Ertragsniveaus in den Fruchtartenkoeffizienten und der aufwandabhängigen Koeffizienten der organischen Materialien anzusehen. Hierdurch kommt es zu einer genaueren standortgerechten Bewertung des Versorgungsgrades mit organischer Substanz.

Tabelle 20: Einflussfaktoren auf den N_t -Gehalt des Bodens (Multiple Regressionsanalysen aus ca. 240 Dauerversuchen mit ca. 1.200-1.600 Varianten, R^2 in %)

Faktor	Modell ohne WW-Glieder	Modell mit WW-Glieder	Mittelwert
<u>Temperatur</u> , Temperatur ²	73,3	71,1	73,3
WW Temperatur x Tongehalt			0,2
<u>Tongehalt</u> , Tongehalt ^{2*}	15,7	10,7	15,7
WW Tongehalt x TM-Zufuhr			0,1
WW Tongehalt x Hackfr.-Anteil			0,1
Bodenart, Bodenart ^{2**}		1,0	
<u>Niederschlag</u> , Niederschlag ²	1,7	1,1	0,5
WW Niederschlag x pH-Wert			2,0
<u>Fruchtfolge</u> : Getreide-Anteil, Getreide-Anteil ²		2,6	
Legum.-Anteil, Legum.-Anteil ²	0,8	0,3	
Hackfrucht-Anteil	0,1	0,1	
WW TM-Zufuhr x Legum.-Anteil			1,0
Gesamt-TM-Zufuhr	0,4	0,2	
WW N-Bilanz x Legum.-Anteil			0,1
N-Bilanz ^{***}	0,2	1,7	0,2
pH-Wert		0,04	
Summe	92,2	88,8	93,2

* bzw. Feinanteil; **1 = S; 2 = Sl; 3 = IS; 4 = SL; 5 = sL; 6 = L; 7 = LT; 8 = T; 9 = M

*** N-Bilanzkriterien: Zufuhr, Abfuhr, Saldo; WW = Wechselwirkung

Auch die **VDLUFA-Methode** zur Humusbilanzierung wird in der Praxis angewendet. Auf Grund der relativ geringen Genauigkeit kann sie jedoch lediglich für überschlagsmäßige Berechnungen empfohlen werden („Humusvergleich“, siehe Tab. 21). Bei den Fruchtartenkoeffizienten kann je nach den vorliegenden Bedingungen und Aufgabenstellungen mit den unteren oder/und den oberen Werten der Methode gerechnet werden. Die veranschlagten Einsatzbereiche (vgl. Tab. 2) haben sich im Allgemeinen bewährt und sollten daher in der geschilderten Ausprägung beibehalten werden. Auf Grund der relativ geringen Methodensicherheit der LUFA-Methode können keine quantitativen Beziehungen zwischen den Bilanzsalden und der Veränderung der Humusgehalte der Ackerflächen erstellt werden, weil diese Methoden hierfür nicht geeignet bzw. weil deren Ergebnisse zu ungenau sind. Dies trifft in noch höherem Maße für die REPRO-basierten Verfahren zu. Durch Übernahme von REPRO-stat-Elementen in die LUFA-Methode würde die Genauigkeit und Verlässlichkeit der Methode noch weiter herabgesetzt. Hierzu trägt auch bei, wenn Koeffizienten „neuer“ Fruchtarten oder organischer Materialien ohne eine nachgewiesene experimentelle Überprüfung hinzugefügt werden.

Neben einer manuellen Berechnung von Humusbilanzen (Unterlagen siehe: <http://orgprints.org/13626>) steht heute die Nutzung des Personalcomputers im Vordergrund. Die bisher empfehlenswerten Methoden des VDLUFA sowie die standortangepasste Methode zur Humusbilanzierung können mit dem Kalkulationsprogramm BEFU gerechnet werden. Dieses Programm kann über das Internet heruntergeladen und auf dem eigenen PC installiert werden: <http://www.landwirtschaft.sachsen.de/befu/>.

Von den **REPRO-basierten Verfahren** incl. der **HUMOD-Methode** können auf Grund der bisher vorliegenden äußerst ungenauen Bilanzierungsergebnisse keine Anwendungsempfehlungen für die regulären Anbauformen des konventionellen und besonders des ökologischen Landbaus gegeben werden (Tab. 21). Für die landwirtschaftliche Praxis bringt es keine Vorteile, derart ungenaue Methoden anzuwenden. Wegen der starken erweiterten Reproduktion können diese Verfahren allerdings in der ersten Phase der Umstellung von bisher deutlich mit organischer Substanz unterversorgten konventionellen Flächen sowie auf Meliorationsflächen mit geringen Ausgangsgehalten an Humus mit Erfolg eingesetzt werden. Wie die Ausführungen insgesamt gezeigt haben, hat die Wahl der Methode einen deutlichen Einfluss auf das zu erwartende Ergebnis. Die Auswahl ist daher auch abhängig von der betrieblichen Situation, der Aufgabenstellung und von der individuellen Einstellung der Betriebsleitung bzw. des Nutzers.

Die entsprechend der Tabelle 21 als überwiegend ungenau ausgewiesenen Methoden waren mit großen Abweichungen zwischen berechneten Bilanzergebnissen im Vergleich zu den Ergebnissen aus Dauerefeldversuchen oder der landwirtschaftlichen Praxis gekennzeichnet. Als hauptsächlicher Grund für diese aufgetretenen Mängel kann zunächst festgestellt werden, dass wesentliche Einflussfaktoren zur Humusbilanzierung bei der Modellentwicklung nicht berücksichtigt worden sind. Es wurde außerdem versäumt, eindeutig experimentell belegte Zielmerkmale aufzustellen, in denen deklariert wird, was mit den Ergebnissen der Bilanzierung erreicht werden soll (z. B. Ertragsoptimierung, Humusgehalt und andere Merkmale der Bodenfruchtbarkeit). Darüber hinaus wurde bis heute keine eindeutige experimentelle Bestätigung der Ergebnisgüte dieser Zielmerkmale erbracht (Validierungsarbeiten). Außerdem stand für die Entwicklungsarbeiten oft nur ein experimentelles Datenmaterial aus Dauertestflächen und Dauerefeldversuchen mit einer zu geringen Anzahl an Versuchen und Versuchsjahren und daher ein Datenmaterial mit einer geringen statistischen Güte zur Verfügung.

Im Einzelnen führten diese aufgeführten Mängel dazu, dass die Ergebnisse der Humusbilanzierung mit diesen Verfahren

- nur eine geringe bis gar keine Übereinstimmung mit der Entwicklung der C_{org} -Gehalte des Bodens von Dauerversuchen aufweisen,
- im anzustrebenden Versorgungsbereich C es zur Erreichung weitgehend maximaler Zielerträge kommt,
- die maximal tolerierbaren N-Salden von 50 kg/ha bereits bei leichter Überschreitung des optimalen Versorgungsbereichs an organischer Substanz nicht mehr eingehalten werden können,
- auf Standorten mit verhältnismäßig geringem Umsatz an organischer Substanz es leicht zu einer deutlichen Überschätzung des Bedarfs kommen kann,
- auf Standorten mit hohem Umsatz der Bedarf an organischer Substanz unterschätzt werden kann.

Auf Grund dieser Tatbestände sind noch erhebliche Bemühungen zur Verbesserung dieser Methoden erforderlich, bis sie mit Verantwortung für einen praktischen Einsatz empfohlen werden können. Auch ein Einsatz des HUMOD-Verfahrens zur genaueren Berechnung von einigen verbesserungsbedürftigen Humifizierungskoeffizienten (Körnerleguminosen, Energiemais,

Zwischenfrüchte) ist auf Grund dieser Ergebnisse kritisch zu sehen (vgl. ENGELS et al. 2010). Hier sollten vielmehr Bemühungen zur genauen Ermittlung der Ernte- und Wurzelrückstände dieser Fruchtarten und deren Zersetzungsgüte (z. B. C/N-Verhältnis) unternommen werden. Weil grundsätzlich die Fruchtartenkoeffizienten und die EWR-Mengen miteinander korrelieren, kann es zu einer Überarbeitung in der Weise kommen, dass man den Fruchtarten mit unbekanntem Koeffizienten die Fruchtarten mit bekannten Koeffizienten gegenüberstellt und auf diese Weise mittels Interpolation zu einer besseren bzw. zumindest zu einer vorläufigen Einschätzung dieser Fruchtarten kommt.

Tabelle 21: Zusammenfassender Überblick über die Eignung der Methoden zur Humusbilanzierung und Ertragssicherung der Fruchtarten zum Einsatz in Verwaltung, Beratung und landwirtschaftlicher Praxis

Methode	Korrelation zw. Modell-Ergebnis und Feldversuch		Mittlere Abweichung bei 100 % Bedarfsdeckung (ausgeglichene Bilanz)	Korrel. zw. Fr.-arten-Koeff. u. Wurzel-bzw. EWR-Menge	Korrelation zw. Humus- u. N-Saldo		N-Saldo bei Übergang zw. Versorgungsgruppe D zu E (kg N/ha)		Standort-Anpassung/ Bewertung	Fruchtarten-Ertrag in Versorgungsgruppe C (OPT = Optimum; MAX = Maximum)		Erfüllung gesetzl. Ansprüche	Bewertung Methoden-Genauigkeit	
	C _{org} (r)	N _t (r)	C _{org} (%)		Einschätzung Reproduktion	(r)	Landw. Praxis (r)	Exakt-Versuche (r)		konvent. Landbau (300 kg C/ha)	ökolog. Landbau (600 kg C/ha)			konvent. Landbau
HUMOD	ca. 0,01	ca. 0,34	-	?	-	-	-	-	-	ja ?	?	?	-	nicht quantitativ (bisher)
REPRO-dyn	ca. 0,19	ca. 0,37	ca. +0,18	stark erweiterte	-	0,52	-	-	-	ja unzureichend	MAX	MAX	nein	nicht quantitativ
REPRO-stat	0,22	0,41	+0,14 (ÖKO +0,28)	stark erweiterte	0,42	0,54	0,81	-	ca. 100	nein	MAX	MAX (ab B)	nein	nicht quantitativ
VDLUFA obere Werte	0,27	0,46	+0,13	erweiterte	0,48	0,54	0,81	ca. 50	≥ 50	nein	MAX (OPT in B)	OPT – MAX	nein	halb-quantitativ „Humus-Vergleich“
VDLUFA untere Werte	0,29	0,48	+0,02	einfache	0,51	0,57	0,82	≤ 50	≤ 50	nein	OPT	OPT (linearer – opt. Bereich)	gering	halb-quantitativ „Humus-Vergleich“
CCB	0,74	0,37	-0,01	genaue einfache	-	-	-	-	-	ja gut	-	-	gut	quantitativ
STAND	0,74	0,54	+0,06	genaue einfache	-	0,61	0,88	≥ 50	≥ 50	ja befriedigend	OPT	OPT	mittel	quantitativ
REGRESS	0,75	0,78	+0,02	genaue	-	-	-	-	-	ja gut	-	-	-	quantitativ

4.2 Hinweise zu Validierungsarbeiten

Aus den Erfahrungen im Bereich der Modellerstellung, der Validierung und des Optimierungsprozesses können für zukünftige Arbeiten auf diesem Gebiet einige Grundsätze und Zielfunktionen aufgestellt werden. Bevor eine Methode für den praktischen Einsatz vorgesehen wird, sollte sowohl eine genaue Beschreibung wesentlicher Modellbestandteile als auch eine (vorläufige) Validierung erfolgen. Die Modellbeschreibung sowie die Genauigkeitsprüfungen müssen öffentlich zugänglich sein. Dies kann durch eine wissenschaftliche Veröffentlichung oder auch über das Internet erfolgen. Gewöhnlich wird übersehen, dass es wesentlich einfacher ist, eine neue Methode zu erstellen, als eine bestehende Methode durch Validierung und Verbesserungsarbeiten weiterzuentwickeln, damit sie eine gute Übereinstimmung mit der Realität erzielt (NIEDER et al. 2003).

Je nach hauptsächlicher Ausrichtung der zu prüfenden Methode müssen die Zielmerkmale eindeutig definiert werden, weil eine Validierung oder Überprüfung der Übereinstimmung zwischen berechneten und experimentell ermittelten Werten an verschiedenen Merkmalen erfolgen kann. Soll z. B. mit der Methode eine Aussage zur Humusbilanzierung oder auch zur C_{org} -Dynamik des Bodens erfolgen, wie es auch in dieser Arbeit zu Grunde gelegt worden ist, so sind als Vergleichsmerkmale in erster Linie die C_{org} -Gehalte oder die C_{org} -Mengen des Bodens zu wählen. Weitere Begleitmerkmale der Bodenfruchtbarkeit, aber auch des Ertrages der Fruchtarten können hinzugezogen werden. Wird jedoch als erstes Ziel die Erreichung eines bestimmten (optimalen) Ertragsniveaus der Fruchtarten angestrebt und ist keine Aussage über die Humusveränderung im Boden vorgesehen, so ist die Übereinstimmung und statistische Güte der berechneten Ergebnisse mit den Ertragszielen der einzelnen Fruchtarten durch entsprechende Versuchsergebnisse genau auszuweisen. In diesem Fall handelt es sich nicht um ein Verfahren zur Humusbilanzierung, sondern um ein Verfahren zur Bilanzierung der organischen Substanz zum Zweck der Sicherung optimaler Erträge der Fruchtarten. Hierbei ist darauf zu achten, dass der Modellname auch mit den Zielmerkmalen übereinstimmt.

Die zur Modellüberprüfung herangezogenen Daten müssen eine gewisse Qualität und Quantität aufweisen. In vielen Fällen sind entsprechend aufbereitete Daten aus Dauerfeldversuchen zu verwenden. Hierbei bestehen gewöhnlich Grenzen bei der Beschaffung und Zusammenstellung des geforderten Datenumfangs. Qualitätskontrollen sind zudem langwierig und erfordern einen hohen Aufwand. Zur Bereitstellung von Versuchsergebnissen können heute Internet-Datenbasen genutzt werden (z. B. SOMNET). Ist lediglich eine regionale Nutzung des Verfahrens geplant, so kann die Heranziehung eines Versuches oder von einigen wenigen Versuchen, die den Standort gut repräsentieren, als ausreichend angesehen werden (siehe HARTL & ERHART 2010; BROCK et al. 2012).

Ist jedoch eine überregionale oder universelle Nutzung des Verfahrens vorgesehen, so gestaltet sich die Suche nach geeignetem Validierungsmaterial wesentlich komplizierter. Die heranzuziehenden Ergebnisse müssen aus Versuchen stammen, die möglichst alle regionalen Aspekte des Bodens (z. B. Bodenart, Tongehalt), des Klimas (z. B. Niederschläge, Temperatur) sowie der Bewirtschaftung (Fruchtarten, Zwischenfrüchte, Stilllegung, Fruchtfolgen, organische Düngemittel, Düngungshöhe, Bodenbearbeitung etc.) abdecken. Auf Grund der hohen standörtlichen Differenzierung der Humusgehalte und -versorgung hat es sich bewährt, hierbei auf eine große Sorgfalt zu achten. Als Schlussfolgerung vieler Arbeiten auf diesem Gebiet kann empfohlen werden, z. B. bei einem vorgesehenen Einsatz des Verfahrens in Deutschland eine auf die unterschiedlichen Standorte gut verteilte Anzahl von mindestens 20 Feldversuchen mit insgesamt ca. 200 Varianten zurückzugreifen. Eine Unterschreitung dieses Limits ist keinesfalls als ausreichend anzusehen, besser ist es, 40 Versuche heranzuziehen.

Auch aus der Konsequenz der in dieser Arbeit aufgeführten Mängel in dieser Hinsicht ist zudem darauf zu achten, dass die Feldversuche, wenn Merkmale wie der C_{org} -Gehalt des Bodens verwendet werden müssen, eine Mindestdauer von 10, besser von 15 Jahren nicht unterschreiten dürfen. Werden lediglich Anfangs- und Endgehalte z. B. für C_{org} verwendet, ist eine höhere Anzahl an Versuchen oder an Versuchsvarianten erforderlich, als wenn aus den Versuchen Jahresuntersuchungen für C_{org} vorliegen und bei den Validierungsarbeiten Verwendung finden. Dies beruht darauf, dass die einzelnen C_{org} -Gehalte ebenfalls einer z. T. erheblichen Streuung unterliegen (KROSCHEWSKI 2008). Damit dieser Fehler so klein wie möglich bleibt und Falschinterpretationen ausgeschlossen werden, muss eine entsprechend hohe Anzahl an Varianten vorliegen. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Streuung der Varianten zu reduzieren, indem Mittelwerte von zwei bis vier Anfangs- und Enduntersuchungen verwendet werden. Die Verwendung von Ergebnissen aus Dauertestflächen hat sich dagegen nicht bewährt, weil deren Streuung in der Regel deutlich zu groß ist.

Werden die Ergebnisse von Versuchen verwendet, in denen in zeitlicher Abfolge viele oder sogar jährliche Untersuchungen vorliegen, so sollten folgende Gesichtspunkte berücksichtigt werden. In diesen Fällen werden für die Modellberechnungen oft die genauen oder geschätzten mittleren Anfangsgehalte an C_{org} als Ausgangswerte für die Berechnungen verwendet. Berechnungen zur Modellgenauigkeit weisen dann für die anschließenden Jahreswerte naturgegeben zunächst eine sehr hohe Genauigkeit auf. Es wird eine Genauigkeit vorgetäuscht, die in Wirklichkeit nicht vorhanden ist. Für diese Fälle hat es sich bewährt, z. B. keine Daten der ersten ca. 10 Jahre bzw. der ersten Hälfte der Versuchsdauer für die Genauigkeitsberechnungen zu verwenden. Werden demgegenüber keine Anfangsgehalte an C_{org} für die Modellberechnungen vorgegeben, so können die Werte der Anfangsphase mit in die Auswertungen einfließen.

Für die Prüfung der Genauigkeit können verschiedene statistische Methoden herangezogen werden. Zunächst kann für das zu prüfende Merkmal die mittlere absolute oder relative Abweichung von den experimentell ermittelten Werten als gute Basis für die Beurteilung der Übereinstimmung verwendet werden, weil hierdurch auch z. B. die Richtung der Abweichung beurteilt werden kann. Als weiteres Maß kann der auch in dieser Arbeit oft verwendete Korrelationskoeffizient zwischen berechneten und experimentell ermittelten Werten Anwendung finden. Auch wird oft die Nutzung der statistischen Streuung oder der Standardabweichung für die Beurteilung herangezogen. Weiterhin können grafische Darstellungen z. B. in Form von Streudiagrammen oder von Boxplots Verwendung finden. Zur Angabe eines Methodenfehlers ist die Einrechnung einer Wahrscheinlichkeit erforderlich (z. B. $S \times t$ -Wert [0,05]; vgl. KLAMA 2011). Für die Prüfung von Methoden zur Humusbilanzierung könnte eine Teilnahme an Ringuntersuchungen sinnvoll sein. Hierzu müsste eine spezifische Handlungsanweisung ausgearbeitet werden.

Außerdem hat es sich als vorteilhaft erwiesen, zu den Auswertungen der zu prüfenden Methode immer die Ergebnisse von mehreren anderen Methoden vergleichend gegenüberzustellen. Die Ergebnisse der neuen oder veränderten Methode können so unmittelbar mit einer Vergleichs- oder Standardmethode verglichen werden. Es sollte dann natürliches Ziel der Modellierung sein, dass mit dem neuen Verfahren mindestens das Genauigkeitsniveau des Standards erreicht, besser sogar deutlich überboten werden kann. Daher sollten (neue) Methoden, die die relativ niedrige statistische Genauigkeit der bisher üblichen Methode (z. B. LUFA-Methode) nicht überschreiten, für den Einsatz in Praxis und Beratung nicht empfohlen werden.

Werden Untersuchungen von bedeutenden Fragestellungen der Praxis oder der Wissenschaften nur mit einem (zudem neuen) methodischen Ansatz durchgeführt, so gibt es keine Vergleichsmöglichkeiten, ob die erlangten Ergebnisse auch der Realität entsprechen können (siehe KUTSCH et al. 2010). Daher sollten für derartige Aufgabenstellungen möglichst Berechnungen mit mehreren Modellen, die zudem unterschiedlich komplex und auf verschiedenen Prinzipien aufbauen, durchgeführt werden. Durch einen intensiven Vergleich der erlangten Ergebnisse, z. B. zum Klimawandel oder für Zukunftsstudien, kann die Wahrscheinlichkeit des Irrtums dann deutlich reduziert werden (siehe KOLBE 2009b).

Für die Prüfung der Methodengenauigkeit können zunächst auch Daten verwendet werden, mit deren Hilfe das Verfahren erstellt worden ist. Aus Ermangelung der Verfügbarkeit von entsprechenden alternativen Versuchsergebnissen ist es möglich, diese „nicht unabhängigen“ Daten zu verwenden. Dies ist auf jeden Fall besser, als gar keine Überprüfungen vorzunehmen. In diesem Fall spricht man aber nicht von einer Validierung, sondern es wird geprüft, welche Übereinstimmung zwischen den Modellberechnungen und den experimentell ermittelten Daten erreicht werden kann. Für eine ordnungsgemäße Validierung sind demgegenüber unabhängige Datensätze erforderlich. Hierbei kann auch das Datenmaterial zunächst geteilt werden in einen Datensatz, der für die Modellierung verwendet wird und in einen dann unabhängigen Datensatz, mit dem die Validierungsarbeiten durchgeführt werden (weitere Hinweise siehe SMITH & SMITH 2007; WELLMITZ & GLUSCHKE 2005).

Im Bereich einiger spezifischer Bewirtschaftungsformen wie z. B. dem ökologischen Landbau sind für die Erstellung und Prüfung von Bilanzierungsmethoden oft (noch) nicht genügend Daten aus Dauerversuchen vorhanden. Weil es aber zwischen konventionellen und ökologischen Formen der Bewirtschaftung keine grundlegenden andersartigen singulären Wirkungen der Fruchtarten und organischen Materialien gibt (ausführliche Diskussion in KOLBE & PRUTZER 2004), können Daten aus beiden Anbausystemen gemeinsam ausgewertet und dann (z. B. in Streudiagrammen) getrennt ausgewiesen werden, wie dies auch in dieser Arbeit vorgenommen worden ist. Hierbei ist es viel wichtiger darauf zu achten, dass in den Versuchen alle in der ökologischen und konventionellen Praxis vorkommenden elementaren Formen der Bewirtschaftung abgedeckt werden. Zur Modellierung und Prüfung ist es zudem wünschenswert, dass das Datenmaterial den gesamten vorkommenden

Intensitätsbereich abdeckt. Eine Betonung auf wie auch immer definierte „Optimalformen“ steht dagegen nicht unbedingt im Vordergrund (vgl. ENGELS et al. 2010).

Zur Aufstellung und Kontrolle eines Bewertungssystems für die erlangten Humusbilanzen können mit Erfolg nur Merkmale verwendet werden, die eine relativ sichere Begrenzung bzw. Beurteilung der Ergebnisse erlauben. So kann z. B. der C_{org} -Gehalt als Merkmal nur Verwendung finden, um wenigstens einen unteren Rahmen einer ordnungsgemäßen Bewirtschaftung aufzuzeigen. Eine untere Grenze ist dort zu setzen, wo der standort- und bewirtschaftungstypische Gehalt unterschritten wird. Eine obere Grenze kann demgegenüber mit diesem Merkmal nicht eindeutig fixiert werden. Weil aber die Humusbilanz, sozusagen als übergeordnetes Merkmal, Aussagen zu vielen wichtigen Bestandteilen der Bodenfruchtbarkeit erlaubt (s. Tab. 1), hat es sich bewährt, u. a. auch folgende Merkmale zur besseren Fixierung der Versorgungsgruppen des VDLUFA-Bewertungsschlüssels zu verwenden:

- C_{org} (N_t und andere Merkmale): keine Veränderung der C_{org} -Gehalte und ausgeglichene Humusbilanzen sollten ungefähr die Mitte der Versorgungsgruppe C kennzeichnen
- Ertragsreaktion der Fruchtarten: optimale Erträge in Versorgungsgruppe C, maximale Erträge in Versorgungsgruppen D-E, starke Ertragsreaktionen in Versorgungsgruppen A und B
- N-Schlag- bzw. Flächen-Bilanz: Übergang zwischen Versorgungsgruppen A/B weist mit hoher Wahrscheinlichkeit insbesondere im Ökolandbau negative Salden auf (auch unter Hinzuziehung der N-Depositen), bei Übergang zwischen Versorgungsgruppen D/E steigt die Wahrscheinlichkeit von Salden mit über 50 kg N/ha stark an.

5 Zusammenfassung

Durch Einsatz unterschiedlicher Methoden der Humusbilanzierung werden z. T. stark divergierende Ergebnisse zu Abfuhrpotenzialen an Stroh und zum Versorgungsniveau an Humus auf den Ackerflächen ermittelt. Eine eindeutige Interpretation dieser Ergebnisse kann jedoch nur gelingen, wenn man die Einsatzziele und Genauigkeit der Methoden kennt. In der vorliegenden Studie wurden hierzu alle verfügbaren Untersuchungen zusammengefasst. Eine Überprüfung der Genauigkeit von Humusbilanzmethoden brachte deutliche Unterschiede zwischen den Verfahren zutage. Daher sollte die Auswahl der Methode nicht nur nach dem Anwendungsziel, sondern auch nach der Methodengenauigkeit vorgenommen werden. In den Schlussfolgerungen können konkrete Hinweise zur Validierung der Methoden gegeben werden.

Methode REPRO bei Anwendung dynamischer oder statischer Koeffizienten

Nach den bisher zur Verfügung stehenden Analysen handelt es sich um orientierende Methoden mit nur schwachen Korrelationen zwischen den berechneten Humussalden und den Humusgehalten des Bodens ermittelt aus Dauerfeldversuchen ($r = 0,19-0,22$). Auf Grund der hohen statistischen Streuung der berechneten Ergebnisse können im Einzelfall keine Aussagen über die Veränderung der Bodenhumusgehalte getroffen werden (die Gehalte können ansteigen, abfallen oder gleich hoch bleiben). Bei ausgeglichenen Salden erfolgt im Durchschnitt eine stark erweiterte Humusreproduktion (+0,14 % bis +0,28 % C_{org}). Abfuhrpotenziale z. B. an Stroh werden daher in der Regel stark unterschätzt. In Versorgungsgruppe C werden weitgehend maximale Erträge der Fruchtarten erzielt. Standortunterschiede werden sehr ungenau abgebildet bzw. können nicht berücksichtigt werden.

Auf Grund der äußerst ungenauen Ergebnisse zwischen Modellberechnungen und den Ergebnissen aus Dauerversuchen können einige auf dem PC-Programm REPRO basierte Verfahren (REPRO-stat, REPRO-dyn, HUMOD) zurzeit kaum empfohlen werden. Zwischen den Humussalden und der C_{org} -Entwicklung der Versuche bestehen von allen getesteten Verfahren die niedrigsten bis gar keine Übereinstimmungen, daher sind sie insbesondere als Methoden der Humusbilanzierung mit Bezug auf die Veränderung der Humusgehalte im Boden nicht geeignet. Diese Bewertung wird auch durch die Auswertung von Ertragsreaktionen, die Einstufungsergebnisse in das A-E-Klassifizierungssystem sowie durch Berechnungsbeispiele für unterschiedliche Standorte noch zusätzlich untermauert. Die Überprüfung der Ertragswirkung ergab z. B. für diese Methoden, dass insbesondere bei Berechnungsbeispielen des Ökolandbaus auf der Grundlage eines optimalen Versorgungsniveaus mit organischer Substanz weitgehend maximale Ertragsniveaus der Fruchtarten in Versorgungsgruppe C erzielt werden. Auf Grund des Gesetzes vom abnehmenden Ertragszuwachs kann es dann bereits bei geringem Überschreiten dieser Stufe zu N-Salden

kommen, die z. T. weit über die veranschlagte Grenze von 50 kg N/ha hinausgehen können, besonders dann, wenn sich im Boden bereits ein Humusgleichgewicht eingestellt hat.

Daher können sich Bilanzierungen mit diesen Methoden deutlich negativ in der Umweltsicherung von Biobetrieben zeigen, die bereits 10 bis 20 Jahre ökologisch wirtschaften und einen weitgehend stabilen Bodenfonds erreicht haben. Darüber hinaus ist besonders das Bilanzierungsziel der Erreichung maximaler Erträge der Fruchtarten zu hinterfragen. Abgesehen davon, dass viele Biobetriebe ein so hohes Versorgungsniveau an organischer Substanz durch ihre Betriebsausrichtung oft gar nicht erreichen können, ist das Ertragsmaximum schon lange kein ökologisches und auch kein konventionelles Agrarziel mehr (siehe Diskussion in KOLBE & PRUTZER 2004).

VDLUFU-Methode

Mit dieser Methode werden orientierende bis halb-quantitative Ergebnisse mit mäßig hohen Korrelationen ($r = 0,27-0,29$) zwischen den Humussalden und den C_{org} -Gehalten der Dauerversuche ermittelt. Es können keine gesicherten Aussagen über die Veränderung der Bodenhumusgehalte getroffen werden. Standortunterschiede können kaum berücksichtigt werden, was erheblich zur statistischen Streuung der Ergebnisse beiträgt. Bei ausgeglichenen Salden erfolgt bei Anwendung der oberen Werte der Koeffizienten eine erweiterte Humusreproduktion ($+0,13 \% C_{org}$), und daher eine Unterschätzung von Abfuhrpotenzialen und es werden ebenfalls weitgehend maximale Erträge erzielt. Bei Verwendung der unteren Werte wird eine einfache Reproduktion ($+0,02 \% C_{org}$) und ein annähernd optimales Ertragsniveau erreicht. Dagegen erfolgt eine relativ unsichere Ermittlung von Abfuhrpotenzialen mit der Tendenz einer Überschätzung auf bestimmten Standorten, die zu einem hohen Humusumsatz neigen.

Standortangepasste Methode (STAND) und CCB

Es handelt sich um Methoden mit halb- bis voll-quantitativen Ergebnissen, die deutliche bis hohe Korrelationen zwischen den berechneten Humussalden bzw. -Gehalten und den experimentell ermittelten Humusgehalten des Bodens aufweisen ($r = 0,74$). Weil Standortunterschiede berücksichtigt werden, können gesicherte Aussagen über die Veränderung der Humusgehalte des Bodens getroffen werden. Bei ausgeglichenen Salden wird sowohl eine weitgehend genaue Bestimmung der Humusreproduktion ($-0,01 \%$ bis $+0,06 \% C_{org}$) als auch von Abfuhrpotenzialen ermöglicht und es werden in Versorgungsgruppe C optimale Erträge der Fruchtarten angestrebt.

Für die Anwendung der Verfahren REGRESS und CCB ist ein Personalcomputer erforderlich. Die Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen C_{org} - bzw. N_t -Werten kann als relativ gut bezeichnet werden. Sie können zur Berechnung der C_{org} - und N_t -Dynamik des Bodens in Abhängigkeit von Faktoren des Bodens, des Klimas und der Bewirtschaftung eingesetzt werden. Das CCB-Verfahren befindet sich in der Testphase für eine praktische Nutzung.

Die Anwendung folgender Methoden kann „von Hand“ oder mit Hilfe eines Personalcomputers erfolgen: REPRO-stat, untere und obere Werte LUFA, STAND. Wird auf dem Landwirtschaftsbetrieb auf eine ausgezeichnete Versorgung mit organischer Substanz großen Wert gelegt und eine erweiterte Humusreproduktion angestrebt, so können die oberen Werte der LUFA-Methode angewendet werden. Gleichzeitig ist darauf zu achten, dass die N-Mineraldüngung entsprechend zu reduzieren ist. Andere Betriebe, die lediglich eine einfache Reproduktion der Humuswerte erreichen wollen oder nach Cross Compliance veranschlagt werden, nutzen die unteren Werte der LUFA-Methode. Mit diesen Verfahren kann zwar ein relativ schneller Überblick über den Versorgungsgrad mit organischer Substanz ermittelt werden, die erlangten Ergebnisse sind allerdings auch für die meisten Standorte sehr ungenau, insbesondere in Bezug auf die Veränderung der Humusgehalte des Bodens.

Es hat sich gezeigt, dass im Vergleich zu der standortangepassten Methode sowie dem REGRESS-Verfahren sowohl mit den unteren Werten als auch besonders mit den oberen Werten der LUFA-Methode, aber auch mit dem CCB-Verfahren für bestimmte Standorte ungenaue Ergebnisse ermittelt werden. Darüber hinaus kann abgeleitet werden, dass diese Feststellung bei den REPRO-basierten Verfahren noch extremere Ausmaße annimmt. Lediglich bei den Standorten, aus denen diese Methoden ursprünglich erstellt worden sind, waren einigermaßen vertretbare Ergebnisse vorzufinden (Standortgruppen 2-4). Das CCB zeigt bisher gute Ergebnisse in Fruchtfolgen mit hohem Getreideanteil. Zur genauen Berechnung von Fruchtfolgen mit hohen Hackfrucht- und Futterbauanteilen müssen noch Anpassungsarbeiten erfolgen.

Darüber hinaus ist der A-E-Bewertungsschlüssel der LUFA-Methode so ausgelegt, dass bei Vorlage ausgeglichener Humusbilanzen (Versorgungsgruppe C) mit den unteren Werten ein im optimalen Bereich liegender Ertrag und mit den oberen Werten ein optimaler bis maximaler Ertragsbereich angestrebt wird. Insbesondere mit den REPRO-basierten Verfahren, aber auch mit den oberen Werten der LUFA-Methode, werden unter konventionellen und ökologischen Anbaubedingungen höhere Anteile mit extremeren Bewertungen (Versorgungsgruppen A-B) erzielt als insbesondere mit der standortangepassten Methode. Mit der STAND-Methode werden „extremere“ Standorte einer genaueren Bewertung zugeführt, sodass alle Standortbedingungen weitgehend gleichmäßig abgebildet werden. Auf der anderen Seite kann es mit den unteren Werten auch zu einer zu optimistischen Bewertung kommen.

Lediglich die standortangepassten Methoden (STAND, CCB) gewähren nach den vorliegenden Ergebnissen eine größere Sicherheit. Auf der Grundlage sehr vieler Ergebnisse aus Dauerversuchen ist die STAND-Methode an unterschiedliche Standortverhältnisse besser angepasst, so dass verhältnismäßig wenige extreme Ergebnisse durch das Bewertungssystem ermittelt werden. Bei ihrer Entwicklung ist eine Eichung zwischen Bilanzsalden und Bodenveränderung der Humusgehalte vorgenommen worden, so dass auch gesetzliche Vorgaben zur Einhaltung standort- und bewirtschaftungstypischer Humusgehalte mit höherer Sicherheit gewährleistet werden können. Bei einem nur geringfügig höheren Erhebungsaufwand ist auch diese Methode für Routinekontrollen geeignet. Die Methodenanpassung an die durch den Anbau bewerkstelligte Änderung der Humusgehalte des Bodens ist vergleichsweise besser als mit den anderen Methoden erreicht worden. Eine 100 %ige Bedarfsdeckung mit organischer Substanz ist mit der Versorgungsstufe C verhältnismäßig sicher im optimalen Ertragsbereich angesiedelt. Nach den bisherigen Ergebnissen ist eine weitgehend universelle Einsetzbarkeit auf den Standorten Mitteleuropas möglich.

Besonders in Betrieben mit bestimmten einseitigen Fruchtfolgen und/oder hohen Abfuhrmengen an nachwachsenden Rohstoffen, als auch in Betrieben, die eine deutliche Veränderung der Betriebsstruktur planen, sind sorgsam durchzuführende Humusbilanzierungen mit möglichst quantitativen Methoden anzuraten. Dies trifft auch für Aufgaben zu, bei denen eine Berechnung der N-Freisetzung aus der organischen Substanz vorgenommen werden soll. Gerade für derartige Aufgabenstellungen müssen Bilanzierungsmethoden zum Einsatz kommen, die sowohl sichere Aussagen über die zu erwartenden Veränderungen der C_{org} - und N_t -Gehalte der Flächen erlauben als auch Berechnungsergebnisse zu Abfuhrgrenzen an organischer Substanz (Stroh) oder zur optimalen Fruchtfolgegestaltung mit hoher Sicherheit festlegen können.

Zur genauen Beurteilung sind in diesen Fällen oft zwei Analysen für Humus (und Stickstoff) erforderlich. Durch die erste Bilanz wird der Ist-Zustand der bisherigen Bewirtschaftungssituation ermittelt. Mit der zweiten Analyse können z. B. Szenarien zukünftiger Bewirtschaftungsalternativen durchgerechnet werden. In einem dritten Schritt werden die Ergebnisse beider Analysen miteinander in Beziehung gesetzt. Durch diese Vorgehensweise können die konkreten Auswirkungen zukünftiger Handlungsweisen auf den vorliegenden Versorgungsgrad an organischer Substanz, die Entwicklung der Humusgehalte sowie die N-Freisetzung des Bodens standortgenau ermittelt werden.

6 Literatur

- ABRAHAM, J. (2001): Auswirkungen von Standortvariabilitäten auf den Stickstoffhaushalt ackerbaulich genutzter Böden unter Berücksichtigung der Betriebsstruktur, der standortspezifischen Bewirtschaftung und der Witterungsbedingungen. Shaker Verlag, Aachen.
- ALBERT, E., FÖRSTER, F., ERNST, H., KOLBE, H., DITTRICH, B., LABER, H., HANDSCHACK, M., KRIEGHOFF, G., HEIDENREICH, T., RIEHL, G., HEINRICH, S. & W. ZORN (2006): Umsetzung der Düngeverordnung. Hinweise und Richtwerte für die Praxis. Broschüre, Sächsische Landesanstalt f. Landwirtschaft, Dresden.
- Anonym (2009): Düngegesetz. Bundesgesetzblatt I, Nr. 4, 54 - 60.
- BAD (2010): Phosphor- und Kaliumdüngung – brauchen wir neue Düngekonzepte? Bundesarbeitskreis Düngung, Frankfurt/Main. http://www.iva.de/sites/default/files/benutzer/uid/publikationen/tb2010_0.pdf
- BREITSCHUH, TH. (2010): Verband f. Agrarforschung u. Bildung, Jena (schriftl. Mitteilung).
- BREITSCHUH, TH. & U. GERNAND (2010): Humusbilanzierung in landwirtschaftlichen Betrieben. In: ENGELS, C., REINHOLD, J., EBERTSEDER, T. & J. HEYN (2010): Humusbilanzierung landwirtschaftlicher Böden – Einflussfaktoren und deren Auswirkungen. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben. VDLUFA, Speyer, 280 – 313.
- BROCK, CHR. (2009): Humusdynamik und Humusreproduktion in Ackerbausystemen und deren Bewertung mit Hilfe von Humusindikatoren und Humusbilanzmethoden. Dissertation, Univ., Gießen.
- BROCK, CHR., HOYER, U., LEITHOLD, G. & K.-J. HÜLSBERGEN (2008): Entwicklung einer praxisanwendbaren Methode der Humusbilanzierung im ökologischen Landbau. Forschungsbericht zum BÖL-Projekt-Nr. 03OE084/1 und 03OE084/2. <http://orgprints.org/16447/>
- BROCK, CHR., HOYER, U., LEITHOLD, G. & K.-J. HÜLSBERGEN (2012): The humus balance model (HU-MOD): a simple tool for the assessment change impact on soil organic matter levels in arable soils. Nutrient Cycling in Agroecosystems (im Druck)
- ENGELS, C. & M. KÖRSCHENS (2010): Bedeutung von ober- und unterirdischen Ernte- und Stoppelrückständen für die Humusbilanzierung. In: ENGELS, C., REINHOLD, J., EBERTSEDER, T. & J. HEYN (2010): Humusbilanzierung landwirtschaftlicher Böden – Einflussfaktoren und deren Auswirkungen. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben. VDLUFA, Speyer, 169 – 212.
- ENGELS, C., REINHOLD, J., EBERTSEDER, T. & J. HEYN (2010): Humusbilanzierung landwirtschaftlicher Böden – Einflussfaktoren und deren Auswirkungen. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben. VDLUFA, Speyer. http://www.humusnetzwerk.de/uploads/media/SchlussberichtGesamt201010_01.pdf
- FRANKO, U. (2005): Modellierung der Kohlenstoff- und Stickstoffdynamik im Boden. Mündliche Präsentation im Vorlesungszyklus "Modellierung am UFZ". Umweltforschungszentrum, Halle.
- FRANKO, U., KOLBE, H., THIEL, E. & E. LIEß (2010): Multi-site validation of a soil organic matter model based on generally available input data. Geophysical Research Abstracts 12, 1.
- FRANKO, U., KOLBE, H., THIEL, E. & E. LIEß (2011): Multi-site validation of a soil organic matter model for arable fields based on generally available input data. Geoderma 166, 119 – 134.
- FRANKO, U., THIEL, E., LIEß, E. & H. KOLBE (in Vorbereitung): Erstellung eines Verfahrens zur Abschätzung des N-Umsatzes und der Humusreproduktion im konventionellen und ökologischen Landbau. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Leipzig.
- HAAS, G. (2010): Wasserschutz im Ökologischen Landbau: Leitfaden für Land- und Wasserwirtschaft. Agraringenieurbüro Haas, Bad Honnef. <http://orgprints.org/16897/>
- HARTL, W. & E. ERHART (2010): Humusbilanzierung als praxisgerechtes Tool für Landwirte zur Unterstützung einer CO₂-speichernden Landwirtschaft. Bio Forschung Austria. StartClim2009.D, 1 – 23. http://www.austroclim.at/fileadmin/user_upload/StartClim2009_reports/StCI09D.pdf
- HARTMANN, R. (2002): Studien zur standortgerechten Kompostanwendung auf drei pedologisch unterschiedlichen, landwirtschaftlich genutzten Flächen der Wildeshäuser Geest, Niedersachsen. Dissertation, Universität Bremen. Bremer Beiträge zur Geographie und Raumplanung 39, Bremen.
- HARZER, N. (2006): Humus- und Nährstoffhaushalt ökologischer Betriebe und Systemversuche im Land Sachsen-Anhalt. Diplomarbeit, Institut f. Acker- u. Pflanzenbau d. Universität, Halle.

- HEINITZ, F., ALBERT, E., REINICKE, F. & B. WAGNER (2010): Analysen des Stickstoff-Managements von Praxisbetrieben in Sachsen auf Grundlage von Nährstoffbilanzierungen. In: Optimierung N-Management. Schriftenreihe des Landesamts f. Umwelt, Landwirtschaft u. Geologie H. 25, 1 – 35.
- HOFFMANN, H. et al. (2003): Ökologischer Land- und Gartenbau in Großbetrieben. Eine empirische Untersuchung am Beispiel der Bundesländer Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern. Lehrgebiet Ökologischer Land- und Gartenbau d. Landwirtschaftl.-gärtnerischen Fakultät der Humboldt-Universität, Berlin.
- HÜLSBERGEN, K.-J. (2003): Entwicklung und Anwendung eines Bilanzierungsmodells zur Bewertung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Systeme. Berichte aus der Agrarwirtschaft. Shaker Verlag, Aachen.
- JOSCHKO, M., BARKUSKY, D., HÖHN, W., ROGASIK, H., HIEROLD, W., GROSSMANN, M., ROGASIK, J. & F. GERLACH (2007): Weniger Humusbedarf bei Mulchsaat? Landwirtschaft ohne Pflug Nr. 3, 12 – 18.
- KLAMA, U. (2011): Methodik zur Bewertung des Einflusses von zunehmendem Energiepflanzenanbau zur Bioenergieproduktion auf den Kohlenstoffhaushalt in Ackerböden. Diplomarbeit, Institut f. Geowissenschaften u. Geographie der Naturwissenschaften d. Univ., Halle-Wittenberg.
- KOLBE, H. (2000): Landnutzung und Wasserschutz. Land Use and Water Protection. WLV Wissenschaftliches Lektorat & Verlag, Leipzig.
- KOLBE, H. (2005): Prüfung der VDLUFA-Bilanzierungsmethode für Humus durch langjährige Dauerversuche. Archiv for Agronomy and Soil Science 51, 221 – 239.
- KOLBE, H. (2007a): Anforderungen an die Humusbilanzierung in der Praxis des ökologischen Landbaus. In: Berichte aus dem ökologischen Pflanzenbau. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Heft 9, 58 – 69. <http://orgprints.org/00003516/>
- KOLBE, H. (2007b): Methode zur standortangepassten Humusbilanzierung von Ackerland unterschiedlicher Anbauintensität. Infodienst für Beratung und Schulung der Sächsischen Agrarverwaltung, Nr. 5, 35 – 39.
- KOLBE, H. (2008): Einfache Verfahren zur Berechnung der Humusbilanz für konventionelle und ökologische Anbaubedingungen. Arbeitspapier, FB Pflanzliche Erzeugung, Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Leipzig. <http://orgprints.org/13626/>
- KOLBE, H. (2009a): Vergleich von Methoden zur Berechnung der biologischen N₂-Fixierung von Leguminosen zum Einsatz in der landwirtschaftlichen Praxis. Pflanzenbauwissenschaften 13, 23 – 36.
- KOLBE, H. (2009b): Auswirkungen differenzierter Land- und Bodenbewirtschaftung auf den C- und N-Haushalt der Böden unter Berücksichtigung konkreter Szenarien der prognostizierten Klimaänderung im Freistaat Sachsen. Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Heft 23, 1 – 143.
- KOLBE, H. (2010a): Site-adjusted organic matter balance method for use in arable farming systems. Journal for Plant Nutrition and Soil Science 173, 678 – 691.
- KOLBE, H. (2010b): Phosphor und Kalium im ökologischen Landbau – aktuelle Probleme, Herausforderungen, Dünungsstrategien. In: Phosphor und Kalium – brauchen wir neue Dünungskonzepte? Bundesarbeitskreis Düngung, Frankfurt/Main, 117 – 137.
- KOLBE, H. & I. PRUTZER (2004): Überprüfung und Anpassung von Bilanzierungsmodellen für Humus an Hand von Langzeitversuchen des Ackerlandes. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, FB Pflanzliche Erzeugung, Leipzig. <http://orgprints.org/00003130>
- 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., JÄCKEL, U. & M. SCHUSTER (1999): Entwicklung der Nährstoffgehalte und des pH-Wertes im Tiefenprofil von Testflächen im Verlauf der Umstellung auf ökologischen Landbau. Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung 40, 145 - 151.
- KOLBE, H., MEINCK, S., RIKABI, F. & I. SCHLIEßER (in Vorbereitung): Einfluss von Boden, Klima und Bewirtschaftung auf die Gehalte und Mengen an C_{org}, N_t und das C/N-Verhältnis im Boden. Sächs. Landesamt f. Umwelt, Landwirtschaft u. Geologie, Leipzig.
- KÖRSCHENS, M. (2010): Der organische Kohlenstoff (C_{org}) – Bedeutung, Bestimmung, Bewertung. Arch. Agron. Soil Sci. 56, 375 – 392.
- KÖRSCHENS, M. & E.-G. MAHN (1995): Strategien zur Regeneration belasteter Agrarökosysteme des mitteldeutschen Schwarzerdegebietes. B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Stuttgart.

- KÖRSCHENS, M. & U. WALDSCHMIDT (1995): Ein Beitrag zur Quantifizierung der Beziehungen zwischen Humusgehalt und bodenphysikalischen Eigenschaften. Arch. Acker-Pfl. Boden. 39, 165 – 173.
- KÖRSCHENS, M., ROGASIK, J., SCHULZ, E., BÖNIG, H., EICH, D., ELLERBROCK, R., FRANKO, U., K.-J. HÜLSBERGEN, KÖPPEN, D., KOLBE, H., LEITHOLD, G., MERBACH, I., PESCHKE, H., PRYSTAV, W., REINHOLD, J. & J. ZIMMER (2004): Humusbilanzierung. Methode zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland. Standpunkt. VDLUFA, Bonn. http://www.vdlufa.de/vd_00.htm?4
- KRAWUTSCHKE, M. (2007): Einfluss differenzierter Bodenbearbeitung auf Gehalt und Dynamik der organischen Bodensubstanz in Ackerböden sowie deren Bedeutung für die Humusbilanzierung. Masterarbeit, Universität, Gießen.
- KRISTENSEN, H. L. & K. THORUP-KRISTENSEN (2006): Roots below one meters depth are important for nitrate uptake by annual crops. ASA – CSSA – SSSA International Annual Meeting, Indianapolis, USA, CD-Rom, 205 – 209.
- KROSCHESKI, B. (2008): Anmerkungen zur methodischen Herangehensweise in den Arbeiten. Humboldt-Universität, LGF, Biometrie und Versuchswesen, Berlin (schriftl. Mitteilung).
- KUTSCH, W. L. et al. (2010): The net biome production of full crop rotations in Europe. Agriculture, Ecosystems and Environment 139, 336 – 345.
- LEITHOLD, G. (2011): Anforderungen an die Humusreproduktion zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit. Vortrag, Düngungstagung, Groitzsch. Professur für organischen Landbau d. Universität, Gießen.
- LEITHOLD, G., BROCK, CHR., HOYER, U. & K.-J. HÜLSBERGEN (2007): Anpassung der Humusbilanzierung an die Bedingungen des ökologischen Landbaus. In: Bewertung ökologischer Betriebssysteme – Bodenfruchtbarkeit, Stoffkreisläufe, Biodiversität. KTBL-Schrift 458, 24 - 50.
- LEITHOLD, G., HÜLSBERGEN, K.-J., MICHEL, D. & H. SCHÖNMEIER (1997): Humusbilanz – Methoden und Anwendung als Agrar-Umweltindikator. Initiativen zum Umweltschutz 5, Zeller Verlag, Osnabrück, 43 – 54.
- MÖNICKE, R., BEER, V. & H.-J. KURZER (2004): Ergebnisse der Humusbilanzierung im Freistaat Sachsen – dargestellt an 1.000 repräsentativ verteilten Dauertestflächen. Infodienst der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft, H. 11, 62-71.
- MOKRY, M. (2010): Bodenfruchtbarkeit und Entwicklung des Zustands landwirtschaftlicher Böden. Vortrag, Böblinger Bodenschutztag, Landwirtschaftliches Technologiezentrum, Augustenberg.
- NIEDER, R., BENBI, D. K. & K. ISERMANN (2003): Soil organic matter dynamics. In: BENBI, D. K. & R. NIEDER: Handbook of Processes and Modeling in the Soil-Plant System. Food Products Press, New York, 345 – 408.
- OVERESCH, M. (2007): Kohlenstoff- und Stickstoffumsatz in Sandböden Niedersachsens - Indikatoren umsetzbarer organischer Substanz, Bilanzierung und Bodenprozessmodellierung auf Bodendauerbeobachtungs- und Kompostversuchsflächen. Geo- und Agrarökologie, Band 1, Vechta.
- REINHOLD, J. (mündl. Mitteilung): VDLUFA-Standpunkt Humusbilanzierung und die Anforderungen an die Humusversorgung nach Cross Compliance. Vortrag, Verband d. Humus- u. Erdenwirtschaft, Berlin.
- REINICKE, F. & E. ALBERT (2011): Dynamische Bilanzmethode. Humushaushalt im Blick. Neue Landwirtschaft, Nr. 4, 72 – 74.
- ROGASIK, H. (2005): Humus und Bodenphysik. Vortrag, Humus Informationstag der FAL unter dem Titel " Was Sie schon immer über Humus wissen wollten". ZALF, Müncheberg.
- SCHACHTSCHABEL, P., BLUME, H.-P., HARTGE, K.-H. & U. SCHWERTMANN (1976): Lehrbuch der Bodenkunde. 9. Auflage, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- SCHILLING, G. (2000): Pflanzenernährung und Düngung. Ulmer, Stuttgart.
- SCHMIDT, H. (2007): Untersuchung ackerbaulicher Probleme langfristig ökologisch wirtschaftender Betriebe. Schlussbericht Forschungsprojekt Nr. 030E024. Stiftung Ökologie und Landbau, Ahrweiler. <http://orgprints.org/15767>
- SEIBT, P. (2007): Anwendung einer neuen standortabhängigen Methode zur Humusbilanzierung an sächsischen Dauertestflächen und Vergleich mit anderen üblichen Methoden zur Feststellung des Versorgungsgrades mit organischer Substanz im Hinblick auf Sicherung der Nachhaltigkeit der Betriebe im konventionellen und ökologischen Landbau. Diplomarbeit. TU Dresden, Institut für Bodenkunde und Standortlehre, Dresden. <http://orgprints.org/13152/>
- SMITH, J. & P. SMITH (2007): Introduction to Environmental Modelling. Oxford University Press, Oxford.
- SOMMER, H. (2010): Untersuchungen zur Steigerung der Produktionsintensität im ökologischen Landbau am Beispiel des Lehr- und Versuchsbetriebes Gladbacherhof. Giessener Schriften zum Ökologischen Landbau 3, Verlag Dr. Köster, Berlin.

- VOGT-KAUTE, W. (2011): Humusaufbau durch Leguminosenanbau. Vortrag, Naturland.
http://www.aktiongrundwasserschutz.de/fileadmin/user_upload/PDF_Download/Fachinfos_Veranstaltungen/agws_091030_bofru_humusaufbau_wvk_110712-ok.pdf
- WEHRMANN, J. & H. C. SCHARPF (1979): Der Mineralstickstoffgehalt des Bodens als Maßstab für den Stickstoffdüngbedarf (N_{min} -Methode). *Plant and Soil* 52, 109 – 126.
- WELLMITZ, J. & M. GLUSCHKE (2005): Leitlinien zur Methodvalidierung. Texte, Umweltbundesamt Nr. 1, 1 – 22, Umweltbundesamt, Berlin.
- ZELLER, V., WEISER, CHR., HENNINGBERG, K., REINICKE, F., SCHAUBACH, K., THRÄN, D., VETTER, A. & B. WAGNER (2011): Basisinformationen für eine nachhaltige Nutzung landwirtschaftlicher Reststoffe zur Bioenergiebereitstellung. Schriftenreihe des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassennutzung“ 2. DBFZ, Leipzig.

7 Anhang

Tabelle A1: Methodenvergleich von Bilanzierungsbeispielen für Getreide-, Kartoffel-, Mais- und Kleegrasanbauverfahren für sechs Standortgruppen mit stark unterschiedlicher Ertragsfähigkeit im konventionellen Landbau (in Differenz C_{org} % TM)

Methode	Anbaukonzept	Standortgruppe					
		1	2	3	4	5	6
Getreideanbauverfahren							
Erträge / Organ.	Getreidearten, Korn-Strohverhältnis 0,8 Korntrag (t/ha):	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0
Düngung	Strohertrag (86 % TM; t/ha):	3,2	4,0	4,8	5,6	6,4	7,2
STAND	Getreide-Ganzpflanzensilage bzw. Getreide-Korn u. Strohabfuhr	-0,017	-0,074	-0,131	-0,102	-0,159	-0,238
uW LUFA		-0,159	-0,159	-0,159	-0,159	-0,159	-0,159
oW LUFA		-0,227	-0,227	-0,227	-0,227	-0,227	-0,227
REGRESS							
III		-0,025	-0,105	-0,128	-0,136	-0,148	-0,174
CCB							
20 Jahre		-0,113	-0,033	-0,031	-0,032	-0,026	-0,029
25 Jahre		-0,136	-0,038	-0,035	-0,033	-0,026	-0,027
30 Jahre		-0,157	-0,043	-0,040	-0,034	-0,025	-0,024
34 Jahre		-0,173	-0,046	-0,043	-0,034	-0,025	-0,021
STAND	Getreide-Korn + Strohzufuhr (86 % TM)	0,106	0,080	0,055	0,113	0,088	0,039
uW LUFA		0,041	0,091	0,141	0,191	0,241	0,290
oW LUFA		(-0,014)	(0,023)	(0,059)	(0,095)	(0,132)	(0,168)
REGRESS		-0,027	0,023	0,073	0,123	0,172	0,222
III		0,104	0,069	0,075	0,075	0,074	0,062
CCB							
20 Jahre		-0,065	0,033	0,042	0,117	0,128	0,192
25 Jahre		-0,081	0,035	0,047	0,132	0,144	0,218
30 Jahre		-0,096	0,038	0,051	0,146	0,160	0,242
34 Jahre		-0,107	0,040	0,054	0,156	0,172	0,259
STAND	Getreide-Ganzpflanzensilage bzw. Getreide-Korn u. Strohabfuhr	0,229	0,116	0,002	0,059	-0,055	-0,213
CCB							
20 Jahre	+ Winterzwischenfrucht	-0,052	0,033	0,030	0,075	0,070	0,094
25 Jahre	+ Gründüngung 20 t/ha (10 % TM)	-0,067	0,036	0,033	0,085	0,081	0,110
30 Jahre		-0,080	0,038	0,036	0,095	0,091	0,124
34 Jahre		-0,091	0,040	0,038	0,102	0,099	0,135
STAND	Getreide-Korn + Strohzufuhr (86 % TM)	0,212	0,196	0,170	0,229	0,203	0,154
CCB							
20 Jahre	+ 35 m ³ /ha Schweinegülle (8 % TM)	0,004	0,107	0,111	0,238	0,237	0,331
25 Jahre		-0,003	0,118	0,124	0,266	0,265	0,372
30 Jahre		-0,011	0,129	0,136	0,291	0,291	0,409
34 Jahre		-0,016	0,138	0,145	0,309	0,311	0,436
STAND	Getreide-Korn + Strohzufuhr (86 % TM)	0,155	0,130	0,137	0,196	0,203	0,154
CCB							
20 Jahre	+ Schweinegülle (8 % TM)	-0,035	0,064	0,091	0,203	0,237	0,331
25 Jahre		-0,048	0,071	0,102	0,227	0,265	0,372
30 Jahre		-0,060	0,077	0,112	0,249	0,291	0,409
34 Jahre		-0,068	0,082	0,119	0,266	0,311	0,436

Tabelle A1: (Fortsetzung)

Methode	Anbaukonzept	Standortgruppe					
		1	2	3	4	5	6
Maisanbauverfahren							
Erträge /	Silomais						
Organ.	Frischmasseertrag (t/ha)	35,0	37,5	40,0	45,0	50,0	60,0
Düngung	Rindergülle (7 % TM; m³/ha):	40	40	50	50	60	60
	Körnermais, Korn-Stroh-Verhältnis 1,0						
	Kornertrag (t/ha):	7,5	8,0	9,0	9,5	10,0	11,0
	Strohertrag (86 % TM, t/ha):	7,5	8,0	9,0	9,5	10,0	11,0
STAND	Silomais	-0,176	-0,233	-0,289	-0,261	-0,318	-0,397
uW LUFA		-0,318	-0,318	-0,318	-0,318	-0,318	-0,318
oW LUFA		-0,454	-0,454	-0,454	-0,454	-0,454	-0,454
REGRESS		-0,224	-0,388	-0,382	-0,370	-0,370	-0,355
CCB							
20 Jahre		-0,102	-0,026	-0,029	-0,036	-0,036	-0,046
25 Jahre		-0,123	-0,030	-0,033	-0,037	-0,037	-0,046
30 Jahre		-0,143	-0,034	-0,037	-0,038	-0,037	-0,045
34 Jahre		-0,158	-0,036	-0,040	-0,038	-0,036	-0,043
STAND	Silomais + Rindergülle (7 % TM)	-0,008	-0,049	-0,059	-0,031	-0,042	-0,121
uW LUFA		-0,114	-0,114	-0,063	-0,063	-0,012	-0,012
oW LUFA		-0,250	-0,250	-0,199	-0,199	-0,148	-0,148
REGRESS		-0,060	-0,264	-0,217	-0,204	-0,178	-0,167
CCB							
20 Jahre		-0,050	0,030	0,036	0,078	0,087	0,110
25 Jahre		-0,065	0,033	0,040	0,089	0,100	0,128
30 Jahre		-0,078	0,035	0,043	0,099	0,111	0,144
34 Jahre		-0,089	0,037	0,046	0,106	0,120	0,156
STAND	Körnermais + Strohzufuhr (86 % TM)	0,000	-0,045	-0,078	-0,039	-0,083	-0,140
uW LUFA		0,150 (0,023)	0,182 (0,045)	0,244 (0,091)	0,275 (0,113)	0,306 (0,136)	0,369 (0,182)
oW LUFA		0,014	0,045	0,108	0,139	0,170	0,233
REGRESS		-0,001	-0,078	-0,054	-0,057	-0,053	-0,043
CCB							
20 Jahre		0,064	0,162	0,164	0,318	0,294	0,410
25 Jahre		0,064	0,181	0,184	0,354	0,331	0,460
30 Jahre		0,064	0,198	0,202	0,387	0,363	0,504
34 Jahre		0,064	0,211	0,216	0,411	0,387	0,537

Tabelle A1: (Fortsetzung)

Methode	Anbaukonzept	Standortgruppe					
		1	2	3	4	5	6
Kartoffelanbauverfahren							
Erträge /	Speise- oder Verarbeitungsware						
Organ.	Knollenertrag (t/ha)	30	40	40	50	50	55
Düngung	+Stalldung (verrottet, 25 % TM; t/ha)	25	30	30	35	35	40
STAND	Speise- oder Verarbeitungskartoffeln	-0,289	-0,346	-0,403	-0,374	-0,431	-0,511
uW LUFA		-0,431	-0,431	-0,431	-0,431	-0,431	-0,431
oW LUFA		-0,567	-0,567	-0,567	-0,567	-0,567	-0,567
REGRESS		-0,238	-0,413	-0,396	-0,398	-0,398	-0,405
CCB							
20 Jahre		-0,101	-0,006	-0,011	0,024	0,017	0,034
25 Jahre		-0,122	-0,008	-0,013	0,030	0,022	0,043
30 Jahre		-0,142	-0,009	-0,015	0,035	0,027	0,052
34 Jahre		-0,156	-0,010	-0,016	0,039	0,031	0,059
STAND	Speise- oder Verarbeitungskartoffeln +Stalldung	0,051	0,062	0,006	0,102	0,045	0,034
uW LUFA		0,136	0,250	0,250	0,363	0,363	0,477
oW LUFA		0,000	0,113	0,113	0,227	0,227	0,340
REGRESS		-0,012	-0,103	-0,084	-0,035	-0,027	0,023
CCB							
20 Jahre		-0,006	0,116	0,103	0,258	0,227	0,340
25 Jahre		-0,015	0,129	0,115	0,288	0,255	0,383
30 Jahre		-0,024	0,142	0,126	0,315	0,280	0,420
34 Jahre		0,030	0,151	0,135	0,335	0,300	0,448
Futter-Leguminosenanbauverfahren							
Erträge	Kleegras 50/50 (t/ha)	25	30	35	40	45	55
STAND	Kleegras 50/50						
	a)	0,482	0,425	0,369	0,397	0,340	0,261
	b)	0,369	0,312	0,255	0,284	0,227	0,148
uW LUFA							
	a)	0,340	0,340	0,340	0,340	0,340	0,340
	b)	0,227	0,227	0,227	0,227	0,227	0,227
oW LUFA							
	a)	0,454	0,454	0,454	0,454	0,454	0,454
	b)	0,284	0,284	0,284	0,284	0,284	0,284
REGRESS		0,423	0,324	0,313	0,299	0,312	0,301
CCB							
20 Jahre		-0,063	0,016	0,010	0,028	0,020	0,020
25 Jahre		-0,079	0,017	0,010	0,034	0,026	0,028
30 Jahre		-0,094	0,018	0,011	0,040	0,031	0,035
34 Jahre		-0,105	0,019	0,011	0,044	0,035	0,042

Werte in Klammern: Abbauintensive Standorte nach uW LUFA (= 80 kg C/t Stroh)

STAND: niedrige bzw. mittlerer Wert für Stroh (= 41,3 kg bzw. 67,9 kg C/t Stroh); niedriger Wert für Gründüngung (= 2 kg/t Grünschnitt); mittlere Werte für Gülle, niedrige Werte für Stalldung

uW = untere Werte; oW = obere Werte; a) = Hauptnutzungsjahr; b) = Aussaatjahr

Untersuchungen zum Niveau der Humusversorgung in Sachsen

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	84
2	Material und Methoden	84
2.1	Dauertestflächen und landwirtschaftliche Betriebe aus Sachsen.....	84
2.2	Humusbilanzmethoden und VDLUFA-Bewertungssystem.....	86
2.3	Überblick zur Genauigkeit von Humusbilanzmethoden.....	87
3	Ergebnisse und Diskussion	89
3.1	Durchschnitt von Sachsen	89
3.2	Agrarstrukturgebiete	94
3.3	Bodenarten	101
4	Schlussfolgerungen	101
5	Zusammenfassung	101
6	Literatur	103

1 Einleitung

Aufgrund der positiven Wirkungen des Humus auf den Boden, die Bodenfruchtbarkeit, das Ertragspotenzial des Standortes und auch zur Bindung von klimaschädlichem Kohlendioxid ist auf eine ausgeglichene Versorgung der Ackerflächen mit organischer Substanz zu achten. Auf jeden Fall muss verhindert werden, dass die Humusgehalte abnehmen. In den letzten Jahren sind von mehreren Autoren Untersuchungen zum Versorgungsgrad von landwirtschaftlichen Ackerflächen aus allen Regionen Sachsens unternommen worden. Hierbei wurden stark divergierende Ergebnisse über die Versorgung mit organischer Substanz ermittelt. Durch einige Analysen wurden große Fehlbeträge an organischer Substanz festgestellt (MÖNICKE et al. 2005, 2007; REINICKE & ALBERT 2011): „Insgesamt ist festzustellen, dass der hohe Anteil der Humusbilanzklassen A und B von durchschnittlich 47 % für Sachsen sowie der negative mittlere Bilanzsaldo ... ein ernst zu nehmendes Signal ist, der Humusbilanzierung eine besondere Aufmerksamkeit zu schenken.“

In einer Diplomarbeit wurde demgegenüber kein deutlicher Mangel im Versorgungsniveau mit organischer Substanz im Durchschnitt Sachsens ermittelt. Es wurde sowohl ein gewisser Grad an Unterversorgung als auch an Überversorgung festgestellt. Zudem bestand ein z. T. noch erhebliches Abfuhrpotenzial an organischer Substanz z. B. in Form von Stroh (SEIBT 2007). Darüber hinaus konnten deutliche Unterschiede in den Berechnungsergebnissen zwischen den verwendeten Methoden zur Humusbilanzierung herausgearbeitet werden. In der Zwischenzeit wurden sowohl weitere Untersuchungen angestellt als auch neue Erkenntnisse erlangt. Daher werden in diesem Heft die bisher ermittelten Untersuchungen über das Versorgungsniveau mit organischer Substanz auf den Betrieben in Sachsen zusammengestellt und auf Grund der methodenbedingten Unterschiede einer genauen Beurteilung zugeführt.

2 Material und Methoden

2.1 Dauertestflächen und landwirtschaftliche Betriebe aus Sachsen

Die Dauertestflächen (DTF) auf landwirtschaftlichen Betrieben werden vom Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie unterhalten. In der Arbeit von MÖNICKE et al. (2004) wurden 1.058 DTF verwendet, eine Auswahl von vollständigen Datensätzen aus 760 Flächen wurden für weitere detaillierte Untersuchungen herangezogen. Davon werden 28 Flächen ökologisch und 732 konventionell bewirtschaftet (SEIBT 2007). Die vorliegenden Daten stammen aus den Jahren 1998 bis 2003. Die betrachteten Flächen sind annähernd repräsentativ im gesamten Gebiet des Freistaates Sachsen verteilt (Abb. 1).

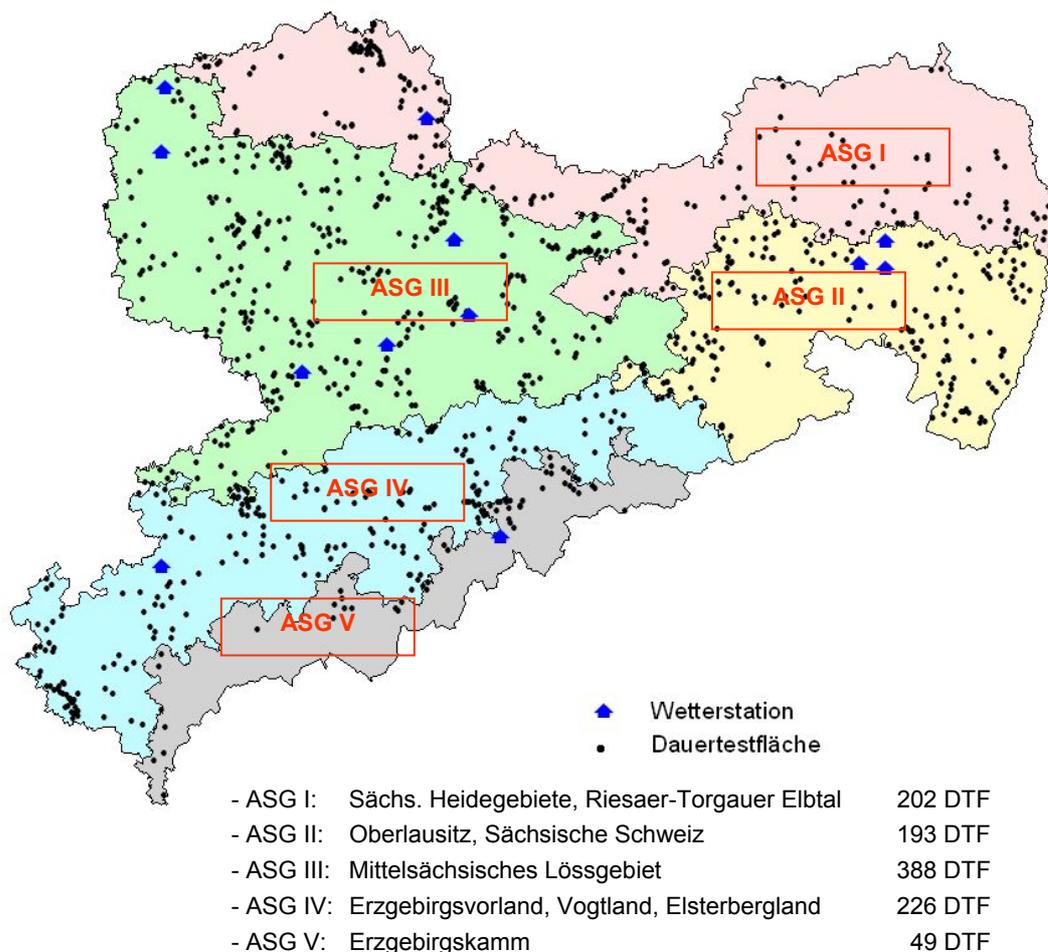


Abbildung 1: Verteilung der Dauertestflächen in den Agrarstrukturgebieten (ASG) Sachsens

In einer Studie wurden Auswirkungen des Klimawandels unter Nutzung durchschnittlicher Bewirtschaftungsverhältnisse des konventionellen und ökologischen Ackerbaus (Tab. 1) auf die Versorgung mit organischer Substanz für folgende drei Agrarstrukturgebiete für die Zeitperiode 2000-2050 berechnet (KOLBE 2009):

- **Agrarstrukturgebiet I** „Sächsische Heidegebiete, Riesaer-Torgauer Elbtal“, D-Standort (anlehmiger Sand), 1,36 % C_{org}, 0,14 % N_t, um 135 m NN, 9,1 °C Durchschnittstemperatur, 503 mm Jahresniederschlag
- **Agrarstrukturgebiet III** „Mittelsächsisches Lössgebiet“, Lö-Standort (sandiger Lehm), 1,38 % C_{org}, 0,16 % N_t, um 200 m NN, 9,7 °C, 594 mm
- **Agrarstrukturgebiet IV** „Erzgebirgsvorland, Vogtland, Elsterbergland“, V-Standort (sandiger Lehm), 2,12 % C_{org}, 0,24 % N_t, um 420 m NN, 8,2 °C, 688 mm

Tabelle 1: Varianten der durchschnittlichen konventionellen und ökologischen Bewirtschaftung auf drei Agrarstrukturgebieten in Sachsen um das Jahr 2000

Variante (Nr.)	Verfahren (Kurzbezeichnung)	Fruchtfolge (Abfolge)	Getreide (%)	Hackfrüchte (%)	Leguminosen (%)	Düngung/legume N-Bindung (kg N/ha*a)	
KON	Ist-Zustand konventioneller Landbau	ASG I: WW-WG*-RA-WW-WR(ZF)-SM-TR-ER ASG III: WW-WG-RA-WW(ZF)-ZR-WW-TR-ER ASG V: WW-WG*-RA-WW(ZF)-SM-TR(ZF)-SG-KG	75 75 75	13 13 13	12 12 12	103 N; 38 R/ST; 12 L 122 N; 39 S/R; 17 L 106 N; 64 R/S/ST; 30 L	
	ÖKO	Ist-Zustand ökologischer Landbau	ASG I: KG-KG-WW*-WR(ZF)-ER-KA-WR*(ZF)-SG ASG III: KG-KG-WW*(ZF)-SM-WR(ZF)-ER-WW-WG ASG V: KG-KG-WW*-SG(ZF)-ER-RA-WR-WG*	50 50 63	13 13 0	37 37 37	28 ST/R; 37 L 28 ST/R; 78 L 46 R/ST; 74 L

Fruchtarten: WW = Winterweizen; WR = Winterroggen; TR = Triticale; WG = Wintergerste; SG = Sommergerste; SM = Silomais; KM = Körnermais; ER = Erbse; RA = Winterraps; KA = Kartoffeln; ZR = Zuckerrüben; KG = Klee gras; WK = Weißkohl; ZF = Zwischenfrucht (als Gründüngung); GPS = Ganzpflanzensilage aus Roggen, Leguminosen

Durchschnittl. Ertragsniveau im Ökolandbau (konvent. Landbau = 100 %): 59WW, 59WR, 53WG, 71TR, 78WR, 78SM, 60SG, 75ER, 54KA, 99ZR, 100KG
Düngung: N = mineral. N; R = Rindergülle; S = Schweinegülle; ST = Stalldung; Bio-G = Biogasgülle; K = Kompost; L = legume N-Bindung; * = Stroh-Abfuhr

WEISER et al. (2011) haben das Abfuhrpotenzial an Getreidestroh für Deutschland mit mehreren Humusbilanzmethoden im Durchschnitt der Jahre 1999, 2003 und 2007 ermittelt. In diesem Zusammenhang sind auch die Humusbilanzen der sächsischen Landkreise berechnet worden. REINICKE & ALBERT (2011) haben die Bewirtschaftungsdaten von 31 landwirtschaftlichen Betrieben aus sieben Regionen in Sachsen erfasst und mit mehreren Methoden die Humusbilanzen ermittelt.

2.2 Humusbilanzmethoden und VDLUFA-Bewertungssystem

Mit dem Modell REPRO (HÜLSBERGEN 2003) wurde die Humusbilanzierung mit statischen Koeffizienten gerechnet, wobei bei der Koeffizientenhöhe zwischen konventionellen und ökologischen Anbauverfahren unterschieden wird (LEITHOLD et al. 1997; **REPRO-stat**). Außerdem wurde eine Methode mit dynamischen Koeffizienten unter Berücksichtigung weiterer Faktoren (insbesondere N-Düngung, Ertragshöhe) verwendet (**REPRO-dyn**). Mit der **VDLUFA-Methode** wurden die **unteren Werte** und die **oberen Werte** der Fruchtartenkoeffizienten für die Analysen verwendet (KÖRSCHENS et al. 2004). Die standortangepasste Methode ist eine Weiterentwicklung der unteren Werte der VDLUFA-Methode. Bei den Berechnungen wurden die Fruchtartenkoeffizienten entsprechend den Standortbedingungen in sechs Standortgruppen gegliedert (KOLBE 2007, 2010; **STAND-Methode**).

Bei der Bewertung der Bilanzsalden wurde zwischen konventionellem und ökologischem Landbau unterschieden (Tab. 2).

Tabelle 2: Versorgungsgruppen (VG) für Humusbilanzen im konventionellen und ökologischen Landbau

Versorgungsgruppe	Humusäquivalente (HÄQ in kg C/ha) Konventioneller Landbau	Ökologischer Landbau
A (sehr niedrig)	≤ -200	≤ -200
B (niedrig)	-200 bis -76	-200 bis -76
C (optimal)	-75 bis +100	-75 bis +400
D (hoch)	+101 bis +300	+401 bis +600
E (sehr hoch)	≥ 300	≥ 600

2.3 Überblick zur Genauigkeit von Humusbilanzmethoden

Für die Interpretation der Ergebnisse ist es außerordentlich wichtig zu wissen, welche Zielmerkmale mit den Bilanzierungsverfahren verfolgt werden und wie genau die Methoden einzuschätzen sind. Ohne Kenntnisse über diese Merkmale sind weder objektive Einschätzungen über das tatsächlich vorhandene Versorgungsniveau mit organischer Substanz, die voraussichtliche Entwicklung der Humusgehalte des Bodens noch konkrete Aussagen zu Abfuhrpotenzialen z. B. für Stroh oder zu anderen Handlungsoptionen möglich. Daher werden an dieser Stelle die wichtigsten Merkmale zur Charakteristik der Methoden zusammenfassend aufgeführt (Tab. 3).

Tabelle 3: Überblick über die Genauigkeit von Humusbilanz-Methoden

Methode	Korrelation ¹⁾ zw. Modell-Ergebnis u. Feldversuch		Mittlere Abweichung (0 ≈ 100 % Bedarfsdeckung mit organ. Substanz für genaue Reproduktion)			Ertrags-sicherung in VG C (opt = Optimaler Ertrag; max = Ertrags-Maximum)	Korrela-tion zw. Humus- u. N-Saldo (Praxis-/ Exaktver-suche (r))	N-Saldo bei Über-gang zw. VG D/E (kon. L. 300 kg, öko. L. 600 kg C/ha) (kg N/ha)	Standort-anpas-sung (Bewer-tung)	Einschätzung Methoden-genauigkeit
	C _{org} (r)	N _t (r)	C _{org} (%)	Humussaldo (kg C/ha)	Einschätzg. Reprodukt.					
REPRO-dyn	ca. 0,19	ca. 0,37	ca. +0,18	ca. +300	stark erweitert	max	0,52 / -	z.T. ≥ 100	ja (unzu-reichend)	nicht quantitativ
REPRO-stat	0,22	0,41	+0,14 (Öko: +0,28)	+250 (Öko: +500)	erweitert (Öko: stark erweitert)	max	0,54 / 0,81	ca. 100	nein	nicht quantitativ
VDLUFA obere Werte	0,27	0,46	+0,13	+230	erweitert	max (opt = VG B)	0,54 / 0,81	≥ 50	nein	halb-quantitativ
VDLUFA untere Werte	0,29	0,48	+0,02	+35	einfache	opt (Öko: linear – opt)	0,57 / 0,82	≤ 50	nein	halb-quantitativ
STAND	0,74	0,54	+0,06	+100	einfache bis genau	opt	0,61 / 0,88	z.T. ≥ 50	ja (befriedigend)	quantitativ
CCB (zum Vergleich)	0,74	0,37	-0,01	-18	genau	-	-	-	ja (gut)	quantitativ

Quellen: BROCK (2009), BROCK et al. (2008); KOLBE & PRUTZER (2004); FRANKO et al. (2011), (2012); KOLBE (2012)

VG = VDLUFA-Versorgungsgruppe

¹⁾ Bewertung Korrelationskoeffizient (r): ≤ 0,25: keine bis schwache Beziehung; 0,25-0,50: schwache bis mäßige Beziehung; 0,50-0,75: deutliche bis gute Beziehung; ≥ 0,75: sehr hohe und enge Beziehung

Zunächst können je nach hauptsächlicher Ausrichtung der Methoden unterschiedliche Werkzeuge zur Beurteilung herangezogen werden. Steht bei der Methode z. B. eine Berechnung der Zuführung an organischer Substanz zur Erreichung eines bestimmten (optimalen) Ertragsniveaus der Fruchtarten als Hauptanwendungsziel fest (wie es manchmal für die VDLUFA-Methode beziffert wird, vgl. KÖRSCHENS et al. 2004), so muss die Methode dieses Anwendungsziel auch im Namen verdeutlichen. In diesen Fällen muss dann auch eine Überprüfung der Genauigkeit mit geeigneten Versuchen erfolgen, in denen die Ertragsreaktion im Vordergrund steht und möglichst genau quantifiziert wird.

Bei den hier vorliegenden Methoden handelt es sich aber um Verfahren der Humusbilanzierung, weil sie außer in der Namensnennung oder in der Weise, wie sie in der Praxis gesehen, verstanden oder angewendet werden, eindeutig für die Berechnung von Humusbilanzen verwendet werden. Hierbei wird laut gesetzlichen Vorgaben und auch in der landläufigen Praxis ein Bezug zur Veränderung der Humusgehalte bzw. -mengen im Boden hergestellt. Daher müssen zur Überprüfung

dieser Methoden auch die angesprochenen Merkmale, in der Regel also der Humusgehalt des Bodens, herangezogen werden. Begleitmerkmale anderer Art (N_i -Gehalt, N-Saldo, Ertragsreaktion etc.) können zusätzlich bewertet werden.

Die zusammengetragenen Bewertungskriterien haben im Vergleich zu früheren Arbeiten deutlich an Menge und Qualität zugenommen, sodass Stärken und Schwächen der Methoden jetzt besser beurteilt werden können. Die erhaltenen Ergebnisse weisen auf z. T. deutliche Unterschiede zwischen den aufgeführten Bilanzierungsmethoden hin. Auf Grund der dargelegten Prämissen können die Methoden in drei Gruppen unterschiedlicher Genauigkeit eingeteilt werden:

■ REPRO-dyn, REPRO-stat

Es handelt sich um orientierende, nicht quantitative Methoden mit keinen oder nur schwachen Korrelationen zwischen den berechneten Humussalden und den Humusgehalten des Bodens von Dauerversuchen. Auf Grund der hohen statistischen Streuung der berechneten Ergebnisse können keine Aussagen über die Veränderung der Bodenhumusgehalte getroffen werden. Bei ein und demselben berechneten Humussaldo können die Gehalte an Humus ansteigen, abfallen oder gleich hoch bleiben. Bei ausgeglichenen Salden erfolgen einerseits im Durchschnitt eine stark erweiterte Humusreproduktion sowie andererseits eine Unterschätzung von Abfuhrgrenzen z. B. für Stroh. In VG C wird ein weitgehend maximales Ertragsniveau der Fruchtarten erzielt. Standortunterschiede werden sehr ungenau abgebildet bzw. können nicht berücksichtigt werden.

■ VDLUFA-Methode

Es handelt sich um orientierende bis halb-quantitative Methoden mit schwachen bis mäßigen Korrelationen zwischen den berechneten Humussalden und den Humusgehalten des Bodens. Auf Grund der hohen statistischen Streuung der berechneten Ergebnisse können kaum gesicherte Aussagen über die Veränderung der Bodenhumusgehalte getroffen werden. Standortunterschiede können nicht berücksichtigt werden, was erheblich zur Ungenauigkeit beiträgt. Bei ausgeglichenen Salden erfolgt im Durchschnitt eine einfache bis erweiterte Humusreproduktion und es werden in VG C bei Verwendung der unteren Werte weitgehend optimale und bei Nutzung der oberen Werte bereits maximale Erträge der Fruchtarten erzielt. Auf bestimmten Standorten können Abfuhrpotenziale bei Verwendung der unteren Werte überschätzt werden.

■ STAND, CCB

Es handelt sich um Methoden mit halb- bis voll-quantitativen Ergebnissen mit deutlichen bis hohen Korrelationen zwischen den berechneten Humussalden bzw. -gehalten und den experimentell ermittelten Humusgehalten des Bodens. Auf Grund der geringeren statistischen Streuung der berechneten Ergebnisse können gesicherte Aussagen über die Veränderung der Humusgehalte des Bodens getroffen werden. Daher ist bei der STAND-Methode eine Umrechnung der Bilanzergebnisse in C_{org} -Gehalte nach folgender Gleichung möglich: Differenz an C_{org} -Gehalt (%) in ca. 25 Jahren = Humussaldo (kg C als Humusäquivalente/ha) \times 0,0005672. Standortunterschiede können in befriedigender bis guter Weise berücksichtigt werden, was erheblich zur Genauigkeit der Methoden beiträgt. Bei ausgeglichenen Salden erfolgt im Durchschnitt eine einfache bis genaue Humusreproduktion. Es werden in VG C optimale Erträge der Fruchtarten erzielt (STAND), Abfuhrpotenziale können weitgehend genau eingeschätzt werden.

Am Beispiel des Getreideanbaus mit Strohabfuhr treten zwischen den Methoden deutliche Unterschiede in den berechneten Humussalden auf den verschiedenen Standorten auf. Während für die unteren Werte der LUFA-Methode nur eine Übereinstimmung mit der STAND-Methode im Bereich der Standortgruppe 5 zu erkennen ist, trifft dies für die oberen Werte nur noch für extreme Lehm-Standorte mit hohem Humusumsatz zu (Standortgruppe 6, Tab. 4).

Tabelle 4: Vergleich von Berechnungsergebnissen mit den unteren und oberen Werten der LUFA-Methode im Vergleich zur STAND-Methode (Auswahl von leichten Böden in Gruppe 1 bis schwere Böden der Bodenart Lehm und hoher Umsetzungsaktivität in Gruppe 6)

Methode	Standortgruppe					
	1	2	3	4	5	6
Getreideanbau mit Strohabfuhr; Humussalden (kg C/ha)						
STAND-Methode	-30	-130	-230	-180	-280	-420
Untere Werte LUFA	-280	-280	-280	-280	-280	-280
Obere Werte LUFA	-400	-400	-400	-400	-400	-400

Grüne Werte: Differenz < 50 kg C/ha gegenüber der STAND-Methode

Rote Werte: Differenz > 150 kg C/ha im Vergleich zur STAND-Methode

Auf den anderen Standortgruppen in Richtung abnehmende Ton- bzw. Feinanteile des Bodens nimmt die Übereinstimmung zwischen der LUFA-Methode und der standortangepassten Methode immer weiter ab. Aus diesen Ergebnissen kann erkannt werden, dass die geringe Übereinstimmung besonders der oberen Werte der LUFA-Methode im Wesentlichen auf den experimentell nicht genügend abgesicherten Fruchtartenkoeffizienten beruht. Für die meisten Standorte treffen diese Koeffizienten nicht zu und liefern z. T. deutlich ungenaue Ergebnisse. Die aufgeführten Unterschiede sind als erheblich zu werten, was an einigen Beispielen verdeutlicht werden soll. So werden auf den leichten Böden der Standortgruppen 1-2 Differenzen zwischen der STAND-Methode und den unteren Werten der LUFA-Methode (oberen Werten der LUFA-Methode) von 150-250 kg C/ha (270-370 kg C/ha) ausgewiesen, die umgerechneten Fehlbeiträgen von 19-31 dt/ha (34-46 dt/ha) an Stroh je Jahr gleichzusetzen wären.

3 Ergebnisse und Diskussion

Anhand des relativ gut dokumentierten Dauertestnetzes in Sachsen wurden entsprechende Schlagkarteiauswertungen für eine Zeitperiode von sechs Jahren vorgenommen, deren Ergebnisse zunächst im Mittelpunkt der Darstellungen stehen sollen. Die Berechnungen sind immer mit verschiedenen Methoden ermittelt worden, sodass es direkte Vergleichsmöglichkeiten gibt, die dann mit Hilfe der im Kapitel Material und Methoden dargestellten Methodengenauigkeiten in Relation gestellt und einer eindeutigen Bewertung zugeführt werden können.

3.1 Durchschnitt von Sachsen

In zwei Studien wurden auf Basis von 1.058 sowie von 760 DTF zunächst die Humusbilanzen ermittelt. Danach wurden Klassenhäufigkeiten gebildet, indem die Ergebnisse entsprechend der fünf VDLUFA-Versorgungsgruppen (VG) von A (sehr niedrig) bis E (sehr hoch) eingestuft worden sind (Abb. 2). Zunächst ist festzustellen, dass je nach verwendeter Methode zur Humusbilanzierung z. T. ganz verschiedene Ergebnisse berechnet werden.

Für die anzustrebende optimale Versorgungsgruppe C werden zwar mit allen Methoden die meisten Einstufungen ermittelt. Doch sind es bei den REPRO-basierten Verfahren sowie den oberen Werten LUFA nur gut ein Drittel der Fälle, während bei der standortangepassten Methode fast 50 % der Flächen als optimal eingestuft worden sind. Dagegen werden mit der STAND-Methode und auch bei Verwendung der unteren Werte der VDLUFA-Methode deutlich geringere Flächenanteile als unterversorgt veranschlagt als mit den anderen Verfahren. Bei Verwendung des REPRO-dyn-Verfahrens werden sogar annähernd 50 % der Schläge im Durchschnitt Sachsens mit organischer Substanz als unterversorgt eingestuft.

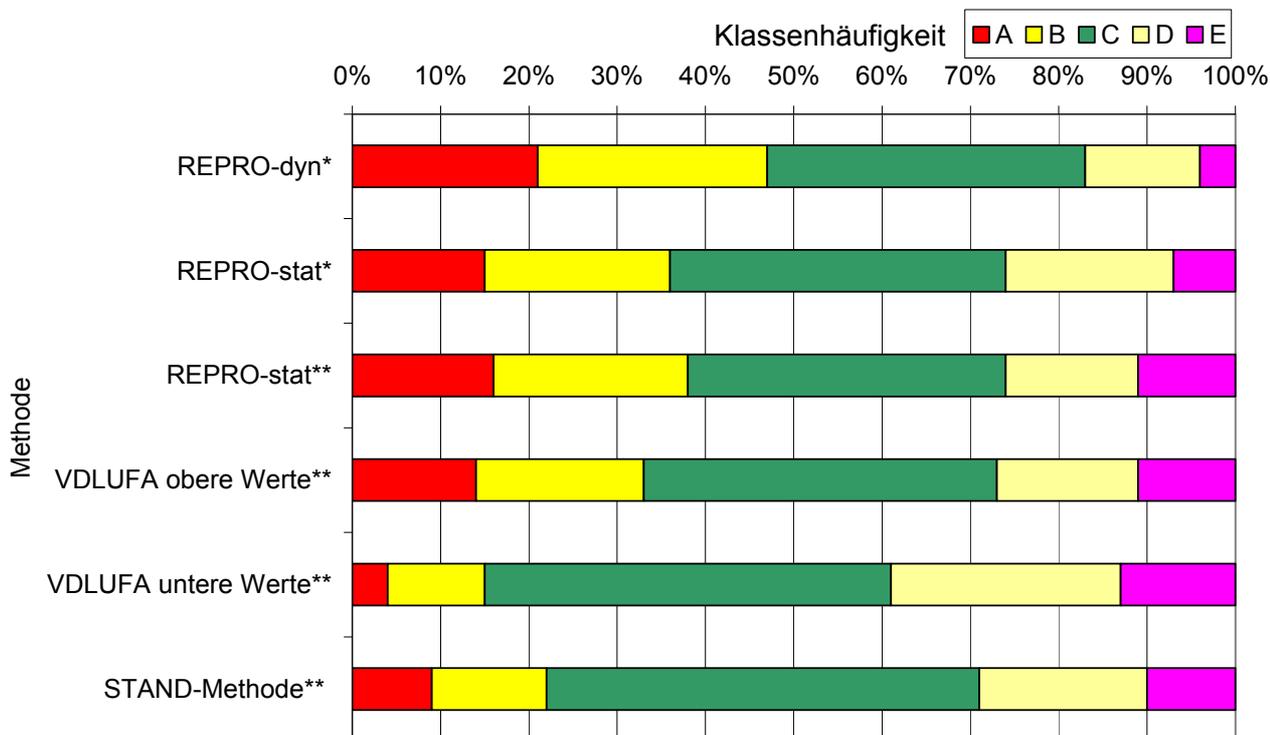


Abbildung 2: Klassenhäufigkeiten (in %) der Humusversorgung der Dauertestflächen in Sachsen nach verschiedenen Bilanzierungsmethoden (* 1.058 Flächen nach MÖNISCHE et al. 2005; ** 760 Flächen nach SEIBT 2007)

Werden die Ergebnisse der Methodengenauigkeit mitbetrachtet, so können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden (siehe auch Tab. 3 u. 4). Bei den REPRO-basierten Verfahren sowie auch bei den oberen Werten LUFA wird ein deutlich über der einfachen Reproduktion an organischer Substanz einzustufender Versorgungsgrad als anzustrebender Optimalzustand angesehen. Daher werden mit diesen Methoden dann auch wesentlich höhere Anteile mit einer als zu niedrig angesehenen Versorgung zugeteilt. Dagegen wird nur ein sehr geringer Anteil einer Überversorgung in VG D bzw. E zugewiesen.

Wie aus Ergebnissen von Dauerversuchen jedoch eindeutig abzulesen ist, würde eine dieser Methoden entsprechende optimale Versorgung mit organischer Substanz bereits zu einer nicht unerheblichen Zunahme der Humusgehalte führen, obwohl lediglich ein 100%iger Versorgungsgrad ausgewiesen wurde. Eine Berechnung von Abfuhrpotenzialen z. B. für Stroh würde dann zu deutlich niedrigeren Beträgen führen als bei Nutzung von anderen genaueren Methoden, wie ja auch aus etlichen Kalkulationen verschiedener Autoren entnommen werden kann (vgl. SEIBT 2007; WEISER et al. 2011). Unter der Voraussetzung gleichbleibender Humusgehalte sind diese aufgeführten Verfahren daher für eine relativ genaue Berechnung von z. B. Abfuhrpotenzialen an Stroh als sehr ungeeignet auszuweisen.

Aus der Analyse der Dauertestflächen geht zusammenfassend hervor, dass in Sachsen auf Basis der deutlich genaueren standortangepassten Methode zur Humusbilanzierung auf etwa der Hälfte der Ackerflächen eine optimale Versorgung mit organischer Substanz gegeben ist (Abb. 2). Nicht ganz ein Drittel der Schläge erhält eine hohe bis sehr hohe Versorgung, während der Anteil mit einer Unterversorgung bei etwas über 20 % zu veranschlagen ist. Der Anteil mit starker Unterversorgung (VG A) liegt bei 9 %. Hier reicht der Versorgungsgrad mit organischer Substanz nicht aus, sodass auch die Humusgehalte mit der Zeit abfallen werden. Die berechneten Humusbilanzen können für das Land Sachsen mit folgenden Mittelwerten (kg C/ha) und durchschnittlichen Versorgungsgruppen (VG) ausgewiesen werden:

- REPRO-dyn -58 C
- REPRO-stat 8 C
- obere Werte LUFA 19 C
- untere Werte LUFA 137 D
- STAND-Methode 91 C

Werden die Ergebnisse im Durchschnitt der Standorte zusammengefasst, so kommt es meistens vor, dass die STAND-Methode einen Mittelwert ausweist, der zwischen den oberen und unteren Werten des LUFA-Verfahrens liegt, während die anderen Methoden weit jenseits angesiedelt sind.

Die gesamten DTF können weiterhin in Flächen eingeteilt werden, die einer konventionellen und in einem kleinen Anteil einer ökologischen Bewirtschaftung unterliegen. Die mittleren Humussalden und dazugehörigen Versorgungsgruppen der verwendeten Methoden können entsprechend Tabelle 5 zugeteilt werden.

Tabelle 5: Mittlere Humussalden (kg C/ha) und Versorgungsgruppen der konventionellen und ökologischen DTF, ermittelt mit verschiedenen Methoden der Humusbilanzierung

Methode	Konventioneller Landbau (konv. Bewertung)	Ökologischer Landbau (ökolog. Bewertung)
REPRO-stat	3 C	143 C
obere Werte LUFA	15 C	160 C
untere Werte LUFA	135 D	188 C
STAND-Methode	89 C	138 C

Im Durchschnitt kann durch fast alle Untersuchungen die Erreichung optimaler Versorgungszustände (VG C) für beide Anbauverfahren ausgewiesen werden. Die ökologischen Flächen sind durch etwas höhere Humussalden gekennzeichnet. Eine Differenz von ca. 50 kg C/ha zwischen den Anbauverfahren, wie sie durch die STAND-Methode erhalten wird, würde ungefähr zu einer geringen Anreicherung an Humus von 0,03 % C_{org} führen. In anderen Untersuchungen zur C-Sequestrierung wurden etwas größere Beträge von durchschnittlich 0,05 % C_{org} erhalten (KOLBE 2009). Es fällt auf, dass relativ geringe Differenzen zwischen beiden Anbauverfahren mit den genaueren Methoden ermittelt, während bei den ungenaueren Verfahren größere Differenzen ausgewiesen werden.

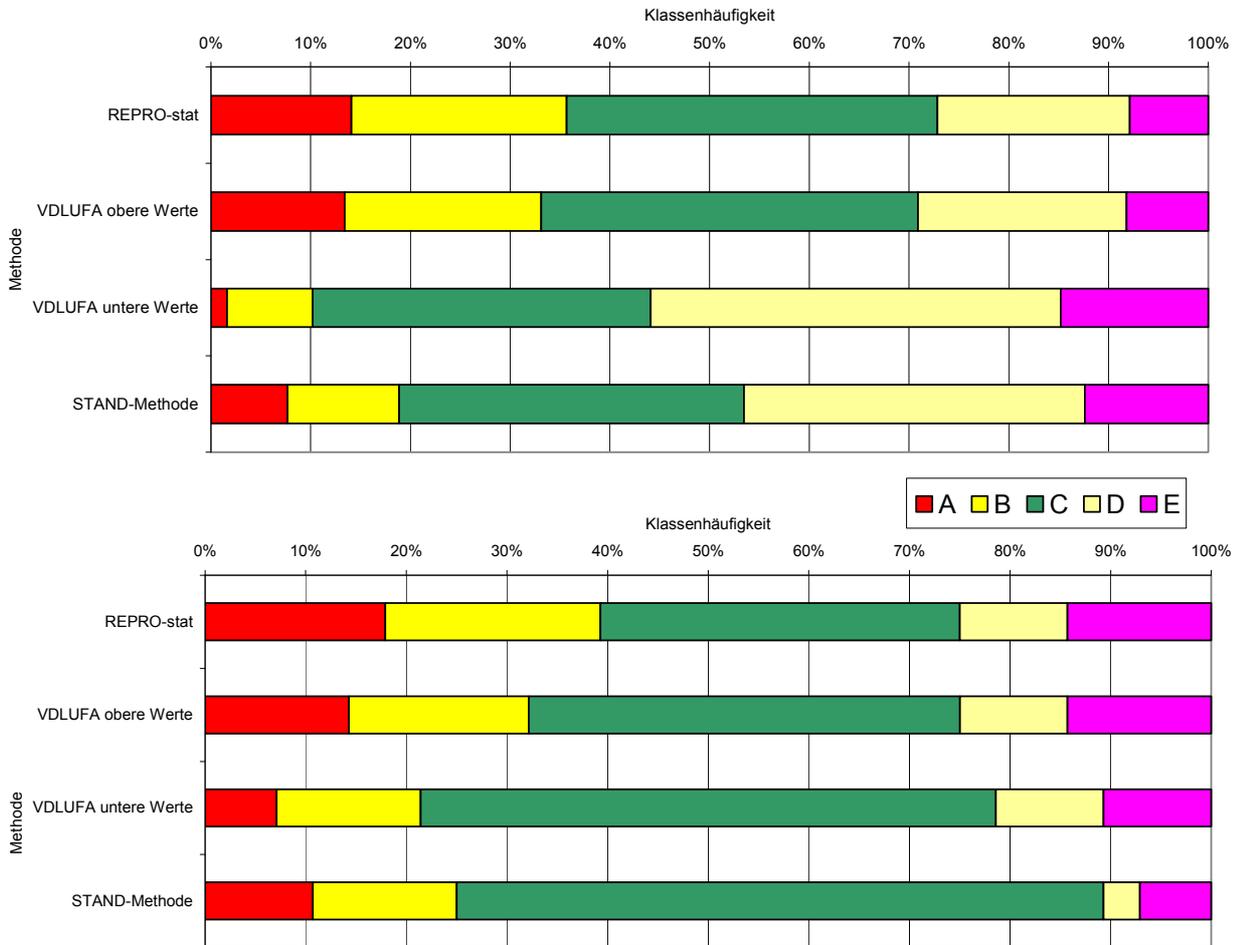


Abbildung 3: Klassenhäufigkeiten (in %) der Humusversorgung der konventionellen (N = 732, oben) sowie der ökologischen Dauertestflächen (N = 28, unten)

Abgesehen von diesen Durchschnittswerten sind zwischen den Anbauverfahren noch weitere Unterschiede festzustellen (Abb. 3). So werden bei Verwendung der genaueren Verfahren (untere Werte LUFA, STAND-Methode) bei den konventionellen Flächen wesentlich höhere Anteile mit der Bewertung D (hoch), z. T. auch als E (sehr hoch) ermittelt als bei den ökologischen Flächen. Demgegenüber werden für die ökologischen Flächen Anteile von z. T. über 60 % der optimalen VG C zugewiesen. Trotzdem gibt es auch bei diesen sechsjährigen Untersuchungen einen Anteil von bis zu 25 % der Flächen, die eine Unterversorgung mit organischer Substanz im ökologischen Landbau aufweisen. Diese Anteile liegen in den konventionellen Betrieben lediglich zwischen 10 % und 19 % und sind damit niedriger als im ökologischen Landbau.

Einige Komponenten der Humusbilanz können gesondert aufgeführt werden. Hierdurch kann aufgezeigt werden, welche Arten an organischer Substanz hauptsächlich zur Zufuhr beitragen. Nachfolgend werden in Tabelle 6 zwei Analysen aufgeführt. Nach diesen Ergebnissen erfolgt die Versorgung mit organischer Substanz in Sachsen hauptsächlich über die Strohzufuhr und die organischen Düngemittel (Stallmist, Gülle). Es folgt die Zufuhr über Fruchtarten, die zur Humusmehrung beitragen (Ackerfutter, Zwischenfrüchte, Stilllegung, Körnerleguminosen) und die Gründüngung. Die zwei Studien sind zwar streng genommen nicht direkt miteinander vergleichbar, doch lassen sich gewisse Trends herauslesen. Danach haben die Zufuhren über organische Düngemittel und der Anteil an Humusmehrern in den Fruchtfolgen etwas abgenommen, während die Bedeutung der Strohdüngung im letzten Jahrzehnt zugenommen hat.

Tabelle 6: Aufteilung der „Humusersatzleistung“ (%) in den DTF- und Betriebsanalysen aus Sachsen

Zufuhrquellen für organische Substanz	DTF (N = 1.058) (MÖNICKE et al. 2004)	Betriebe (N = 30) (REINICKE & ALBERT 2011)
Organische Düngung	38,9	33,1
Gründüngung	5,1	4,2
Strohdüngung	38,9	55,9
Humusmehrer	16,9	6,9

Insgesamt scheint sich der Versorgungsgrad mit organischer Substanz eher zu verbessern. Nach den Analysen mit der REPRO-dyn-Methode hat sich der Fehlbetrag bis zum Ausgleich der negativen Mittelwerte (s. weiter oben) von 15,6 % (MÖNICKE et al. 2004) auf 10,5 % (REINICKE & ALBERT 2011) im Durchschnitt aller Untersuchungen verringert. So haben die Anteile der VG A etwas abgenommen. Die Summe der VG B + C beträgt jetzt 90 %, während es in der Analyse von MÖNICKE et al. (2004) noch 62 % gewesen waren. Abgesehen von der kritisch zu hinterfragenden Methodenwahl können somit auch die relativ negativen Schlussfolgerungen von REINICKE & ALBERT (2011) zur Entwicklung des Versorgungsgrades an organischer Substanz für den Durchschnitt von Sachsen nicht nachvollzogen werden.

Bei Zusammenführung aller bisher bekannten Untersuchungen werden folgende Ergebnisse erlangt (Tab. 7). Zunächst sind auch aus dieser Aufstellung deutliche methodenbedingte Unterschiede zu erkennen. Bei Einsatz der LUFA-Methode gibt es Unterschiede, wenn die unteren Werte nach den Cross Compliance(CC)-Vorgaben für Stroh mit einem hohen Koeffizienten von 100 kg C/t an Stelle der sonst üblichen 80 kg C/t verwendet werden. Aus einer genauen Analyse (siehe KOLBE 2012) konnten für Stroh von der Aufwandmenge abhängige Humifizierungskoeffizienten zwischen 83 kg/t und 41 kg C/t experimentell belegt werden. Daher sind die für CC angesetzten Werte als zu hoch und wenig realitätsgenau anzusehen.

Tabelle 7: Mittelwerte bzw. mittlere Schwankungsbreite der Humussalden (kg C/ha) und Versorgungsstufen in Sachsen, ermittelt von unterschiedlichen Autoren und Methoden

Methode	MÖNICKE et al. (2004) SEIBT (2007)	KOLBE (2009)	WEISER et al. (2011)	REINICKE & ALBERT (2011)
- REPRO-dyn	-58 C	-	-200 bis \geq +100 B/C	-200 bis +100 B/C
- Obere Werte LUFA	+19 C	-	0 bis +300 C/D	0 bis +300 C/D
- Untere Werte LUFA	+135 D	-	-	+50 bis +300 C/D
- Untere Werte LUFA ¹⁾	-	-	+100 bis \geq +300 D/E	+100 bis +350 D/E
- STAND	+89C	+132 bis +276 D	-	-

¹⁾ entsprechend den CC-Vorgaben

Die mittlere Versorgung von Sachsen scheint sich nach diesen Ergebnissen in den letzten 10-15 Jahren nicht entscheidend verändert zu haben. Somit sind unter Zugrundelegung weitgehend genauer Reproduktionsvoraussetzungen Werte zwischen +50 bis +250 kg C/ha anzunehmen, die im Wesentlichen der optimalen VG C bis D zuzuordnen sind. Es ergibt sich kein Hinweis auf eine Humuslücke oder eine Überversorgung größeren Ausmaßes.

3.2 Agrarstrukturgebiete

Ergebnisse der Humusbilanzierungen mit fünf verschiedenen Methoden werden in der nachfolgenden Abbildung 4 für jedes ASG einzeln aufgeführt.

Agrarstrukturgebiet I

In den sächsischen Heidegebieten sowie im Riesaer-Torgauer Elbtal ist je nach angesetzter Methode eine Unterversorgung (VG A + B) zwischen 16-49 % und eine Überversorgung zwischen 9-37 % auszuweisen (Abb. 4). Während es bei den REPRO-basierten Methoden zwischen 44-49 % Unterversorgung sind, werden für die genaueren Methoden nur 16-25 % veranschlagt. Alle Methoden kommen zu einer hohen Einstufung für den optimalen C-Bereich, der zwischen 42 % und 52 % beträgt.

Agrarstrukturgebiet II

Auch für das Gebiet der Oberlausitz und der Sächsischen Schweiz werden große Unterschiede zwischen den Methoden gefunden. REPRO-dyn und REPRO-stat weisen hier eine Unterversorgung um 40 % auf, während es bei den unteren Werten LUFA sowie bei der STAND-Methode lediglich 6-12 % sind. Bei diesen Methoden werden mit 50 % besonders große Bereiche im D-Versorgungsbereich angesiedelt, während der optimale Bereich lediglich Werte um 30 % aufweist. Es besteht je nach Methode eine schiefe Verteilung in der Weise, dass bei den REPRO-Methoden eine deutliche Unterversorgung und bei den unteren Werten der LUFA- und der STAND- Methode eine ebenso bedeutende Überversorgung in Erscheinung tritt.

Agrarstrukturgebiet III

Eine ähnliche Einschätzung kann man auch von den Werten der REPRO-basierten Methoden für das Mittelsächsische Lössgebiet ableiten. Auch hier kommen diese Methoden zu einer relativen Unterversorgung mit organischer Substanz zwischen 37-45 %, während nur geringe Werte als Überversorgung ausgewiesen werden. Auf der anderen Seite wird in diesem Agrarstrukturgebiet mit den unteren Werten LUFA lediglich eine Unterversorgung von 12 % berechnet, während die Überversorgung fast 60 % der untersuchten Flächen betrifft. Mit der STAND-Methode wird in diesem ASG eine relativ gleichmäßige Verteilung ermittelt, wobei jeweils um 30 % der Flächen als Unter- und Überversorgung eingestuft werden.

Agrarstrukturgebiet IV

In den mehr gebirgigen Gebieten des Agrarstrukturgebietes IV ist die Versorgung mit organischer Substanz insgesamt anscheinend etwas höher als in den Flachlandgebieten. Lediglich die sehr ungenaue REPRO-dyn-Methode weist hier ebenfalls eine Unterversorgung von 45 % und nur eine geringe Überversorgung von 20 % aus. Ein ganz anderes Bild ergibt sich in dieser Region, wenn die unteren Werte LUFA oder die STAND-Methode angewendet werden. Hierbei sind dann lediglich Flächenanteile um 10 % als Unterversorgung auszuweisen, während Anteile zwischen 60 % und 66 % als Überversorgung angesehen werden können. Diese schiefe Verteilung zu Gunsten einer deutlichen Überversorgung wird auch durch einen relativ geringen Anteil einer optimalen Versorgung (VG C) zwischen 23-33 % bestätigt.

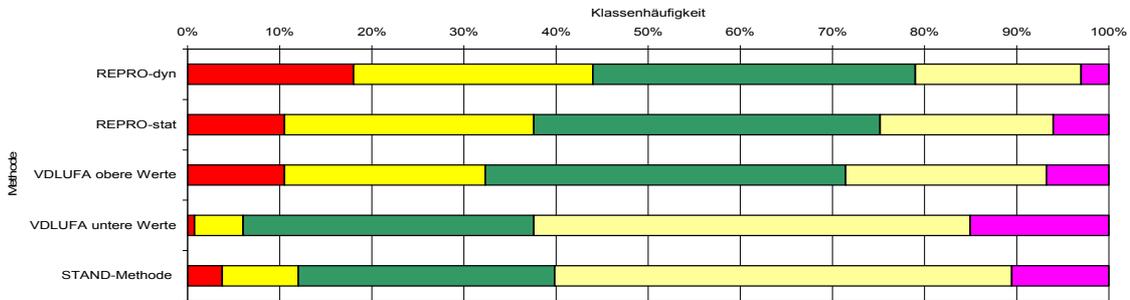
Agrarstrukturgebiet V

Noch extremer kann diese relative Überversorgung für das Gebiet des Erzgebirgskamms veranschlagt werden (Abb. 4). In diesen durch noch verhältnismäßig hohe Viehbestände und einem Rest an Futterbau ausgewiesenen Regionen werden Anteile zwischen 65 % und 77 % einer Überversorgung mit organischer Substanz zugeschrieben. Allein die VG E umfasst 30 % der berechneten Humusbilanzen. Zudem werden von allen Strukturgebieten für die Gebirgsregionen auch die geringsten Anteile für die optimale VG C ermittelt. Auf der anderen Seite wird in diesem ASG besonders durch das REPRO-dyn-Verfahren ein ganz anderes Bild vermittelt. Hier werden Anteile von 52 % einer Unterversorgung mit organischer Substanz zugewiesen. 28 % der Anteile werden sogar als starke Unterversorgung (VG A) ausgewiesen, während lediglich um 20 % der Bilanzergebnisse als Überversorgung zu bezeichnen sind.

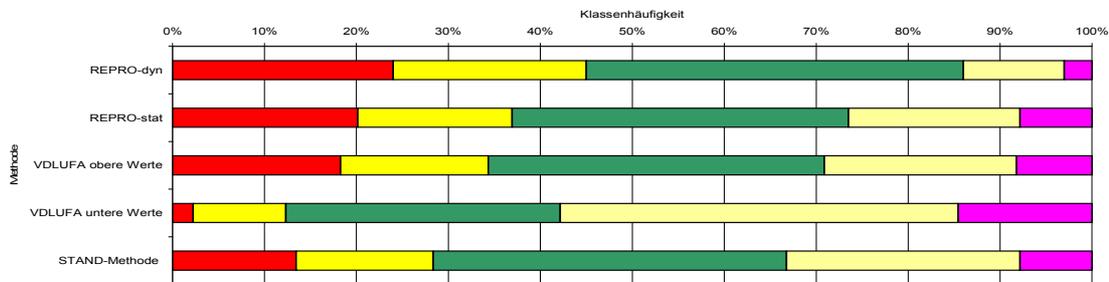
Agrarstrukturgebiet I: Sächsische Heide u. Elbtal (126 DTF)



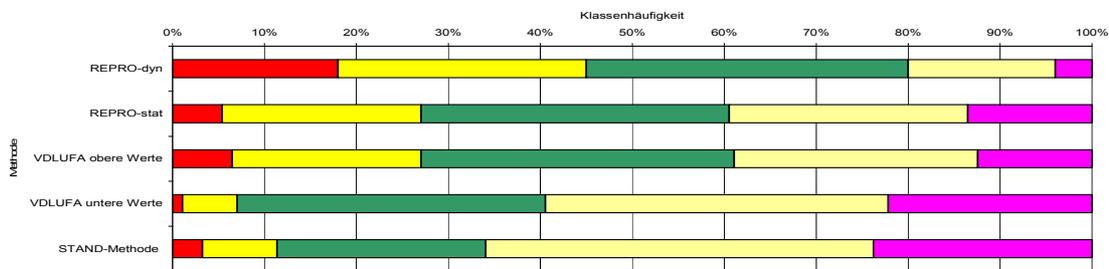
Agrarstrukturgebiet II: Oberlausitz u. Sächs. Schweiz (133 DTF)



Agrarstrukturgebiet III: Mittelsächsisches Lössgebiet (268 DTF)



Agrarstrukturgebiet IV: Vogtland, Elstergebirge, Erzgebirgsvorland (185 DTF)



Agrarstrukturgebiet V: Erzgebirgskamm (48 DTF)

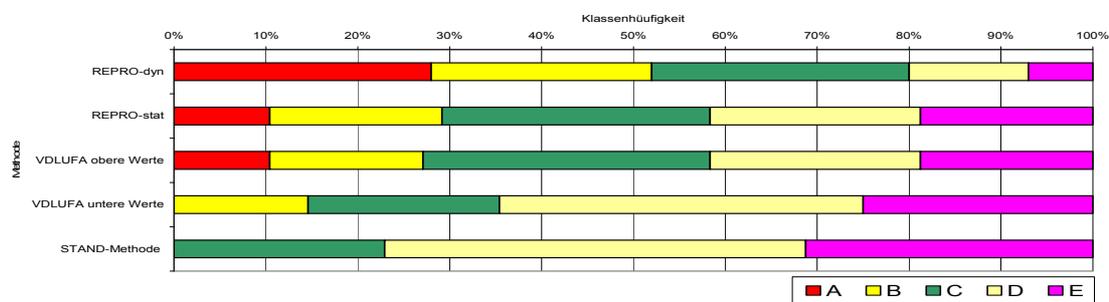


Abbildung 4: Klassenhäufigkeiten (in %) der Humusversorgung der einzelnen Agrarstrukturgebiete in Sachsen, ermittelt mit verschiedenen Humusbilanzmethoden

Vergleich der Agrarstrukturgebiete

Die mit der STAND-Methode ermittelten Ergebnisse wurden nochmals für jedes Agrarstrukturgebiet zusammenfassend gegenübergestellt (Abb. 5). Es wird deutlich, dass die größten Anteile um ca. 10 % als deutliche Unterversorgung mit organischer Substanz (VG A) auf den sehr leichten Böden des Agrarstrukturgebietes I und im mittelsächsischen Lössgebiet auszuweisen sind. Hier sind auch die höchsten Anteile mit mäßiger Unterversorgung (VG B) anzutreffen, sodass Gesamtwerte für die Unterversorgung zwischen 25 % und 28 % berechnet werden konnten. Diese Anteile sind zwar nicht ideal, aber auch nicht als dramatisch anzusehen. Eine bessere Verteilung der anfallenden organischen Substanzen auf die Flächen könnte hier bereits zur Entspannung beitragen, weil auch die Anteile einer relativen Überversorgung z. T. 30 % übersteigen können.

In den anderen Regionen der Agrarstrukturgebiete II, IV und V kommt es offensichtlich auch auf Grund des höheren Tierbesatzes dieser Landschaften zu hohen Anteilen von annähernd 50 % mit geringer Überversorgung (VG D) sowie auch von Anteilen zwischen 10 % und 30 % mit starker Überversorgung (VG E). Auf diesen Gebieten kann eine bessere Umverteilung wohl nicht zur Entspannung beitragen, weil kaum Flächen mit relativer Unterversorgung mit organischer Substanz ausgewiesen werden. Es ist anzunehmen, dass in diesen Gebieten auch umweltrelevante Aspekte wie z. B. der Wasserschutz als kritisch anzusehen sind, weil wahrscheinlich parallel zur hohen Versorgung mit organischer Substanz auch andere Haupt- und Mikronährstoffe das pflanzenbaulich verträgliche Optimum bereits übersteigen können. Bei Erreichen der VG E steigt die Wahrscheinlichkeit stark an, dass gleichzeitig hohe N-Salden zu verzeichnen sind (siehe Tab. 3).

Eine zwischenzeitliche hohe Zufuhr an organischer Substanz führt in diesen oft gebirgigen Landschaften gewöhnlich zu einem deutlichen Anstieg der Humusgehalte, sodass für eine Zeitspanne von bis zu 30 Jahren die enthaltenen Nährstoffe einer gewissen Festlegung unterliegen. Es ist aber auch zu bedenken, dass der einsetzende Klimawandel mit den ansteigenden Temperaturen besonders deutlich die Humusgehalte in den Bergregionen verringern wird, sodass bei einer zu hoch bemessenen Zufuhr an organischer Substanz es hier zu einer deutlichen Freisetzung an Nährstoffen (insbesondere N) kommen kann (siehe KOLBE 2009). Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass nicht nur einer Unterversorgung, sondern auch einer permanenten Überversorgung mit organischer Substanz in Zukunft eine erhöhte Aufmerksamkeit gewidmet werden muss.

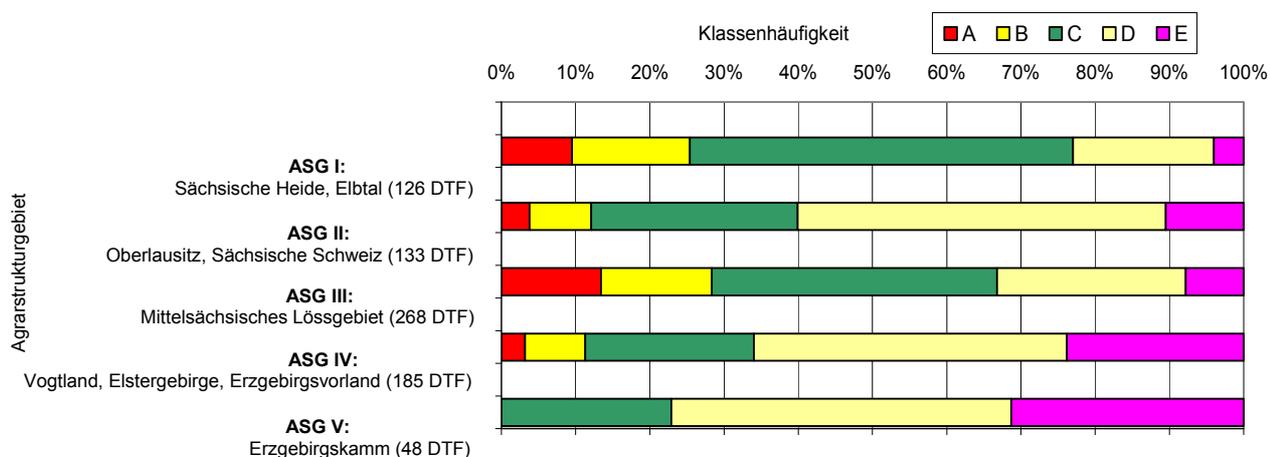


Abbildung 5: Zusammenfassender Überblick über die Klassenhäufigkeiten (in %) der Humusversorgung der Agrarstrukturgebiete in Sachsen, ermittelt mit der STAND-Methode

Auch aus nachfolgender Abbildung 6 geht hervor, dass der höhere Anteil an Viehhaltung als Ursache für die relative Überversorgung mit organischer Substanz für die Agrarstrukturgebiete IV und V anzusehen ist. Auf diesen Standorten umfassen die organischen Düngemittel über 40 % der Gesamtzufuhr an organischer Substanz, während die Anteile für Stroh bzw. für die Humusmehrer (im Wesentlichen Futterpflanzen außer Silomais) im ASG IV sehr niedrige Werte aufweisen. Pflanzenarten, die im Vergleich zum Humusabbau im Durchschnitt höhere Mengen an Ernte- und Wurzelresten hinterlassen (die sog. „Humusmehrer“), erreichen nach diesen Untersuchungen in den Agrarstrukturgebieten III und V mit Anteilen zwischen etwas über 20-30 % die höchsten Werte. Auf den anderen Agrarstrukturgebieten tragen diese Pflanzenarten nur noch um 10 % zur Gesamtzufuhr an organischer Substanz bei.

In diesen Regionen hat der Getreideanbau eine tragende Bedeutung, was an den hohen Zufuhranteilen an Stroh sichtbar wird. So weisen die ASG I, II und IV Anteile zwischen ca. 45-55 % der gesamten Zufuhr als Strohdüngung aus. In diesen Regionen (außer ASG IV) hat die organische Düngung mit 25-30 % eine geringere Bedeutung. Für den Anbau vor allem an Zwischenfrüchten werden nur sehr geringe Anteile als Gründüngung ausgewiesen, die kaum 5 % der Gesamtzufuhren erreichen. Lediglich auf den leichten Böden des ASG I werden etwas höhere Anteile für die Gründüngung registriert (Abb. 6).

Im Zusammenhang mit dem Einfluss des Klimawandels kommen die Untersuchungen von KOLBE (2009) mit der STAND-Methode zu folgenden Mittelwerten der Humusbilanzen in den drei analysierten Agrarstrukturgebieten (kg C/ha; VG):

- ASG I 144-217 D
- ASG III 132-159 D
- ASG IV 159-276 D

Alle drei Agrarstrukturgebiete werden bereits der VG D zugeordnet, wodurch ein sehr guter Versorgungsgrad gekennzeichnet wird. Ähnlich den oben erwähnten Ergebnissen aus den Dauertestflächen werden auch durch diese Untersuchungen eine relativ geringe Versorgung im Agrarstrukturgebiet III (Mittelsächsisches Lössgebiet) und eine relativ hohe Versorgung für ASG IV auf den Vorgebirgsflächen bestätigt. Auch in den Untersuchungen von WEISER et al. (2011) zum Abfuhrpotenzial an Stroh werden vergleichbare Einstufungen für den Bereich von Sachsen ermittelt. Im Flachland werden etwas geringere Versorgungsgrade an Humus ermittelt als in den Vorgebirgs- und Gebirgsregionen.

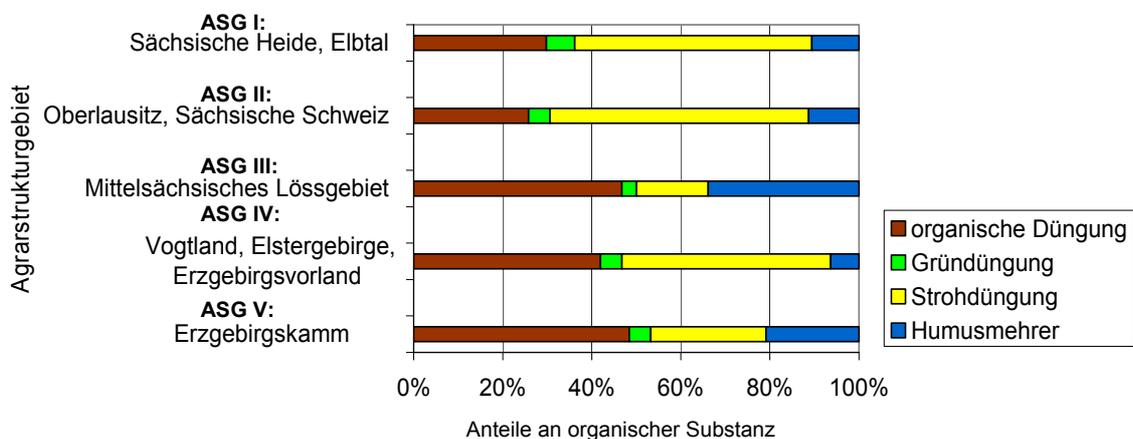


Abbildung 6: Zusammensetzung der Zufuhr an organischer Substanz (%) der Agrarstrukturgebiete in Sachsen

3.3 Bodenarten

Die Ergebnisse von vier Methoden zur Humusbilanzierung können auch in Abhängigkeit von der Bodenart auf der Grundlage von 760 Dauertestflächen dargestellt werden (Abb. 7). Weil die Anzahl an Dauertestflächen auf den sehr leichten Böden zu gering war, wurden die Werte der Sandböden und der anlehmigen Sande zusammengefasst.

Sand und anlehmiger Sand

Auf diesen Bodenarten werden von allen Methoden zwischen 45-50 % der Humusbilanz-Ergebnisse der VG C zugeteilt. Die restlichen Anteile sind wieder deutlich unterschiedlich aufgeteilt worden. Nur mit der REPRO-stat-Methode wird ein kleiner Anteil als stark unterversorgte Fläche der VG A ermittelt. Alle anderen Methoden weisen lediglich Anteile zwischen 7 % und 21 % dem schwach unterversorgten Versorgungsbereich (VG B) zu. Auf der anderen Seite erfolgt mit den unteren Werten LUFA und der STAND-Methode eine Eingruppierung von 42-45 % als Überversorgung, während dieser Anteil mit der REPRO-Methode lediglich 23 % beträgt.

Auf Grund dieser Ergebnisse ist insgesamt auf den sehr leichten Böden von einer relativ hohen Versorgung mit organischer Substanz auszugehen. Auf einem gewissen Anteil an Flächen ist jedoch auch hier Vorsicht geboten, damit die Versorgung

wegen der umweltsensiblen regionalen Bedeutung z. B. für den Wasserschutz nicht zu hoch angesetzt wird. Umverteilungsmöglichkeiten sind nach diesen Ergebnissen der STAND-Methode jedoch kaum gegeben, weil auch die mäßig unterversorgten Flächenanteile der VG B einen nur geringen Umfang aufweisen.

Lehmiger Sand und stark lehmiger Sand

Nach diesen Analysen ist auch eine mäßige Überversorgung an organischer Substanz mit Anteilen von über 50 % (lehmiger Sand) bzw. sogar von fast 60 % (stark lehmiger Sand) gegeben, während die Anteile mit einer Unterversorgung nur zwischen 9 % und 15 % betragen (Abb. 7). Demhingegen werden mit den ungenaueren Methoden (REPRO-stat, obere Werte LUFA) wiederum deutlich höhere Anteile an Flächen ausgewiesen, die zur Unterversorgung neigen und geringere Anteile von 21-30 %, die auf eine Überversorgung hindeuten. Insgesamt kann aus den Ergebnissen abgeleitet werden, dass es ein gewisses Potenzial für eine etwas bessere Verteilung der organischen Substanz auf alle Flächen geben könnte, damit extreme Versorgungsgrade ausgeglichen werden.

Sandiger Lehm

Auf dieser mittleren Bodenart, die mit einer Anzahl von 326 DTF einen relativ großen Umfang von den gesamten Flächen umfasst, ist ebenfalls eine in Abhängigkeit zur gewählten Methode unterschiedliche Klassifizierung der Ergebnisse zur Humusbilanzierung erfolgt. Mit den REPRO-Methoden und den oberen Werten LUFA wurde eine relativ gleichmäßige Verteilung der Ergebnisse auf die fünf Bewertungsgruppen erreicht. Jeweils Anteile um 30 % werden als Unter- und Überversorgung ermittelt, sodass 38 % der Ergebnisse in die optimale VG C eingestuft worden sind.

Bei den mit den unteren Werten LUFA und der STAND-Methode ermittelten Humusbilanzen liegen die Anteile für eine Unterversorgung lediglich bei 8-10 % und die Anteile mit einer Überversorgung insgesamt jedoch zwischen 53-62 %. Ein Bereich von über 15 % ist sogar durch eine starke Überversorgung gekennzeichnet (VG E). Weil die Anteile einer Unterversorgung verhältnismäßig gering sind, kann an dieser Verteilung insgesamt abgelesen werden, dass ein z. T. deutliches Abfuhrpotenzial an überschüssiger organischer Substanz auf einem hohen Anteil an Flächen in Sachsen gegeben ist.

Lehm

Ein etwas anderes Bild geben die schwereren Böden ab, die mit einer Anzahl von 125 Dauertestflächen in die Auswertungen eingegangen sind. Mit der REPRO-stat-Methode und den oberen Werten LUFA kann eine gewisse Normalverteilung der Ergebnisse zur Humusbilanzierung abgelesen werden. Es werden eine Überversorgung um 25 % und ein schon etwas höher bezifferter Anteil um 40 % als Unterversorgung ausgewiesen. Auch der stark unterversorgte Anteil der VG A wird mit diesen Methoden bereits auf 15 % festgelegt.

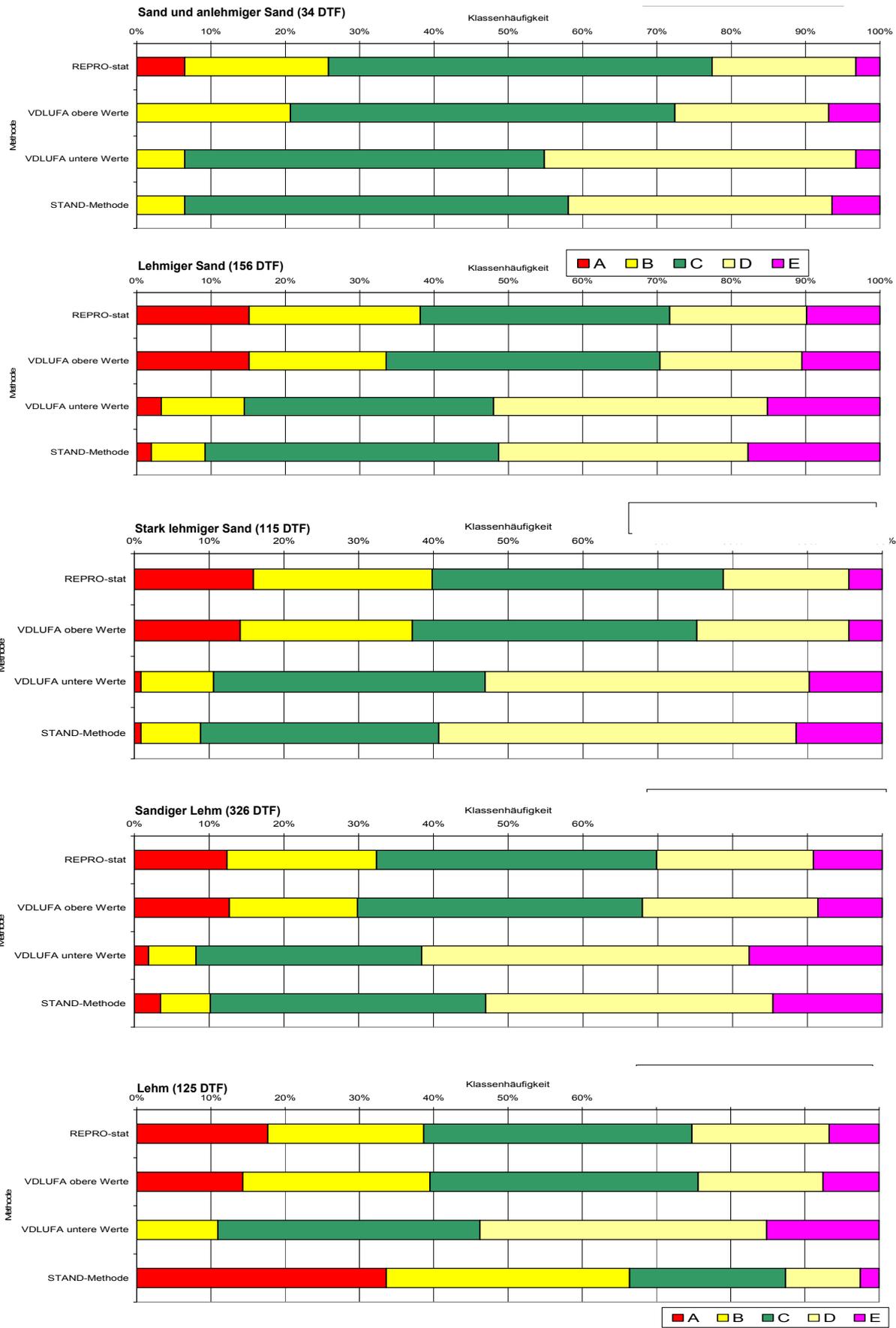


Abbildung 7: Klassenhäufigkeiten (in %) der Humusversorgung in Abhängigkeit von den Bodenarten in Sachsen, ermittelt mit verschiedenen Humusbilanzmethoden

Analysen mit den unteren Werten LUFA gelangen demgegenüber zu einer ganz anderen Verteilung der Bilanzergebnisse auf die fünf Versorgungsgruppen. Es werden keine Anteile für die VG A berechnet. Dagegen steigt der Anteil an Flächen, der durch eine mäßige bis deutliche Überversorgung gekennzeichnet ist auf über 50 % an (VG D u. E). Auch auf diesen Flächen wird deutlich sichtbar, dass nur Methoden, die eine Standort angepasste Bewertung vornehmen können, zu realistischen Einstufungen kommen.

Weil allerdings für die Anwendung der STAND-Methode die Kriterien zur Einstufung der Bodenart Lehm nicht immer eindeutig bekannt waren (es ist die Angabe der C/N-Verhältnisse des Bodens erforderlich), wurden alle Flächen der extremen Standortgruppe 6 (Lehm mit engem C/N-Verhältnis von < 9) zugeordnet, die einen sehr umsetzungsaktiven Boden kennzeichnet. Für diese Bodenart, auf der in Sachsen gleichzeitig auch das höchste Ertragspotenzial gegeben ist, erfolgt ein verhältnismäßig hoher Humusabbau, der dementsprechend auch eine hohe Zufuhr an organischen Materialien erfordert, wenn die Humusgehalte aufrechterhalten werden sollen. Es kann die Vermutung geäußert werden, dass die relativ hohe N-Zufuhr über die Düngung und die N-Deposition der letzten Jahrzehnte zu dieser Sonderstellung der Lehmböden beigetragen haben (KOLBE 2010).

Werden alle Lehmböden dieser extremen Standortgruppe zugeordnet, dann würde eine deutliche Unterversorgung auf bis zu über 65 % der Flächen auszuweisen sein (Abb. 7). Ein großes Ausmaß an Umverteilungsmöglichkeiten besteht auf diesen Böden nicht, weil kaum ein nennenswerter Anteil an Überversorgung mit organischer Substanz vorliegt. Gestützt werden diese Angaben in diesem Fall etwas durch die Ergebnisse, die mit den oberen Werten LUFA und der REPRO-stat-Methode ermittelt worden sind (vgl. REINICKE & ALBERT 2011). Nur auf diesen umsetzungsstarken Böden gelangen diese Methoden im Vergleich zu Ergebnissen aus Dauerversuchen ebenfalls zu realistischen Einstufungen (vgl. Tab. 4). Für eine genauere Einordnung dieser Lehm-Standorte sind allerdings Untersuchungen über die C_{org}- und N_t-Gehalte der Flächen erforderlich.

Vergleich der Bodenarten

Aus Abbildung 8 geht hervor, dass die Anteile mit optimalem Versorgungsgrad an organischer Substanz von den leichteren Böden zu den schweren Böden deutlich abnehmen. Während es auf den Sanden und anlehmigen Sanden noch 51 % der Fälle sind, die der VG C zugeordnet werden, sind es auf den mittleren Böden 32-37 % und auf den schweren Böden nur noch 21 %. Dagegen steigt der Anteil mit geringer bis schwerer Unterversorgung mit zunehmendem Tongehalt zunächst nur tendenziell auf 10 % an, während dieser Anteil auf dem Lehm Boden dann mit 66 % den größten Umfang einnimmt. Auch die Anteile mit einer relativen Überversorgung steigen bis zu den sandigen Lehmen etwas an. Eine schwerwiegende Überversorgung durch VG E von über 10 % weist allerdings auf gewisse Potenziale einer besseren Verteilung oder auf eine Abfuhr und den Verkauf von organischer Substanz von den Flächen hin, damit keine Nachteile in den Umweltwirkungen eintreten können. Auf eine gewisse Sonderstellung der Lehmböden wurde im vorherigen Kapitel bereits hingewiesen (siehe Kap. Lehm).

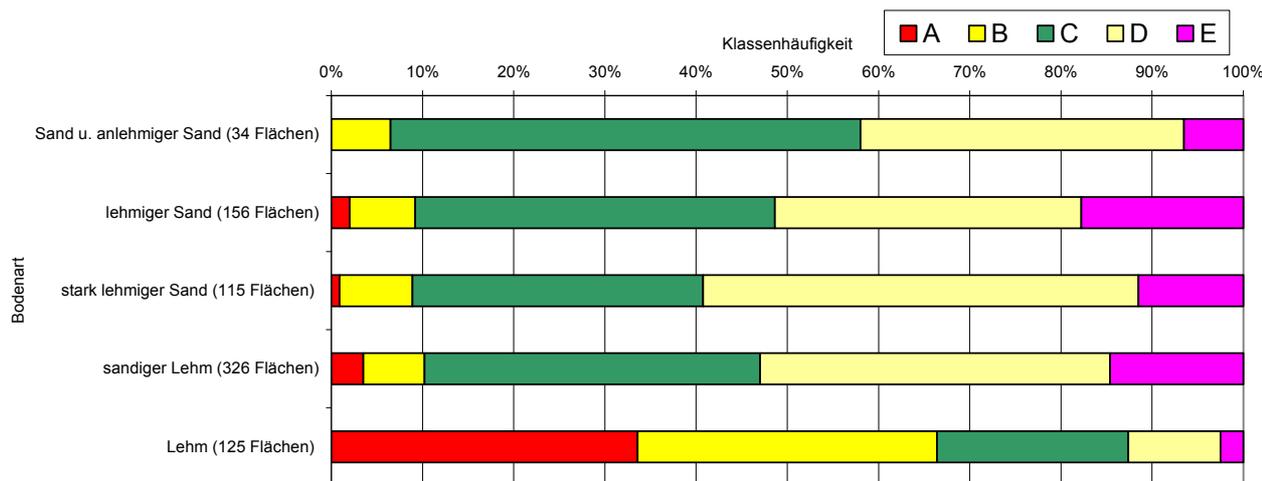


Abbildung 8: Zusammenfassender Überblick über die Klassenhäufigkeiten (in %) der Humusversorgung der Bodenarten in Sachsen, ermittelt mit der STAND-Methode

4 Schlussfolgerungen

Auf Grund der hohen Anzahl von über 1.000 Dauertestflächen und den weiteren hier zusammengeführten Untersuchungen, die einer genauen Humusbilanzierung unterzogen worden sind, kann sicherlich von einer repräsentativen Untersuchung für das Bundesland Sachsen ausgegangen werden. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass auf dem überwiegenden Anteil an untersuchten Ackerflächen eine ausreichend hohe und optimale Versorgung mit organischer Substanz gegeben ist. Darüber hinaus gibt es sowohl gewisse Anteile an Ackerschlägen, die durch eine Unterversorgung als auch durch eine z. T. sehr hohe Versorgung mit organischer Substanz gekennzeichnet sind.

Daher besteht für beide Seiten ein Handlungsbedarf, der mit Hilfe der Humusbilanzierung genauer umrissen werden kann. Auf der einen Seite sollten unterversorgte Flächen auf ein optimales Versorgungsniveau (Versorgungsgruppe C) angehoben werden. Auf der anderen Seite können Flächen mit relativer Überversorgung durch eine bessere Verteilung der organischen Materialien auf alle Betriebsflächen ausgeglichen werden. Ein gewisses zusätzliches Abfuhrpotenzial für Stroh und andere heute immer wertvoller werdende Reststoffe könnte dann einer außerbetrieblichen Verwertung zugeführt und dem Betriebseinkommen angerechnet werden.

Auch diese Untersuchungen zur Humusbilanzierung haben deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Methoden zutage gefördert. Eine eindeutige Interpretation der erlangten Ergebnisse konnte jedoch nur durch Einsatz von Methoden ermittelt werden, die durch eine verhältnismäßig hohe Genauigkeit gekennzeichnet sind. Abfuhrpotenziale sowie bedeutende Analysen von Betriebsumstellungen sollten daher in Zukunft nur noch mit möglichst genauen Methoden der Humusbilanzierung vorgenommen werden, die eine standortgerechte Bewertung der Ergebnisse gewährleisten. Hintergrund jeglicher Überlegungen ist die nachhaltige Sicherung der Fruchtbarkeit der ackerbaulich genutzten Böden. Aufgrund der Bedeutung der organischen Substanz für die Nachhaltigkeit der Betriebe sollte möglichst für jeden Ackerschlag bzw. wenigstens im Betriebsdurchschnitt mindestens eine ausgeglichene Humusbilanz für die Fruchtfolgerotation angestrebt werden.

5 Zusammenfassung

Im Mittelpunkt dieser Arbeit stehen zusammenfassende sechsjährige Auswertungen über Erhebungsdaten des Ackerlandes landwirtschaftlicher Betriebe aus dem Dauertestnetz des Freistaates Sachsen (insgesamt über 1.000 Flächen). Ergänzende Untersuchungen in Verbindung mit den Auswirkungen des Klimawandels, von Strohabfuhrpotenzialen und weiteren Humusbilanzierungen landwirtschaftlicher Betriebe aus den letzten Jahren wurden ebenfalls berücksichtigt. Es werden die in den bisherigen Studien ermittelten Ergebnisse über das Versorgungsniveau mit organischer Substanz zusammengeführt und auf Grund der methodenbedingten Unterschiede einer genauen Beurteilung zugeführt. Folgende Methoden der Humusbilanzierung kamen zum Einsatz:

- statische und dynamische Methoden des Modells REPRO (REPRO-stat, REPRO-dyn)
- VDLUFA-Methode (untere u. obere Werte LUFA)
- standortangepasste Methode (STAND)

Zwischen den Methoden bestanden erhebliche Unterschiede in den berechneten Humussalden. Je eher eine erweiterte Humusproduktion als Ziel der Methode anzusehen war, umso niedriger wurden die durchschnittlichen Versorgungsniveaus an organischer Substanz berechnet und umso ungenauer waren diese Ergebnisse einzustufen. Im Nachfolgenden werden daher die Ergebnisse der Methoden mit einer vergleichsweise genauen Reproduzierbarkeit dargestellt (STAND, untere Werte LUFA).

Auswertungen auf der Ebene der Agrarstrukturgebiete (ASG) haben gezeigt, dass die größten Anteile mit einer deutlichen Unterversorgung (VDLUFA-Versorgungsgruppe A) von ca. 10 % im ASG I (Sächsisches Heidegebiet und Elbtal) und im Mittelsächsischen Lössgebiet des ASG III auszuweisen sind. Hier nehmen auch die Ergebnisse mit mäßiger Unterversorgung (VG B) die höchsten Anteile an, sodass Gesamtwerte für die Unterversorgung um 25-28 % berechnet werden konnten. Eine

bessere Verteilung der anfallenden organischen Materialien auf die Flächen könnte hier bereits zur Entspannung beitragen, weil in den selben Gebieten auch eine relative Überversorgung von 30 % ermittelt werden konnte. Der Anteil mit einer optimalen Versorgung liegt dagegen im ASG I bei 50 %.

In den anderen Regionen der ASG II (Oberlausitz und Sächsische Schweiz), sowie ASG IV (Vogtland, Elstergebirge und Erzgebirgsvorland) und ASG V (Erzgebirgskamm) kommt es offensichtlich auf Grund des höheren Tierbestandes zu hohen Anteilen mit geringer Überversorgung (VG D) von annähernd 50 % sowie auch von Anteilen um 10-30 % mit starker Überversorgung (VG E). Auf diesen Gebieten kann eine bessere Umverteilung wohl nicht zur Entspannung beitragen, weil kaum Flächen mit relativer Unterversorgung ausgewiesen werden.

In ASG IV und V umfasst die Zufuhr an organischer Substanz über organische Düngemittel aus der Tierhaltung über 40 % der Gesamtzufuhr, während die Anteile für Stroh bzw. für die Humusmehrer in ASG IV sehr niedrige Werte aufweisen. Pflanzenarten, die im Vergleich zum Humusabbau im Durchschnitt einen höheren Anteil an Ernte- und Wurzelresten hinterlassen, erreichen im ASG III sowie V mit Anteilen etwas über 20-30 % die höchsten Werte. Auf den anderen Agrarstrukturgebieten tragen diese Pflanzenarten nur noch um 10 % zur Gesamtzufuhr an organischer Substanz bei.

In diesen Regionen hat der Getreideanbau eine tragende Bedeutung, was an den hohen Zufuhranteilen an Stroh sichtbar wird. So weisen die ASG I, II und IV Anteile von ca. 45-55 % der gesamten Zufuhr als Strohdüngung aus. In diesen Regionen (außer ASG IV) hat die organische Düngung mit 30-35 % eine geringere Bedeutung. Für den Anbau an Zwischenfrüchten zur Gründüngung werden nur sehr geringe Anteile ausgewiesen, die kaum 5 % der Gesamtzufuhren mit organischer Substanz erreichen.

In allen Agrarstrukturgebieten wird als mittleres Versorgungsniveau bereits die VG D ausgewiesen, wodurch ein sehr guter Versorgungsgrad mit organischer Substanz gekennzeichnet wird. Eine relativ geringe Versorgung wird im Agrarstrukturgebiet III (Mittelsächsisches Lössgebiet) und die höchste Versorgung für ASG IV auf den Vorgebirgsflächen vorgefunden.

Im Vergleich der Bodenarten nehmen die Anteile mit optimalem Versorgungsgrad an organischer Substanz von den leichteren Böden zu den schweren Böden deutlich ab. Während es auf den Sanden und anlehmigen Sanden noch 51 % der Fälle sind, die der VG C zugeordnet werden, sind es auf den mittleren Böden 32-37 % und auf den schweren Böden nur noch 21 %. Dagegen steigt der Anteil mit geringer bis deutlicher Unterversorgung mit zunehmenden Tongehalten geringfügig an. Nur auf den Lehm Böden ist dieser Anteil mit 66 % als sehr hoch auszuweisen. Auch die Anteile mit einer relativen Überversorgung steigen von den leichteren zu den schwereren Böden nur geringfügig an. Eine deutliche Überversorgung in VG E von über 10 % weist allerdings auf gewisse Potenziale einer besseren Verteilung oder der Abfuhr und des Verkaufes von organischer Substanz von diesen Flächen hin.

Im Durchschnitt des Landes Sachsen geht aus den ausgewerteten Studien hervor, dass auf etwa der Hälfte der Ackerflächen eine optimale Versorgung mit organischer Substanz gegeben ist (VG C). Nicht ganz ein Drittel der Schläge erhält eine hohe bis sehr hohe Versorgung (VG D + E), während der Anteil mit einer deutlichen Unterversorgung bei etwas über 20 % zu veranschlagen ist (VG A + B). Hier reicht der Versorgungsgrad mit organischer Substanz nicht aus, sodass bei Beibehaltung des Defizits auch die Humusgehalte mit der Zeit etwas abfallen werden. Die im Bereich des ökologischen Landbaus bewirtschafteten Flächen sind durch etwas höhere Humussalden gekennzeichnet als die Flächen, auf denen konventionell gewirtschaftet wird. Eine Differenz von 50 kg C/ha zwischen den Anbauverfahren würde zu einer geringen Anreicherung an Humus von 0,03 % C_{org} führen.

Die mittlere Versorgung von Sachsen scheint sich in den letzten 10 bis 15 Jahren nicht entscheidend verändert zu haben. Somit sind unter Zugrundelegung weitgehend genauer Reproduktionsvoraussetzungen Durchschnittswerte zwischen +50 kg bis +250 kg C/ha anzunehmen, die im Wesentlichen der optimalen VG C sowie der Gruppe D zuzuordnen sind. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass nicht nur einer Unterversorgung, sondern auch einer zeitlich länger andauernden Überversorgung mit organischer Substanz in Zukunft erhöhte Aufmerksamkeit gewidmet werden muss, weil auch sie aus Umwelt- und Klimaschutzgründen als bedenklich anzusehen ist. Für Hinweise auf eine deutliche Humuslücke oder eine Überversorgung größeren Ausmaßes besteht allerdings kein Anlass.

Literatur

- BROCK, CHR. (2009): Humusdynamik und Humusreproduktion in Ackerbausystemen und deren Bewertung mit Hilfe von Humusindikatoren und Humusbilanzmethoden. Dissertation, Univ., Gießen.
- BROCK, CHR., HOYER, U., LEITHOLD, G. & K.-J. HÜLSBERGEN (2008): Entwicklung einer praxisanwendbaren Methode der Humusbilanzierung im ökologischen Landbau. Forschungsbericht zum BÖL-Projekt-Nr. 03OE084/1 und 03OE084/2. <http://orgprints.org/16447/>
- FRANKO, U., KOLBE, H., THIEL, E. & E. LIEß (2011): Multi-site validation of a soil organic matter model for arable fields based on generally available input data. *Geoderma* 166, 119-134.
- FRANKO, U., THIEL, E., LIEß, E. & H. KOLBE (2012): Erstellung eines Verfahrens zur Abschätzung des N-Umsatzes und der Humusreproduktion im konventionellen und ökologischen Landbau. Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (in Vorbereitung).
- HÜLSBERGEN, K.-J. (2003): Entwicklung und Anwendung eines Bilanzierungsmodells zur Bewertung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Systeme. Berichte aus der Agrarwirtschaft. Shaker Verlag, Aachen.
- KOLBE, H. (2005): Prüfung der VDLUFA-Bilanzierungsmethode für Humus durch langjährige Dauerversuche. *Archiv for Agronomy and Soil Science* 51, 221 – 239.
- KOLBE, H. (2007): Methode zur standortangepassten Humusbilanzierung von Ackerland unterschiedlicher Anbauintensität. Infodienst für Beratung und Schulung der Sächsischen Agrarverwaltung, Nr. 5, 35 – 39.
- KOLBE, H. (2009): Auswirkungen differenzierter Land- und Bodenbewirtschaftung auf den C- und N-Haushalt der Böden unter Berücksichtigung konkreter Szenarien der prognostizierten Klimaänderung im Freistaat Sachsen. Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Heft 23, 1 – 143.
- KOLBE, H. (2010): Site-adjusted organic matter balance method for use in arable farming systems. *Journal for Plant Nutrition and Soil Science* 173, 678 – 691.
- KOLBE, H. (2012): Zusammenführende Untersuchungen zur Genauigkeit und Anwendung von Methoden der Humusbilanzierung im konventionellen und ökologischen Landbau. Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Heft 19, 3 – 83.
- KOLBE, H. & I. PRUTZER (2004): Überprüfung und Anpassung von Bilanzierungsmodellen für Humus an Hand von Langzeitversuchen des Ackerlandes. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, FB Pflanzliche Erzeugung, Leipzig. <http://orgprints.org/00003130>
- KÖRSCHENS, M., ROGASIK, J., SCHULZ, E., BÖNIG, H., EICH, D., ELLERBROCK, R., FRANKO, U., HÜLSBERGEN, K.-J., KÖPPEN, D. KOLBE, H., LEITHOLD, G., MERBACH, I., PESCHKE, H., PRYSTAV, W., REINHOLD, J. & J. ZIMMER (2004): Humusbilanzierung. Methode zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland. Standpunkt. VDLUFA, Bonn. <http://www.vdlufa.de/joomla/Dokumente/Standpunkte/08-humusbilanzierung.pdf>
- LEITHOLD, G., HÜLSBERGEN, K.-J., MICHEL, D. & H. SCHÖNMEIER (1997): Humusbilanz – Methoden und Anwendung als Agrar-Umweltindikator. *Initiativen zum Umweltschutz* 5, Zeller Verlag, Osnabrück, 43 – 54.
- MÖNICKE, R., BEER, V. & H.-J. KURZER (2004): Ergebnisse der Humusbilanzierung im Freistaat Sachsen – dargestellt an 1.000 repräsentativ verteilten Dauertestflächen. *Infodienst der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft*, H. 11, 62 - 71.
- MÖNICKE, R., WAGNER, B. & H. SCHMID (2007): Nachhaltigkeit der Bodennutzung sichern. Modellrechnungen zum Schließen der Stoffkreisläufe im landwirtschaftlichen Betrieb. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Heft 12, 1 – 47.
- REINICKE, F. & E. ALBERT (2011): Dynamische Bilanzmethode. Humushaushalt im Blick. *Neue Landwirtschaft*, Nr. 4, 72 – 74.
- SEIBT, P. (2007): Anwendung einer neuen standortabhängigen Methode zur Humusbilanzierung an sächsischen Dauertestflächen und Vergleich mit anderen üblichen Methoden zur Feststellung des Versorgungsgrades mit organischer Substanz im Hinblick auf Sicherung der Nachhaltigkeit der Betriebe im konventionellen und ökologischen Landbau. Diplomarbeit. TU Dresden, Institut für Bodenkunde und Standortlehre, Dresden. <http://orgprints.org/13152/>
- WEISER, CHR., VETTER, A., REINICKE, F. & B. WAGNER (2011): Wie groß ist das Getreidestrohpotenzial in Deutschland? *Bauernblatt*, 9. Juli, 33 – 36.

Herausgeber:

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

Autor:

Dr. Hartmut Kolbe
Abteilung Pflanzliche Erzeugung/Referat Pflanzenbau, Nachwachsende Rohstoffe
Telefon: + 49 341 9174-149
Telefax: + 49 341 9174-111
E-Mail: hartmut.kolbe@smul.sachsen.de

Redaktion:

s. Autor

Foto Titelseite:

Dr. Walter Schmidt (LfULG)

Redaktionsschluss:

16.04.2012

ISSN:

1867-2868

Hinweis:

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <http://www.smul.sachsen.de/lfulg/6447.htm> heruntergeladen werden.

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als Parteinahme des Herausgebers zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

Diese Beschränkungen gelten unabhängig vom Vertriebsweg, also unabhängig davon, auf welchem Wege und in welcher Anzahl diese Informationsschrift dem Empfänger zugegangen ist. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.