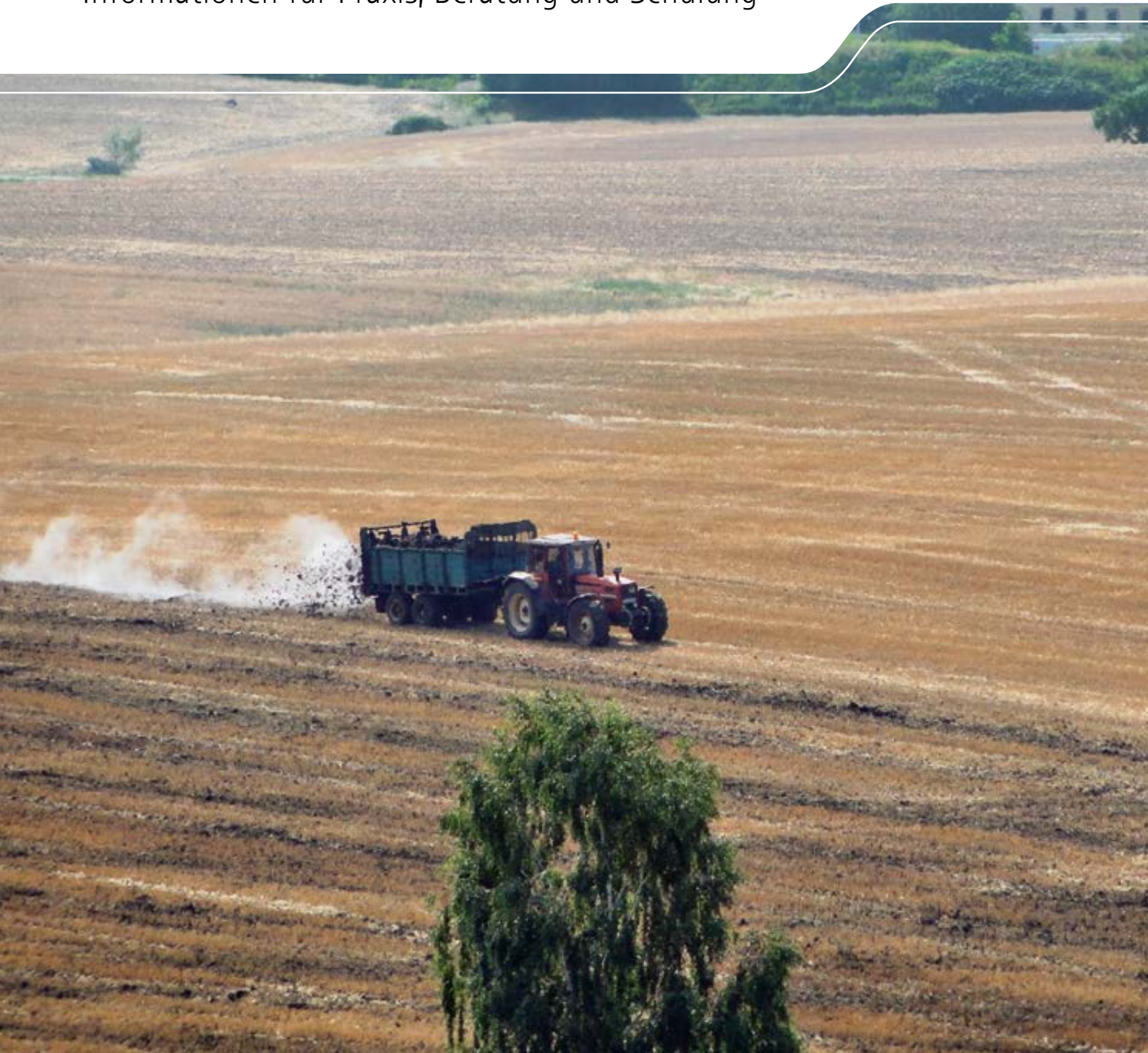




Leitfaden zur Humusversorgung

Informationen für Praxis, Beratung und Schulung



Leitfaden zur Humusversorgung

Informationen für Praxis,
Beratung und Schulung



Im Verbund der Landesanstalten
und Landesämter für Landwirtschaft

Inhalt

Vorwort	04	7 Interpretation und Bewertung der Ergebnisse der Humusbilanzierung	32
1 Was ist Humus?	05	VDLUFAs-Bewertungsschlüssel und Bewertungseinheit	32
Begriffsbestimmung	05	Gegenüberstellung humuszehrender und humusmehrender Komponenten	32
Dauerhumus und Nährhumus	05	Ableitung von schlagbezogenen Empfehlungen	33
Humusabbau und Mineralisation	06	Heterogenität der Standorte	33
Prinzip des Humusumsatzes	06		
Humusaggregate	07		
Humus und Bodenfruchtbarkeit	09	8 Kalkulation der Auswirkung von Bewirtschaftungs- und Betriebsveränderungen auf Humusbilanz und Humusgehalte des Bodens	34
2 Einflussfaktoren auf Gehalte und Umsatz an Humus	11	Umrechnung der Ergebnisse der Humusbilanzierung auf Humusgehalte des Bodens	34
Formen der Landnutzung	11	Berechnung einer Betriebsumstellung und Interpretation der Ergebnisse	34
Ackernutzung	12		
Einfluss des Standortes	13	9 Ermittlung eines Abfuhrpotenzials am Beispiel Stroh	37
Einfluss der Fruchtarten	14	Strohverkauf oder Bodenfruchtbarkeit?	37
Einfluss der organischen Materialien	15	Berechnungsschritte zur Abschätzung des verfügbaren Strohaufkommens am Beispiel Deutschlands	38
3 Möglichkeiten zur Einschätzung der Humusversorgung	17	Welche Berechnungsgrundlage wird gewählt (Ackerschlag, Betrieb, Region)?	39
Bodenuntersuchung	17	Welche Standorteigenschaften sind zu berücksichtigen und welche Humusbilanzmethode wird angewendet?	39
Standort- und bewirtschaftungstypische Heterogenität	18	Welcher Reproduktionswert für Stroh soll genutzt werden?	40
Humusbilanzierung	19	Wie viel Stroh steht zur Verfügung und welcher Anteil kann technisch geborgen werden?	40
4 Vergleich geeigneter Methoden zur Humusbilanzierung	20	10 Ausgleich stark einseitiger Humusbilanzen	44
Methoden zur quantitativen Analyse	20	Beziehungen zwischen Humussaldo und Fruchtartenertrag	44
Methoden zur halbquantitativen Analyse	21	Untersuchungen zum Versorgungsniveau mit organischer Substanz	44
Methoden mit geringer Genauigkeit	22	Unterversorgung	45
5 Anforderungen an das Datenmaterial für die Humusbilanzierung	23	Beispiele	46
Bezugsebene Schlag, Betrieb, Region	23	Verbesserungsstrategien	46
Zuordnung von Nutzungsarten/Nutzungs-codes der Agrarförderung zu den Fruchtartengruppen der Humusbilanzierung	23	Überversorgung	48
6 Erstellung einer Humusbilanz	30	Beispiele	48
Auswahl der Methode und der Fruchtarten-Koeffizientengruppe	30	Verbesserungsstrategien	49
Beispielsrechnungen	30		

11 Besonderheiten des Ökologischen Landbaus	52
Untersuchungen zum Versorgungsniveau mit organischer Substanz	52
Einsatz der Humusbilanzierung zur Fruchtfolgegestaltung	53
12 Zukunftsperspektiven	54
Anhebung der Humusgehalte und Einsatz von Biokohle	54
Klimawandel	55
Anwendung von Methoden zur Berechnung der Nährstoffmineralisation aus dem Humusumsatz	56
13 Quellen	58

Abkürzungsverzeichnis

Ap-Horizont	Bearbeitungshorizont, Ackerkrume des Bodens
C _{org}	organischer Kohlenstoff
EWR	Ernte- und Wurzelreste
GL	Gleichung
HÄQ	Humusäquivalente
HP	Hauptprodukt
KAK	Kationenaustauschkapazität
NP	Nebenprodukt
N _t	Gesamt-N
OBS	Organische Bodensubstanz
OPS	Organische Primärschubstanz
PSM	Pflanzenschutzmittel
TM	Trockenmasse
VG	Versorgungsgruppe

Vorwort

In den letzten Jahren hat sich unser Wissen sowohl zum Humus des Bodens als auch zum weltweiten Kohlenstoffkreislauf deutlich erweitert. Die in der organischen Substanz bzw. im Humus gebundene Kohlenstoffmenge ist doppelt so groß wie die in der Atmosphäre und dreimal so groß wie jene in der Vegetation. Ungefähr 80 % der weltweit aktiv am Kohlenstoffumsatz beteiligten Kohlenstoffmenge werden zudem in Form von Humus in den Böden gespeichert.

Ergebnisse aus Dauerversuchen haben gezeigt, dass die organische Substanz des Bodens maßgebend an der Ausgestaltung biologischer, physikalischer und chemischer Eigenschaften der Bodenfruchtbarkeit beteiligt ist. Der Humusgehalt ist daher für die Bodenstruktur und Wasserhaltekapazität, als Nährstoffspeicher und für die Nährstoffdynamik des Bodens von großer Bedeutung. Der Humusumsatz und damit auch die Nährstoffdynamik eines Standortes sind von Einflussfaktoren des Klimas bzw. der Witterung, des Bodens und der Bewirtschaftung abhängig.

Der Boden fungiert in diesem Zusammenhang als Quelle und auch als Senke sowohl für klimawirksame Stoffe (Spurengase) als auch für landwirtschaftlich bedeutende Produktionsfaktoren (u. a. Nährstoffe). Deshalb können Änderungen der Humusgehalte eine große Bedeutung für die Bodenfruchtbarkeit und Ertragsicherheit, aber auch für den Klimawandel, den Wasserschutz und die Biodiversität haben.

Aus aktuellen Untersuchungen zur Humus- und Nährstoffbilanzierung konnte ein erheblicher Handlungsbedarf zur Sicherung der Bodenfruchtbarkeit abgeleitet werden, weil es im Rahmen einer zunehmenden Differenzierung der Landbewirtschaftung auf den landwirtschaftlichen Betrieben leicht zu einer permanenten Unterversorgung, aber auch zu einer deutlichen Überversorgung mit organischer Substanz kommen kann.

Auf Grund vieler offener Fragen, z. B. welche praktischen Umsetzungen sich aus diesen neuen Erkenntnissen ergeben und welche Prioritäten für die Zukunft zu setzen sind, wurde von den

Landesanstalten und Landesämtern für Landwirtschaft eine Arbeitsgruppe zu »pflanzenbaulichen Aspekten der Humusreproduktion« eingerichtet, in der entsprechende Themenfelder im überregionalen Verbund behandelt und Lösungsvorschläge erarbeitet werden.

In dem vorliegenden Leitfaden werden in allgemeinverständlicher Form zunächst die bodenkundlichen und pflanzenbaulichen Grundlagen zur Humuswirtschaft mit dem neuesten Stand vorgestellt. Es folgt die Beschreibung geeigneter Methoden zur Bodenuntersuchung und zur Humusbilanzierung. An Hand von Beispielen werden Anleitungen zur Durchführung von Bilanzierungen und zur Interpretation der Ergebnisse gegeben. Im Mittelpunkt des Leitfadens stehen Handlungsempfehlungen zur Sicherung der Bodenfruchtbarkeit durch Aufrechterhaltung einer optimalen Versorgung mit organischer Substanz für den konventionellen und ökologischen Ackerbau. Die Broschüre ist ein wichtiger Ratgeber für Verwaltung, landwirtschaftliche Praxis, Beratung und Schulung.



A handwritten signature in black ink, appearing to read 'N. Eichkorn', written in a cursive style.

Norbert Eichkorn

Präsident des Sächsischen Landesamtes für Umwelt,
Landwirtschaft und Geologie

1 Was ist Humus?

Begriffsbestimmung

Als Humus wird im Allgemeinen die Gesamtheit der abgestorbenen organischen Substanz im Boden bezeichnet. Humus ist als ein komplexes Gemisch von organischen Stoffen aus pflanzlicher, tierischer und mikrobieller Herkunft zu verstehen, das permanenten Ab-, Um- und Aufbauprozessen unterliegt. Die Humusvorräte des Bodens werden in Pools verschiedener Stabilität und Lebensdauer eingeteilt (Abb. 1).

Dauerhumus und Nährhumus

Der größte Anteil der Humusvorräte des Bodens wird als Dauerhumus bezeichnet. Diese Fraktion ist langfristig (meistens nach der letzten Eiszeit) im Rahmen der Bodenbildung entstanden und kann heute durch Bewirtschaftungsmaßnahmen nur noch wenig beeinflusst werden (siehe Kap. 12).

Abbauprodukte der organischen Substanz gehen unter Einwirkung bestimmter Stabilisierungsmechanismen mit den Ton- und Feinschluff-Gehalten des Bodens feste Bindungen ein, sodass ein weiterer Abbau dieser organischen Bodensubstanz auf lange Sicht verhindert wird. Der Dauerhumus ist deshalb durch Verweilzeiten von Hunderten bis Tausenden von Jahren gekennzeichnet. Diese weitgehend stabile Humusfraktion umfasst ungefähr 50 % in leichten Böden und bis über 80 % des Dauerhumus in den schweren Böden (Abb. 1: Dauerhumus, Auslasshöhe des Abbaureglers).

Alle über die Ernte- und Wurzelrückstände (EWR) und Wirtschaftsdünger zugeführten organischen Materialien gehören zu einer sog. labilen Humusfraktion, zu der je nach Bodenart ungefähr 20 – 50 % der gesamten Humusstoffe des Bodens gezählt werden (Abb. 1: Nährhumus).

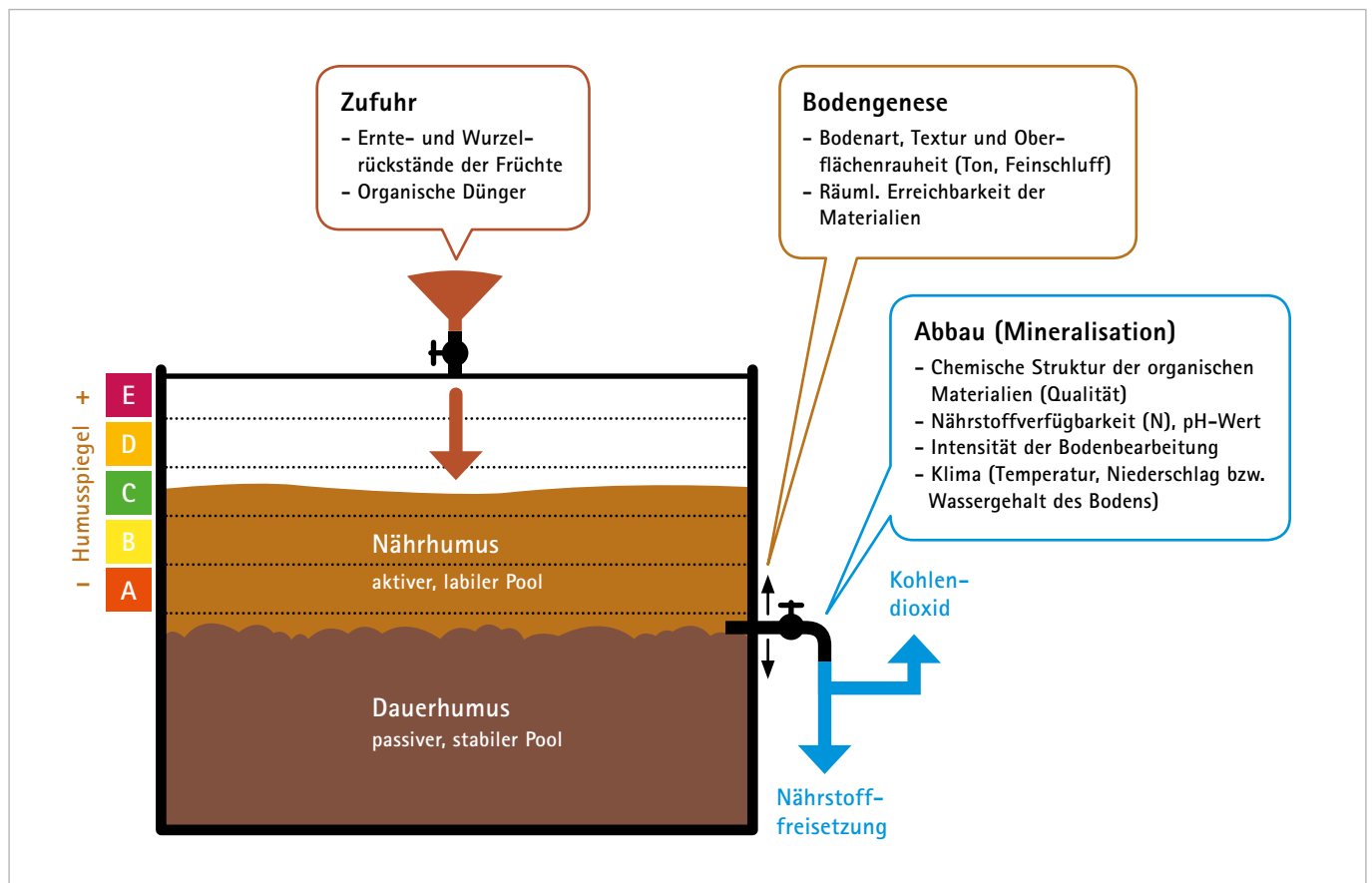


Abbildung 1: Prinzip des Humusumsatzes als offenes Fließgleichgewicht, wichtige Humusbestandteile und Einflussgrößen für den Humusabbau (Quelle: Kolbe, LfULG, in Anlehnung an Schmidt et al., 2011)

Humusabbau und Mineralisation

Nach der mechanischen Zerkleinerung und Einarbeitung in den Boden werden von der frisch zugeführten organischen Substanz zunächst die biochemisch leicht abbaubaren Bestandteile (z. B. mit geringer Abbaustabilität und engen C/N-Verhältnissen) meistens schon innerhalb weniger Monate von den Bodenlebewesen (Tiere, Pilze, Mikroorganismen) als Nahrungs- und Energiequelle genutzt und zu Kohlendioxid veratmet (z. B. Gründünger). Die schwerer abbaubare organische Substanz (Ernte- und Wurzelrückstände mit weiten C/N-Verhältnissen und hohen Ligningehalten) sowie Reste und Stoffwechselprodukte der Bodenlebewesen reichern sich im Boden zunächst etwas an, da sie nur verzögert umgesetzt werden, bis sie im Zeithorizont von einigen Jahrzehnten auch abgebaut sind. Unter praktischen Gesichtspunkten kann davon ausgegangen werden, dass alle zugeführten organischen Materialien einem vollständigen Abbau unterliegen (Abb. 1: Nährhumus).

Die abgebaute organische Substanz wird schließlich als Wasser und Kohlendioxid in den Boden und die Atmosphäre abgegeben. Von den gespeicherten Nährstoffen erfolgt bereits im ersten Jahr nach der Einbringung eine weitgehende Freisetzung der pflanzlichen Funktionselemente (vor allem K u. Na), weil sie nicht in die Zellstrukturen der organischen Substanz eingebaut sind. Entsprechend der Stabilität der chemischen Bindung werden dann auch die organisch gebundenen Grundnährstoffe N, P, S sowie einige Spurenelemente mit der Zeit freigesetzt und für das pflanzliche Wachstum verfügbar (= Mineralisation).

Die geschilderten Fraktionen mit umsetzbarer, labiler bzw. mit weitgehend stabiler organischer Substanz sind nicht scharf voneinander trennbar, die Übergänge sind fließend, die Vorgänge auch teilweise reversibel. Je nach Standort- und Umweltbedingungen finden so ständige Abbau-, Umbau- und Aufbauprozesse statt. Das Ausmaß und die Geschwindigkeit der Veränderung wird dabei von allen Faktoren bestimmt, die auf die Zufuhr und auf den Abbau der organischen Substanz Einfluss nehmen. Auf der Zufuhrseite stehen, neben den abgestorbenen Bodentieren und Mikroorganismen, vor allem die unterschiedliche Art und Menge der Ernte- und Wurzelrückstände (EWR) inkl. der Rhizodeposition an Kohlenhydraten durch die angebauten Fruchtarten und der Fruchtfolgen sowie die organischen Düngemittel, die zusammengenommen auch als organische Primärsubstanzen (OPS) bezeichnet werden (Öffnungsweite des Zufuhrreglers in Abb. 1).

Wie lange die organische Substanz im Boden verweilt, hängt entscheidend von der Abbauintensität je Zeiteinheit ab (Öffnungsweite des Abbaureglers in Abb. 1). Der Abbau der Humusstoffe ist hierbei im Wesentlichen von den nachfolgend genannten Einflussgrößen abhängig:

- von der biochemischen Zusammensetzung und Abbaustabilität der organischen Substanz
- von der Nährstoffverfügbarkeit für die Bodenlebewesen

- von chemischen und physikalischen Stabilisierungsprozessen des Bodens (Bindung zwischen organischen und mineralischen Bestandteilen, Einschluss in Bodenaggregate, Gehalte an Sauerstoff u. a. Faktoren)
- von klimatischen und hydrologischen Einflussgrößen des Standortes (Temperatur, Niederschlag bzw. Bodenwassergehalt).

Die gesamte organische Substanz aus zugeführter Düngung, aus den EWR-Mengen der Fruchtarten und dem Humusgehalt des Bodens unterliegt in Abhängigkeit von den oben beschriebenen Einflussgrößen diesem Umsetzungs- und Abbauprozess. Der aus der Mineralisation frei werdende Kohlenstoff entweicht als Kohlendioxid (CO₂) in die Atmosphäre, die freiwerdenden Nährstoffe (N, P, S, etc.) können von den angebauten Fruchtarten für die Ertragsbildung genutzt werden.

Der aktuelle Humusgehalt bzw. das aktuelle Versorgungsniveau mit organischer Substanz eines Bodens (Abb. 1: Humusspiegel inkl. VDLUFA-Bewertungsrahmen, siehe Kap. 7) kann als offenes Fließgleichgewicht zwischen Zufuhr und Abbau der organischen Bodensubstanz angesehen werden (»Fließgleichgewicht in einer Badewanne«). Die durch Mineralisation verloren gegangene organische Substanz muss also im Sinne einer Bilanz immer wieder durch Zufuhr neu gebildeter Ernte- und Wurzelrückstände aus dem Anbau der Fruchtarten und den organischen Düngern ersetzt werden, um einen bestimmten Humusspiegel zu erhalten.

Prinzip des Humusumsatzes

Nach einer einmaligen Zufuhr einer bestimmten Menge an organischer Substanz kann der Abbau und die Verweilzeit im Boden mit Hilfe einer komplexen exponentiellen Funktion berechnet werden (PAUL & CLARK, 1989) (GL 1):

$$A_t = A_0 \times e^{-k \times t} \quad \text{GL 1}$$

A_t = Substratmenge zur Zeit t

A_0 = Substratmenge am Anfang

e = 2,718 (Eulersche Zahl)

k = Abbaukonstante pro Zeiteinheit

t = Zeit

Beispiel für Stroh (C/N = 86), $k = 0,021$, 50 Wochen:

$$100 \% \times e^{-0,021 \times 50 \text{ Wochen}} = 35 \%$$

Die mit Hilfe der Gleichung 1 berechnete Abbaurate bzw. die im Zeitverlauf verbleibende Menge an organischer Substanz (A_t) ist hierbei abhängig von der Ausgangsmenge (A_0) und von den in den nachfolgenden Jahren jeweils verbleibenden Mengen sowie von einer Abbaukonstanten (k), die wiederum abhängig ist von der Substratqualität, den genannten Einflussfaktoren des Bodens und des Klimas und der abgelaufenen Zeit (t). Je größer der Wert für k ist, umso größer bzw. schneller ist der Abbau. Oft können zwei k -Werte für einen schnell und einen langsam abbaubaren Anteil der organischen Substanz ausgewiesen werden.

In Abhängigkeit von der Substratqualität kann z. B. für EWR-Materialien ein mittlerer k-Wert von 0,032 und für Stroh von 0,021 angesetzt werden. In Gleichung 1 wird der Abbau für Stroh ausgewiesen. Bei einem k-Wert von 0,021 beträgt im relativen Maßstab die verbleibende Menge nach ca. 1 Jahr noch 35 % (vgl. Abb. 2 u. Abb. 12). Als Ergebnis erhält man je Zeiteinheit entsprechend der Höhe der Anfangsmenge auch eine große anfängliche Abbaurrate, die in den jeweils folgenden Jahren stetig kleiner wird bis nach einigen Jahrzehnten unter praktischen Gesichtspunkten die gesamte anfänglich vorhandene Humusmenge abgebaut ist (Abb. 2: rote Linie).

Bei Annahme einer jährlich gleichbleibenden Zufuhr an organischer Substanz, z. B. in Form einer gleichhohen Zufuhrmenge an Stroh, kommt es daher nicht zu einer stetigen linearen Anreicherung an stabilisierten Humusformen, wie man bisher angenommen hat. Sondern es erfolgt eine von Jahr zu Jahr geringer werdende Anreicherung an Humus. Durch Aufsummierung der jährlich übergebliebenen Abbaumengen der Einzelgaben kommt es zur Ausprägung einer typischen kumulativen Gesamtwirkung (Abb. 2: farbiger Bereich).

Hierbei verhält sich die abgebaute Menge proportional zum gesamten Vorrat an Humus im Boden. Nach einer Zeitperiode von ungefähr 20–30 Jahren steigen die Humusgehalte gar nicht mehr an. Es wird ein sog. Fließgleichgewicht erreicht, wobei die Zufuhrmenge aus der organischen Düngung dann genau der

Menge an organischer Substanz entspricht, die jährlich über die Mineralisation im Boden abgebaut wird. Der gesamte organische Dünger aus dem ersten Applikationsjahr ist zu diesem Zeitpunkt vollständig abgebaut worden.

Eine stetig höhere Zufuhr an organischer Substanz führt demzufolge auch zu einem Anstieg der Humusversorgung und Humusgehalte im Boden. Unter sonst gleichen Umgebungsbedingungen steigt dann allerdings auch die Abbaumenge entsprechend an bis ein neues Gleichgewicht im Boden erreicht ist, wobei je Zeit- und Flächeneinheit dann wiederum die Zufuhrhöhe genau der Abbaumenge an organischer Substanz entspricht.

Humusaggregate

Die durch den Humusabbau entstandenen chemischen Umwandlungsprodukte wurden früher als sehr komplexe, langkettige Huminstoffe bezeichnet. Ein direkter Nachweis dieser Substanzen ist aber bis heute nicht gelungen. Nach aktueller Ansicht entstehen zwar gelblich bis braun-schwarz gefärbte äußerst vielfältige Abbauprodukte, die aber als verhältnismäßig kleine, kurzkettige chemische Verbindungen umschrieben werden können (Abb. 3).

Durch die massive und direkte Beteiligung von Bodenlebewesen entstehen Verbindungen zwischen diesen vielfältigen Abbauprodukten der organischen Substanz und den mineralischen Be-

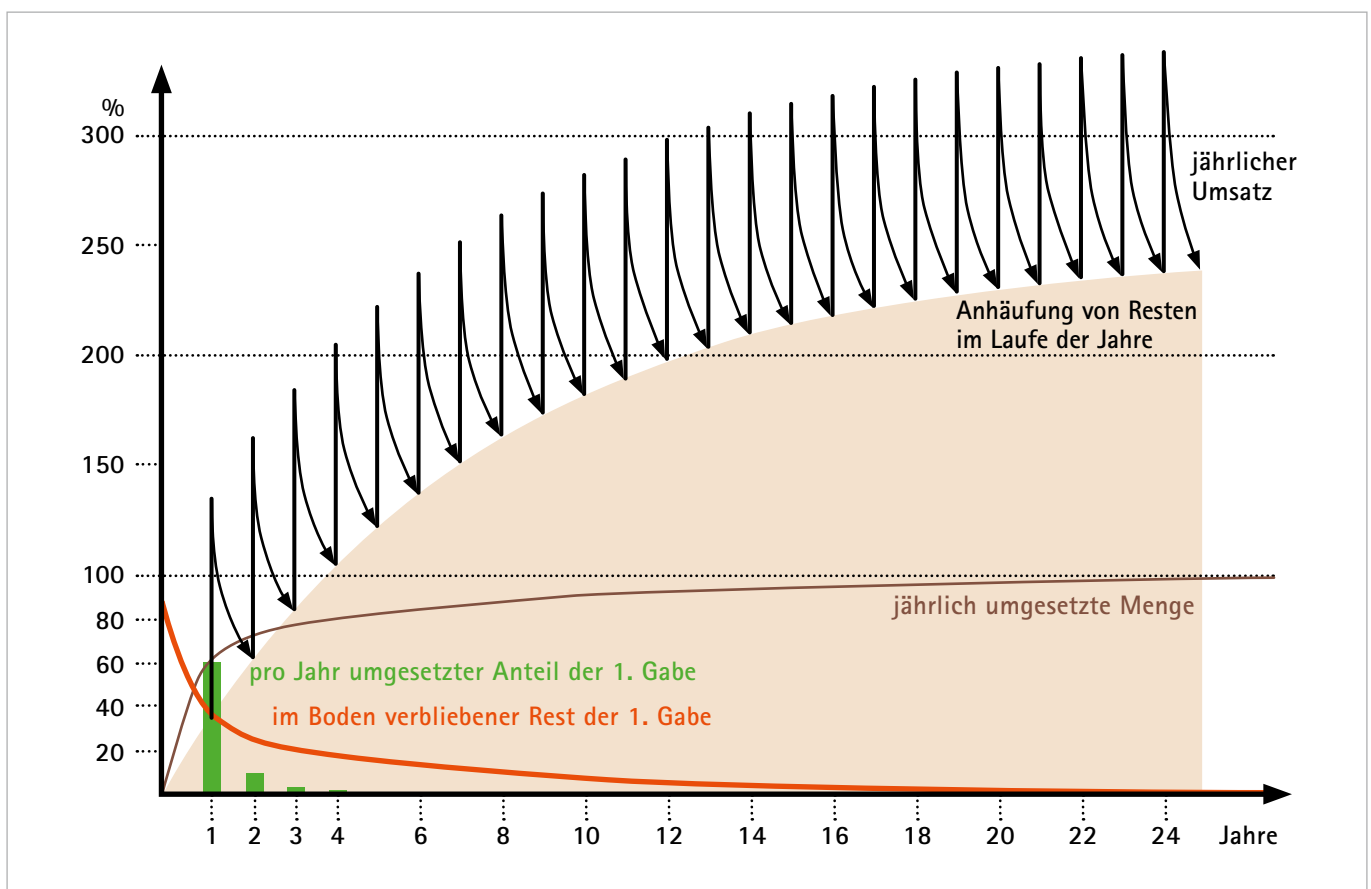


Abbildung 2: Anhäufung, Abbau und Umsatz nach jährlicher Zufuhr einer gleichbleibenden Menge an organischer Substanz im Boden (Erklärung siehe Text) (Quelle: SAUERBECK, 1985, verändert)

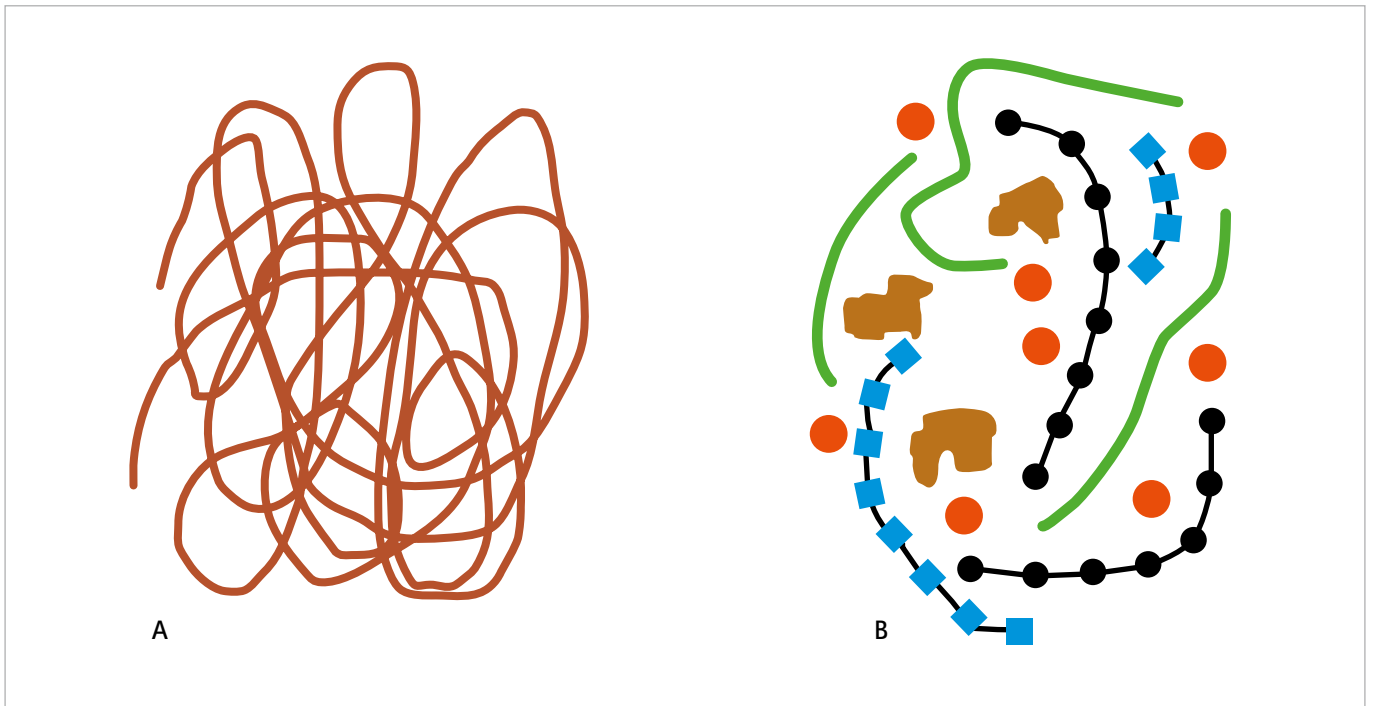


Abbildung 3: Nach heutiger Ansicht besteht Humus nicht aus langkettigen Huminstoffen (A) sondern aus relativ kurzkettingen chemischen Substanzen verschiedener Art (B), die mit Kationen (rot) und Tonteilchen Aggregate bilden: Polysaccharide (schwarz), Polypeptide (blau), aliphatische Gruppen (z.B. Fette) (grün), aromatische Lignin-Fragmente (braun) (Quelle: SIMPSON et al., 2002)

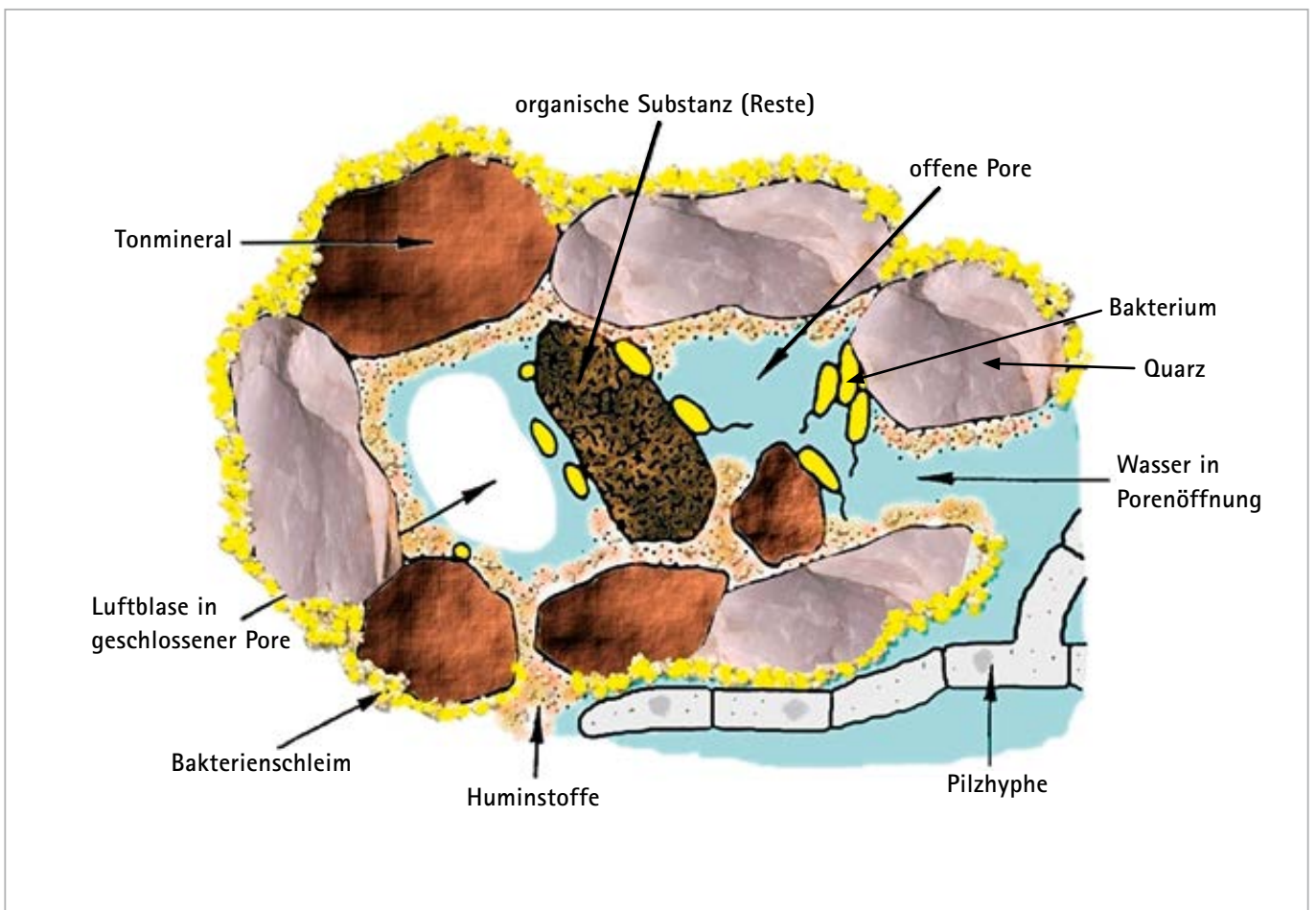


Abbildung 4: Modell eines Humusaggregats (Quelle: PAUL & CLARK, 1989, verändert durch Beck, LfL)

standteilen des Bodens (Tonteilchen) unter Beteiligung von Kationen (z. B. Ca^{2+} , Mg^{2+}), die als Ton-Humus-Komplexe bezeichnet werden (Abb. 4). Durch diese sog. »Lebendverbauung« und die »Bioturbation« werden stabile Bodenkrümel aufgebaut. Bakterien Schleim besteht z. B. aus hydrophoben Fettsäuren der abgestorbenen Mikroorganismen, wodurch die Verkittung der Aggregate verbessert wird.

Daher besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der mikrobiellen Aktivität und der Aggregatstabilität des Bodens. Die Elastizität und Bodengare der unter Beteiligung von Bodenlebewesen (biologisch) gebildeten Krümel ist deutlich höher als z. B. die von ausschließlich durch physikalische Prozesse (z. B. Frostgare) gebildeten Aggregate. Das Wasser- und Nährstoffspeichervermögen von organisch-mineralischen Bodenaggregaten ist höher als bei reinen Tonmineralien. Ton-Humus-Komplexe und Bodenkrümel stabilisieren den Boden gegenüber Erosion und Verschlammung, erhöhen das Porenvolumen und schaffen so günstige Voraussetzungen für den Luft- und Wasserhaushalt. Sie sind als zentrale Elemente der Bodenfruchtbarkeit anzusehen.

Humus und Bodenfruchtbarkeit

Dem Humus bzw. der organischen Substanz des Bodens werden vielfältige Funktionen und Aufgaben zugeschrieben. So sind die Auswirkungen dieses Wirkungsgefüges am Beispiel des Maisertrages näher untersucht worden (Abb. 5). Humus hat hiernach sowohl einen direkten Einfluss auf das Ertragsniveau als auch einen indirekten Einfluss über spezifische Wirkungen bestimmter Bodeneigenschaften durch Verbesserung der Bodenstruktur, der Luft- und Wasserführung sowie der Erhöhung der Wasserkapazität.

Wie aus einer weiteren Auswertung von Dauerversuchen zu entnehmen ist, werden durch den Humusgehalt sowohl physikalische, chemische als auch biologische Eigenschaften der Bodenfruchtbarkeit beeinflusst. Exemplarisch wurden hierzu jeweils extreme Varianten miteinander verglichen, die unter praktischen Gesichtspunkten eine untere und obere Grenze der Veränderung der aufgeführten Eigenschaften aufzeigen (Tab. 1).

Bei Anhebung des Versorgungsgrades mit organischer Substanz von einem deutlichen Mangelzustand bis zur oberen Grenze gewöhnlicher ackerbaulicher Möglichkeiten werden deutliche Wirkungen auf die Lagerungsdichte, das Porenvolumen und die Aggregatstabilität des Bodens erreicht, so dass sowohl die Tragfähigkeit und Erosionsanfälligkeit als auch die Wasserinfiltration und die nutzbare Feldkapazität verbessert werden. Durch die stetige Zufuhr an organischer Substanz wird zudem das Bodenleben angeregt, wodurch 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 erhöhte Zufuhr an umsetzbarer organischer Substanz erfolgt eine verstärkte Mineralisation und Freisetzung von Nährstoffen, wovon besonders die

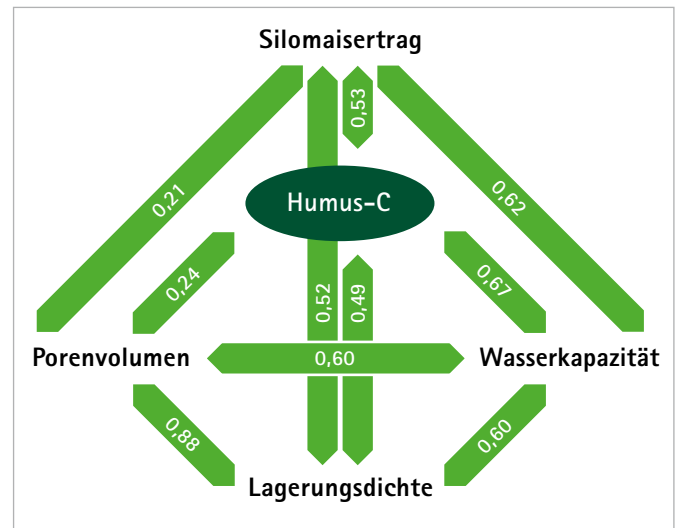


Abbildung 5: Einfluss von Humusversorgung und physikalischen Bodeneigenschaften in der Ackerkrume auf den Silomaisertrag eines Sandbodens (Dauerfeldversuch M4, Groß Kreutz, Brandenburg, Bestimmtheitsmaß r^2 : $\leq 0,25$ = sehr geringer Einfluss, $\geq 0,75$ = sehr großer Einfluss; Quelle: ZIMMER et al., 2011)

Tabelle 1: Auswirkungen einer Erhöhung des Versorgungsgrades mit organischer Substanz vom Niveau der Unterversorgung (= 100 %) auf einen guten bis sehr guten Versorgungszustand (um ca. +500 kg HÄQ/ha) auf physikalische, chemische und biologische Eigenschaften der Bodenfruchtbarkeit

Merkmalsname	Veränderung (in %)
physikalische Eigenschaften	
Lagerungsdichte	-2 bis -13
Porenvolumen	+1 bis +3,5
Aggregatstabilität	+8 bis +34
Anteil Makroporen	+8 bis +11
Infiltrationsrate (Wasser)	+27 bis +80
Wasserkapazität	+3 bis +4
nutzbare Feldkapazität	S +24 bis +28
	L +13 bis +15
chemische Eigenschaften	
C_{org} - und N_t -Gehalte	+30
potenzielle N-Mineralisierung	+26 bis +33
effektive Kationenaustauschkapazität	S +20
	L +10
biologische Eigenschaften	
mikrobielle Biomasse	+6 bis +50
Regenwurmdichte	+38 bis +40
Fruchtarternertrag	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

Fruchtbarkeit und Ertragsfähigkeit der leichten Böden sowie Anbauverfahren des ökologischen Landbaus profitieren können. Aus diesen Darstellungen wird deutlich, dass das Versorgungsniveau des Bodens mit organischer Substanz bzw. die Humusgehalte des Bodens als übergeordnete Merkmale angesehen werden können, weil ein breites Spektrum wichtiger Eigenschaften der Bodenfruchtbarkeit direkt oder indirekt davon abhängen. Daher ist nach der »guten fachlichen Praxis«, zu der jeder Betrieb auch durch gesetzliche Vorgaben (Bundes-Bodenschutzgesetz, Düngeverordnung, EU-Öko-Verordnung) verpflichtet ist, »die Fruchtbarkeit des Bodens, insbesondere der standort- und nutzungstypische Humusgehalt, zu erhalten oder ggf. nachhaltig zu verbessern«.

Aus Tabelle 1 werden aber nicht nur die Möglichkeiten, sondern auch die Grenzen einer Erhöhung des Versorgungsgrades mit organischer Substanz erkennbar. So ist es unter Berücksichtigung eines reichen experimentellen Erfahrungsschatzes unter den praktischen landwirtschaftlichen Verhältnissen (Fruchtfolge, organische Düngung) kaum möglich, die Humusgehalte von Ackerland um mehr als 30% anzuheben (bei 1,0% sind das in etwa 0,3% C_{org} i. d. TM). Die realistischen Erfolgsaussichten für einen aktiven Humusaufbau sind nach diesen Ergebnissen also ebenfalls begrenzt.

2 Einflussfaktoren auf Gehalte und Umsatz an Humus

Formen der Landnutzung

Allgemein werden die Humusgehalte in folgende Stufen eingeteilt (% TM) (Quelle: BODENKUNDLICHE KARTIERANLEITUNG, KA5, 2005):

Stufe	Humus (%)	C _{org} (%)	Bezeichnung
H1	< 1	< 0,58 (Faktor 1,724)	sehr schwach humos
H2	1 – 2	0,58 – 1,15	schwach humos
H3	2 – 4	1,16 – 2,31	mittel humos
H4	4 – 8	2,32 – 4,63	stark humos
H5	8 – 15	4,64 – 8,69	sehr stark humos
H6	15 – 30	8,70 – 15,00 (Faktor 2)	extrem humos, anmoorig
H7	> 30	> 15,00	organisch (Torf)

In Brandenburg können z. B. ackerbaulich genutzte grundwasserferne diluviale Sandböden sehr geringe Humusgehalte von 0,5 % Humus aufweisen, während in grund- bzw. staunässebeeinflussten Moorböden sehr hohe Gehalte von bis zu 70 % Humus ermittelt wurden (LBGR, 2015). Die höchsten Gehalte an Humus sind daher von Flächen mit Grundwasserbeeinflussung bzw. Schichtenwasserstauung bekannt. Hier ist durch den Sauerstoffmangel der Abbau der organischen Substanz behindert,

was dazu führt, dass z. B. auf Hoch- und Niedermooeren Humusgehalte über 30 % zu finden sind. Große Unterschiede bestehen auch in den Humusgehalten der oberen Bodenschichten (Bodenkrume) in Abhängigkeit von der Form der Landnutzung (Quelle: nach DÜWEL & UTERMANN, 2008):

- Grünland 4 – 15 % Humus
- Forsten 2 – 8 % Humus
- Ackerland 1 – 4 % Humus.

Erhebliche Mengen an organischer Substanz werden zudem in den Bodenschichten bis 1 m Tiefe vorgefunden. Besonders Grünland weist aus pedogenetischen Gründen meistens höhere Gehalte auf als übliche Waldflächen mit vergleichsweise geringmächtigen Bodenhorizonten. Durch meliorativen Eingriff z. B. in Folge Trockenlegung und Inkulturnahme von Mooren oder Drainage von Feuchtgebieten kommt es zu großen Verlusten an organischer Substanz. Auch durch Umwandlung z. B. von Wald oder Grünland zu Ackerland können die Humusgehalte deutlich um 20 – 80 % abnehmen (Abb. 6).

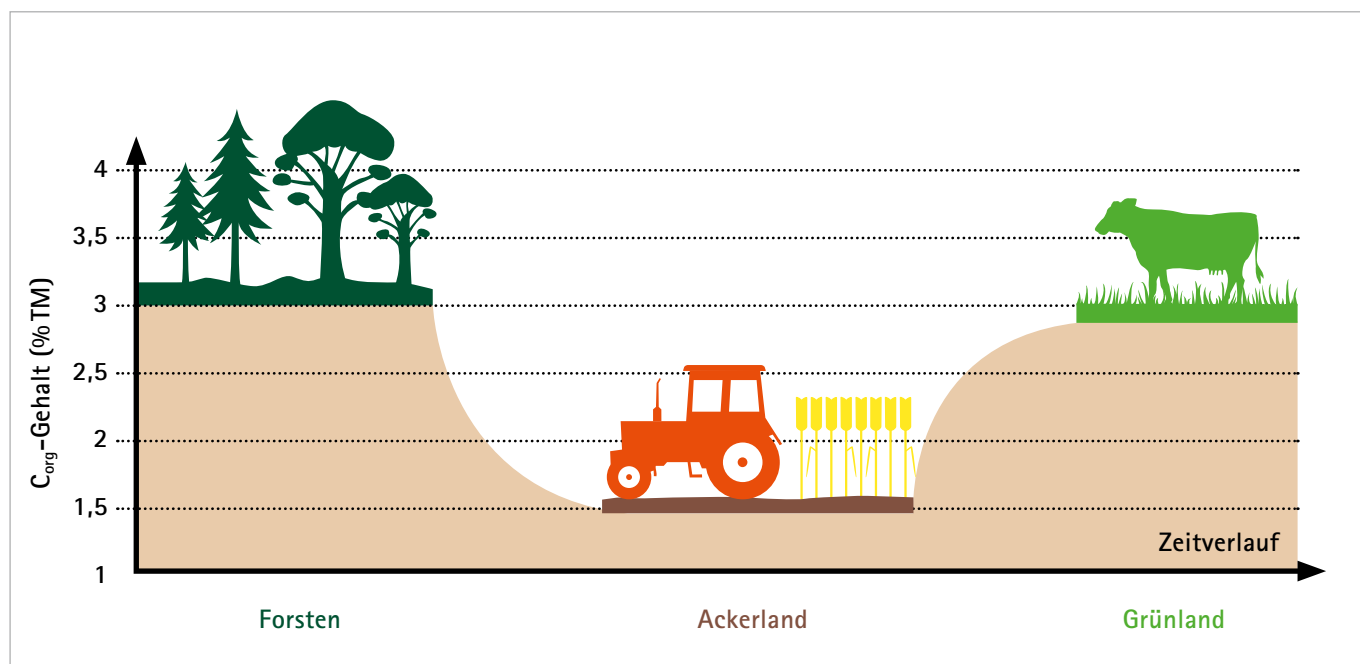


Abbildung 6: Einfluss der Nutzungsänderung auf die Entwicklung der C_{org}-Gehalte von Forsten, Ackerland und Grünland im Zeitverlauf (Quelle: KOLBE, LFULG, nach Vorgaben von DÜWEL & UTERMANN, 2008)

Bei diesen Nutzungsänderungen werden erhebliche Mengen an Treibhausgasen einmalig in Form von Kohlendioxid freigesetzt. Landnutzungsänderungen sind prinzipiell reversibel, d. h. bei entsprechender Änderung der Nutzungsform, z. B. durch Wiedervernässung von Mooren und Umwandlung von Ackerland zu Grünland oder Wald, können sich die ursprünglichen Humusgehalte bzw. die für die Nutzungsart typischen Humusgehalte langfristig wieder einstellen. Jeweils direkt nach den Nutzungsänderungen erfolgen die größten Bodenveränderungen (sowohl Ab- wie Zunahmen) bis mit der Zeit wieder ein Gleichgewicht entsprechend der Nutzungsart sich einstellt und die Humusgehalte dann keine weiteren Veränderungen mehr erfahren.

Ackernutzung

Die in Ackerböden vorzufindenden unterschiedlichen Humusgehalte sind das Ergebnis der Wirkung von Standort- und Bewirtschaftungsfaktoren. Hierzu zählen insbesondere:

- das geologische Ausgangsmaterial der Bodenbildung
- die Textur des Bodens, insbesondere der Feinanteil < 0,006 mm
- das Klima
- das Grund- und Stauwasser
- die Landnutzungsart

- das Anbauverhältnis der Kulturarten (Fruchtfolge)
- die Art und Intensität der Bewirtschaftung (Düngung, Bodenbearbeitung etc.).

Im Ergebnis der langjährigen Wirkung dieser Faktoren stellt sich ein standorttypischer Humusgehalt ein. Eine jede Veränderung dieser Faktoren führt auch zu Veränderungen des Humusgehaltes. Die überwiegenden Anteile der landwirtschaftlichen Flächen mit Ackernutzung können zu den grundwasserfernen bzw. grund- und schichtenwasserunbeeinflussten Standorten gezählt werden. Der Humusgehalt und die Umsetzung der organischen Substanz auf diesen Standorten sind im Wesentlichen von Faktoren des Klimas, des Bodens und der Bewirtschaftung abhängig (siehe Abb. 7). Zusammenfassend kann die folgende Gewichtung der Einflussfaktoren angenommen werden (KOLBE, 2012: Auswertung von ca. 240 Dauerversuchen aus Mitteleuropa):

- Klima bzw. Witterung mit meistens über 50 %
- Eigenschaften des Bodens mit 20 – 30 %
- Maßnahmen der Bewirtschaftung (Fruchtfolge, Düngung, Bodenbearbeitung, etc.) mit 5 – 30 % der Variationsbreite.

Problematisch ist die Einschätzung des Einflusses von Bewirtschaftungsfaktoren auf grundwasser- bzw. staunässebeeinflussten Ackerböden, da hierzu kaum Versuchsergebnisse vorliegen.

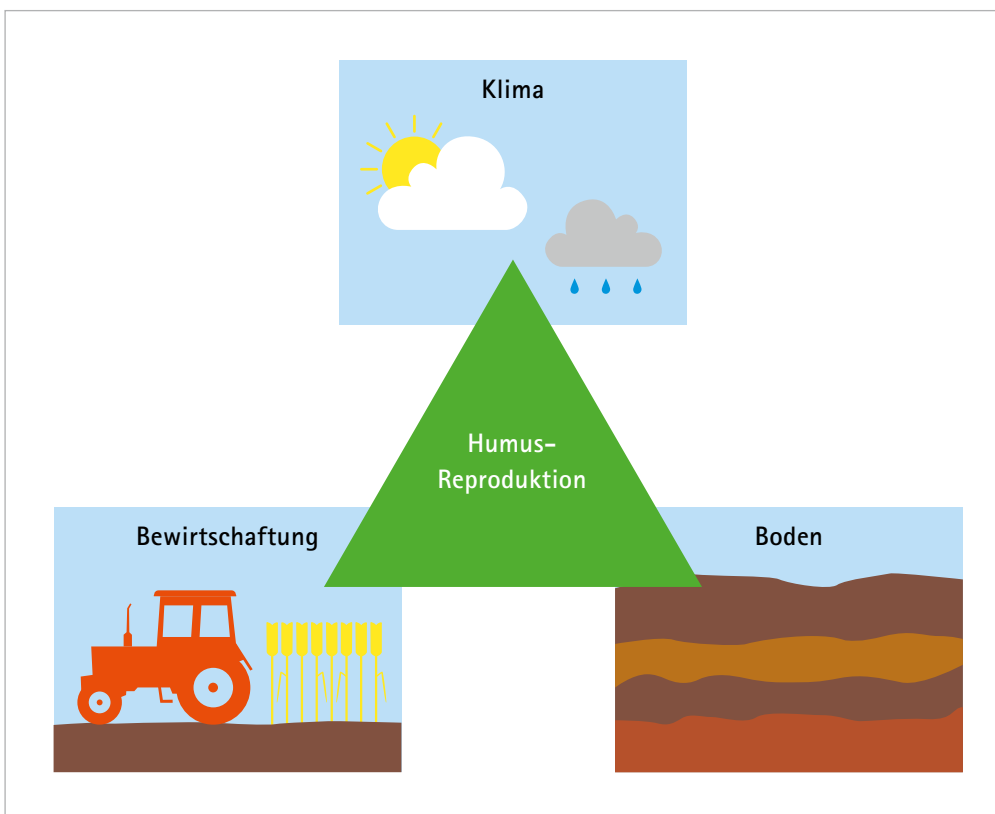


Abbildung 7: Die Einflussfaktoren Klima, Boden und Bewirtschaftung sind für den Humusumsatz der meisten Standorte entscheidend (Quelle: THIEL, LFULG)

Auf einem stark grundwasserbeeinflussten mittel-humosen Stau-gley in Kittendorf (Mecklenburg-Vorpommern) blieben z. B. deutlich unterschiedliche Fruchtfolgezusammensetzungen ohne Auswirkungen auf den Humusgehalt in der Ackerkrume (ZIMMER, 2003).

Einfluss des Standortes

Aufgrund der Bindung von Humuspartikeln an die Tonfraktion des Bodens ist in vielen Untersuchungen ein Anstieg der Humusgehalte in Folge steigender Ton- und Feinanteile des Bodens ermittelt worden (Abb. 8). Ein Anstieg der Umsetzung und Ab-baurate an Humusstoffen findet mit steigendem Tongehalt bzw.

enger werdenden C/N-Verhältnissen des Bodens bis zu den sehr aktiven Lehmstandorten statt (Ausnahmen: schwere Tonböden und Schwarzerden). Darüber hinaus wird der Humusumsatz mit ansteigenden Temperaturen stark positiv beeinflusst und bei hoher Wasserversorgung des Bodens aufgrund entsprechend hoher Niederschläge gewöhnlich verringert. Abbildung 9 zeigt eine ausgeprägte Wechselwirkung zwischen steigenden Feinanteilen (Ton + Feinschluff) des Bodens und den Niederschlägen auf die Humusgehalte. Durch diese komplexen Prozesse haben sich mit der Zeit ganz unterschiedlich hohe Gehalte an Humus auf den verschiedenen Standorten eingestellt.

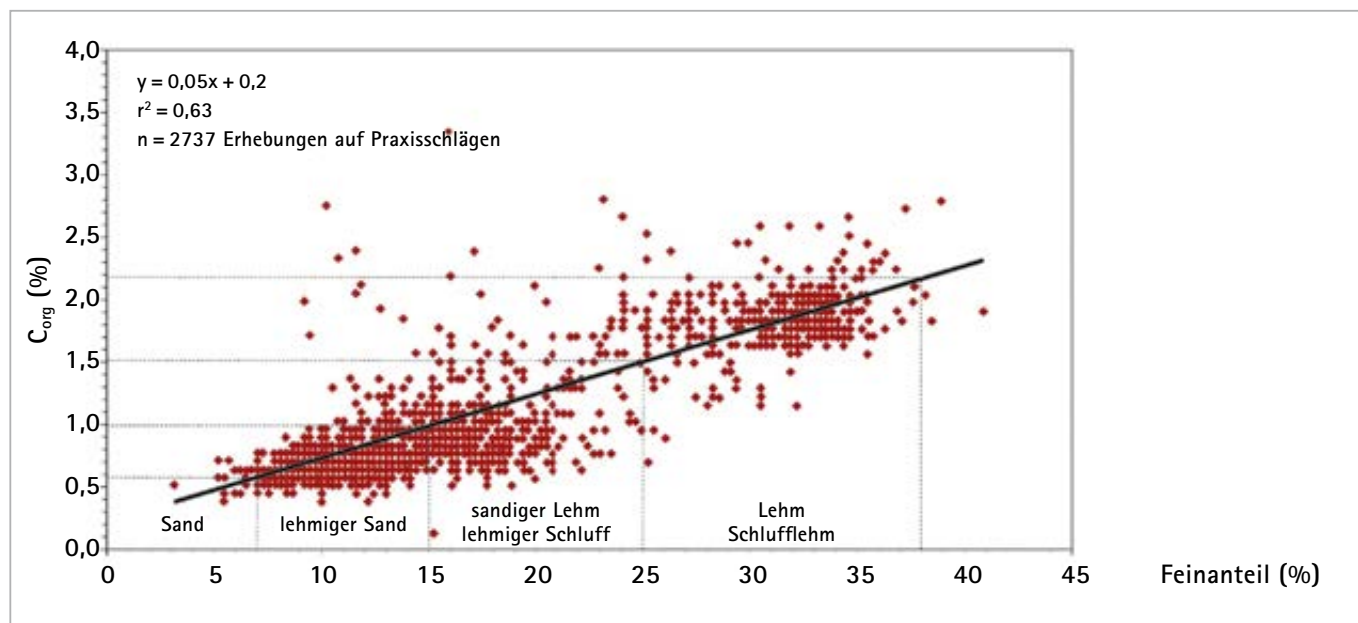


Abbildung 8: Einfluss der Feinanteile auf die C_{org} -Gehalte des Bodens in Ostdeutschland (Quelle: KÖRSCHENS & SCHULZ 1999, nach ROGASIK, 2005)

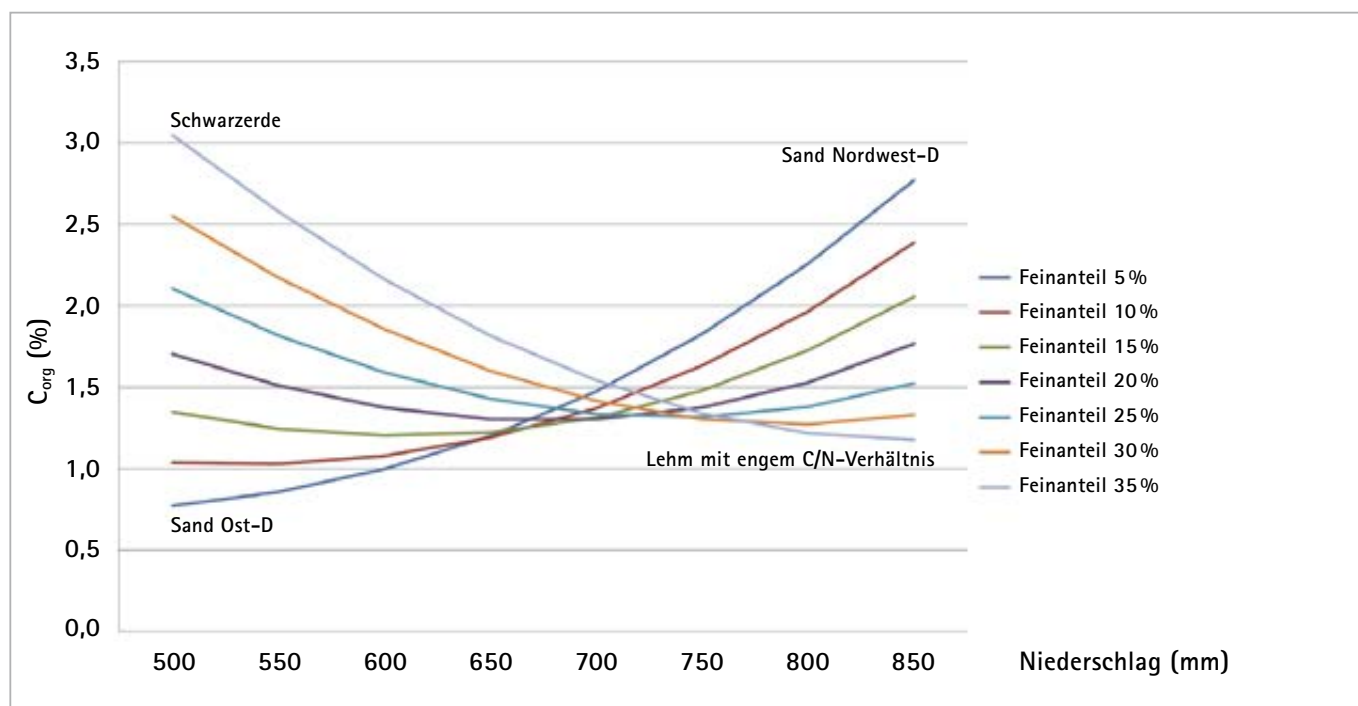


Abbildung 9: Einfluss der Feinanteile und der Niederschläge auf die Humusgehalte des Bodens (Quelle: KOLBE, LfULG: Ergebnisse regressionsanalytischer Auswertungen von Dauerversuchen: Datei »Deutschland« mit 194 Versuchen und 1479 Varianten)

Einfluss der Fruchtarten

Durch den periodischen Anbau der Fruchtarten und Zwischenfrüchte werden Ernte- und Wurzelreste (EWR) gebildet, die nach der Ernte auf den Feldern verbleiben. Das (mehrjährige) Ackerfutter, Untersaaten und die Wintergetreidearten weisen je nach Ertragsniveau verhältnismäßig hohe EWR-Mengen auf. Körnerleguminosen, Stoppelfrüchte und die Hackfrüchte hinterlassen dagegen relativ niedrige EWR-Mengen nach der Ernte im Boden (Abb. 10).

Für den Humusumsatz sind nicht nur die Mengen sondern auch die EWR-Qualität und weitere Faktoren von Bedeutung, wodurch die Rangfolge der Fruchtarten bei der Humusbildung entscheidend verändert wird. Die humifizierende Wirkung der Fruchtarten kann hierbei als Koeffizient dargestellt werden (Humusäquivalente in kg HÄQ/ha u. Jahr), die als komplexe Summenwirkung zwischen Anbaudauer, Bodenruhe, Menge und C/N-Verhältnis der Ernte- und Wurzelreste (EWR) in Abhängigkeit

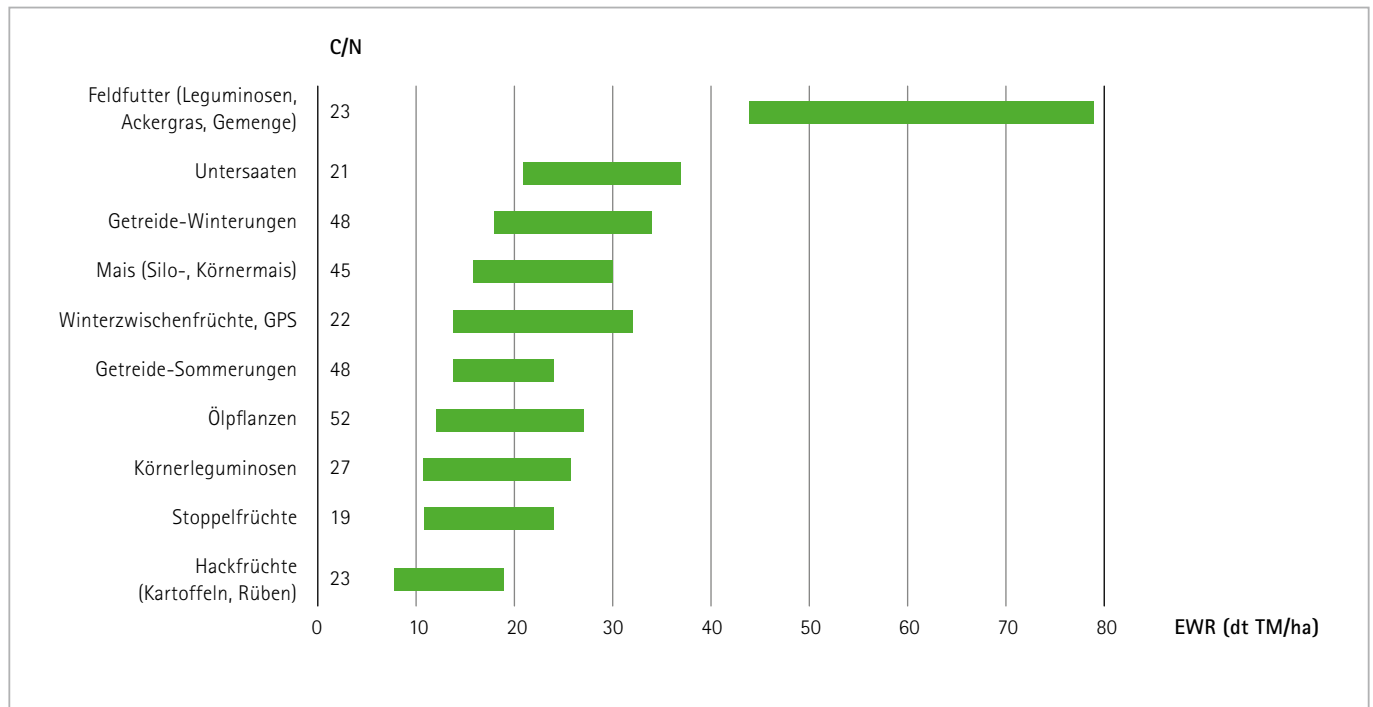


Abbildung 10: Einfluss der Fruchtarten auf die Menge und Qualität (C/N-Verhältnis) der Ernte-, Stoppel- und Wurzelrückstände (EWR) (Quelle: Zusammenstellung von KOLBE, LFULG)

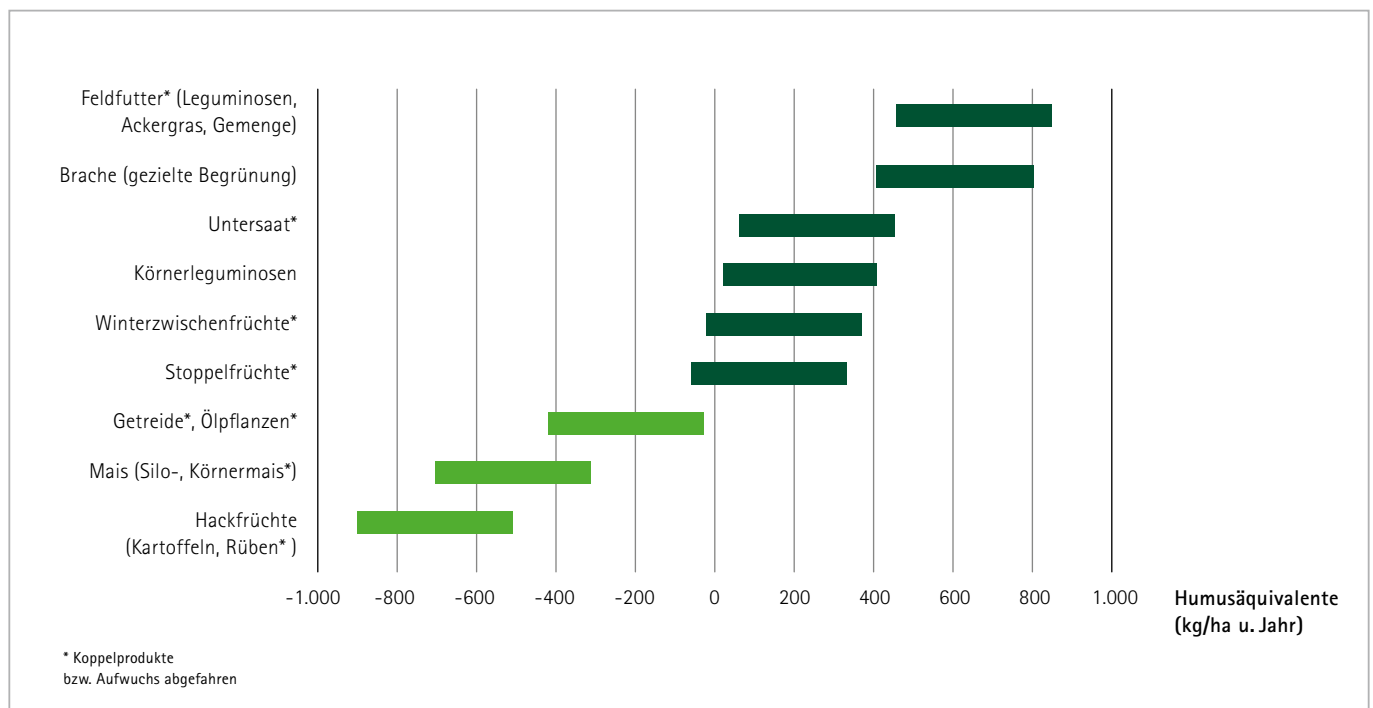


Abbildung 11: Bandbreite der Humifizierungskoeffizienten (HÄQ) der Fruchtarten (Dunkelgrün = Humusmehrer; Hellgrün = Humuszehrer; Quelle: KÖRSCHENS et al., 2004; KOLBE, 2010)

von den Eigenschaften des Standortes (Boden, Klima) angesehen werden (Abb. 11, Balkenlänge = Variationsbreite der Standorte). Von den verschiedenen Maßnahmen der Bewirtschaftung wird somit die Humusbilanz entscheidend dadurch bestimmt, welche Fruchtarten zum Anbau gelangen. Durch Feldfutter, Körnerleguminosen und Untersaaten entstehen auf allen Standorten positive Salden. Die eingebrachten EWR-Mengen dieser Früchte sind z. T. deutlich höher als der durchschnittliche jährliche Humusabbau. Die Untersaaten und Zwischenfruchte können als Maßnahmen angesehen werden, die in Ergänzung einer Hauptfrucht zusätzliche Mengen an organische Substanz einbringen. Alle Fruchtarten mit positiven Koeffizienten werden daher auch als »Humusmehrer« bezeichnet.

Je größer der Anteil an Getreide und vor allem an Mais und Hackfrüchten in der Fruchtfolge ist, umso negativer wird der Saldo ausfallen. Weil bei diesen Fruchtarten die eingebrachten EWR-Mengen nicht ausreichen, um den Humusabbau zu kompensieren, werden sie auch als »Humuszehrer« bezeichnet. Ein hohes Ertragsniveau führt über ansteigende Mengen an Ernte- und Wurzelrückständen zu einer Verbesserung der Versorgung. Die gewöhnlich hohe Intensität der Bodenbearbeitung in Folge Anbau und Erntearbeiten einiger Hackfrüchte verstärkt den Humusabbau zusätzlich. Einige Fruchtarten, wie das Sudangras oder Kurzumtriebsplantagen mit schnellwachsenden Baumarten, können in ihrer Humuswirkung noch nicht sicher genug eingeschätzt werden.

Einfluss der organischen Materialien

Auf Grund der chemischen Zusammensetzung (Gehalte an Lignin, Stickstoff, C/N-Verhältnis) sind die organischen Materialien nach der Ausbringung durch ein deutlich unterschiedliches Ab-

bauverhalten gekennzeichnet (Abb. 12). Abbaustabile Materialien mit sehr weiten C/N-Verhältnissen, wie Torf, Holz und Baum-Nadeln weisen einen langsamen Abbau auf. Nach 3 Jahren sind meistens noch 40 – 60 % der eingebrachten Substanzmenge strukturell nachweisbar. Durch Belassen auf der Bodenoberfläche (z. B. von Stroh zum Erosionsschutz) kann der Abbau zwischenzeitlich um ca. 20 Wochen verzögert werden. Bei vielen landwirtschaftlich nutzbaren Materialien sind jedoch nach Aufbringung und Einarbeitung nach einem Jahr meistens 70 % und bei Vorlage von relativ engen C/N-Verhältnissen auch über 80 % der eingebrachten Substanzmengen im Boden nicht mehr nachweisbar.

Entsprechend diesem Abbauverhalten weisen die in den Betrieben verfügbaren oder von außen zugeführten organischen Materialien auch eine stark unterschiedliche Humusreproduktionsleistung auf, die ebenfalls durch Humifizierungskoeffizienten (in kg HÄQ/t FM-Substrat) dargestellt werden kann (Abb. 13). Auf Frischmasse (FM) bezogen kommt den Komposten und dem Stroh eine relativ hohe Wirkung zu, während die Humifizierung je aufgebrachter Gewichtseinheit bei den Flüssigmisten sowie bei der Gründüngung am geringsten ist. Die jeweils niedrigsten angegebenen Werte werden bei entsprechend niedrigen Trockenmasse-Gehalten erlangt sowie auch bei hohen durchschnittlichen Zufuhrmengen an organischer Substanz, weil dann oft eine geringere Humuswirkung zu veranschlagen ist als bei kleineren Zufuhrmengen.

In Bezug auf die ausgebrachte Trockenmasse (TM) stellt sich nach Gründüngung sowie meistens auch bei Strohzufuhr nur eine geringe Humuswirkung ein. Dagegen weisen wiederum vor allem die verschiedenen Kompostarten sowie auch Gärrückstände und Stalldung bei stetiger Zufuhr eine hohe Humus-

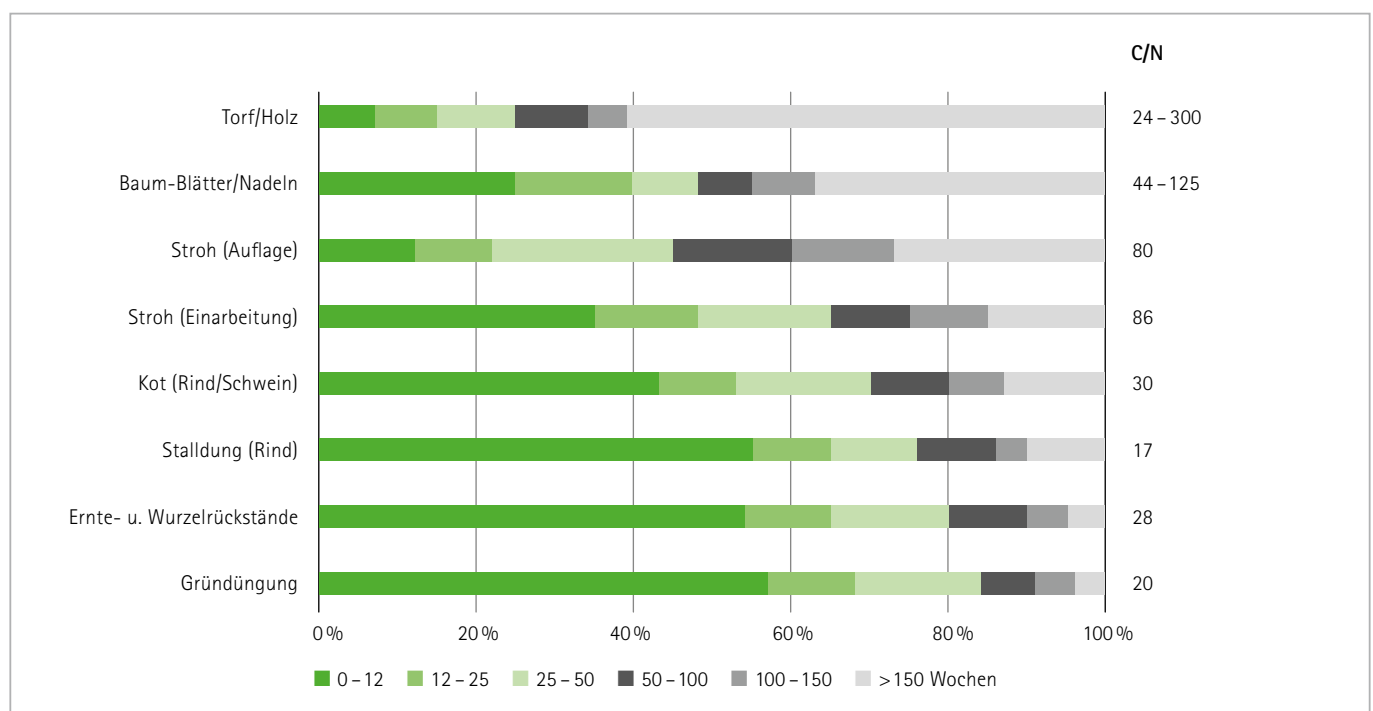


Abbildung 12: Zeitlicher Verlauf des Abbaus organischer Materialien nach Aufbringung (Stroh) und/oder Einarbeitung in den Boden (Quelle: Netzbeutelversuche, Zusammenstellung von KOLBE, LFULG)

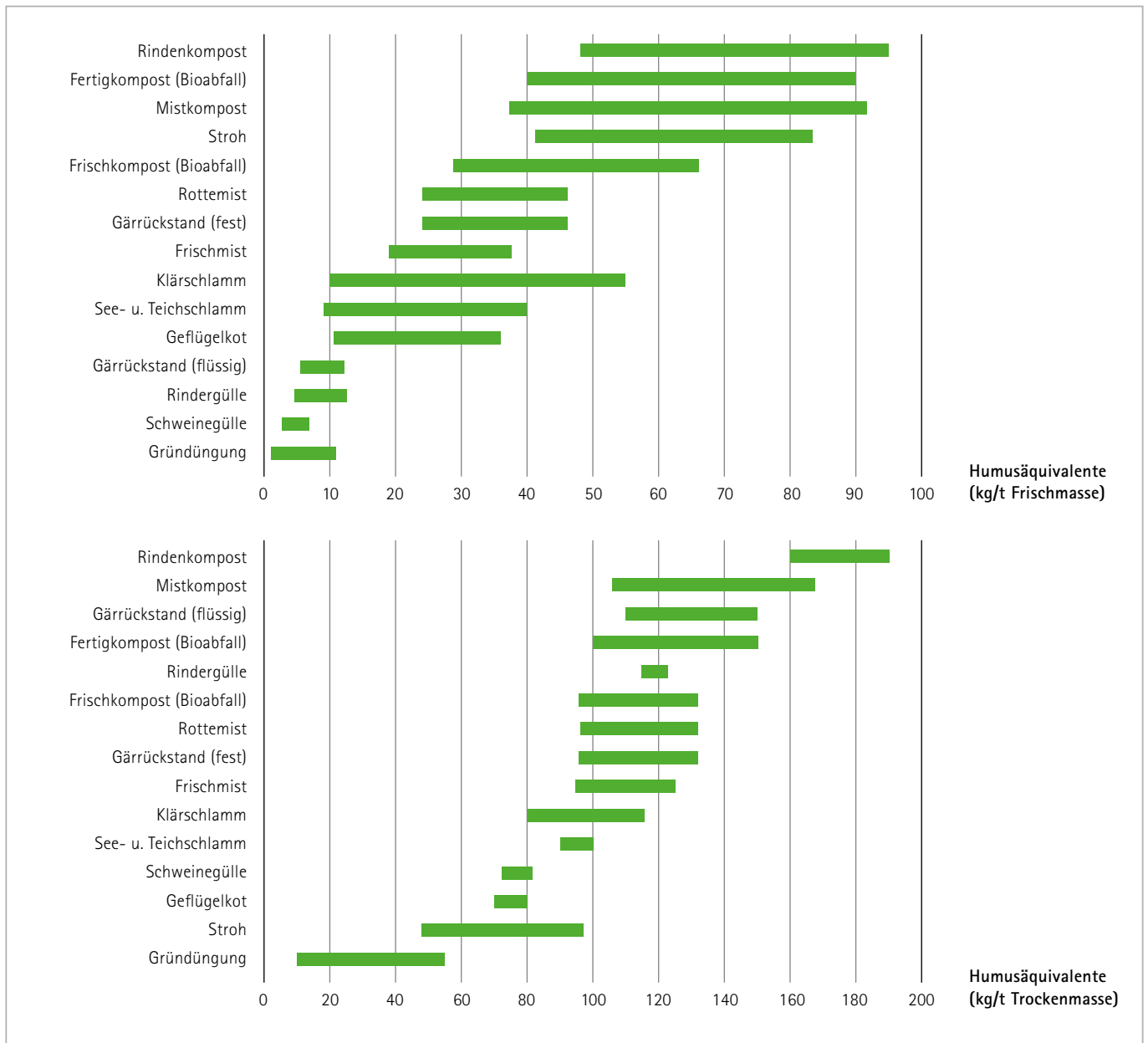


Abbildung 13: Rangfolge und Variationsbreite der Humusproduktion der organischen Materialien (HÄQ; oben: Angabe i. d. Frischmasse; unten: Angabe i. d. Trockenmasse) (Quelle: KÖRSCHENS et al., 2004; KOLBE, 2010)

anreicherung auf. Folgende Rangfolge der absteigenden Reproduktionsleistung organischer Materialien kann formuliert werden: Kompost > Rottemist > Gärprodukte > Frischmist > Rindergülle > Schweinegülle > Stroh > Gründüngung.

Die Angaben zu Gärrückständen beziehen sich vor allem auf Produkte aus der Vergärung von Rinder- und Schweinegülle. Für die Vergärung pflanzlicher Substrate liegen bisher noch keine verlässlichen Koeffizienten vor. Sie dürften auf TM-Basis zwischen Gärrückstand (flüssig) und Klärschlamm einzuordnen sein. Die ausgewiesenen Beträge sind daher als vorläufige Werte anzusehen (Abb.13).

Sehr abbaustabile und nährstoffärmere Materialien (z. B. Bio- und Grüngutkomposte, aber auch Stroh) zeigen vergleichsweise eine geringe Nährstofffreisetzung, wodurch sie zum Humusaufbau im Boden besonders geeignet erscheinen (z. B. auf humusverarmten Flächen bzw. für Sonderkulturen). Zu bedenken ist

aber auch, dass besonders bei den Komposten und den Gärprodukten ein wesentlicher Kohlenstoffanteil nicht mehr in den Boden gelangt, weil er bereits für den ordnungsgemäßen Behandlungsprozess (z. B. Hygienisierung und Stabilisierung von Bioabfällen) oder zum Zweck der Energiegewinnung den Substraten entzogen worden ist.

Mit Hilfe der Verwendung von Nutzwert- und Vorsorgeindizes kann die Qualität unterschiedlicher Dünge- und Bodenverbesserungsmittel hinsichtlich dem Wert an Nährstoffen, Bodenverbesserung, Humusproduktion sowie den Schadstoffgehalten besser miteinander verglichen werden (BGK, 2013; KEHRES, 2013). Bei der Auswahl eines entsprechenden Düngers sollten neben betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten auch diese Zusammenhänge berücksichtigt werden, wenn die Einrichtung eines entsprechenden Betriebszweiges ansteht, ein Zukauf erfolgen muss oder lange Wegstrecken zu den Ackerflächen anzurechnen sind.

3 Möglichkeiten zur Einschätzung der Humusversorgung

Zur Bestimmung der Humusversorgung können Methoden der Bodenuntersuchung und der Humusbilanzierung angewendet werden.

Bodenuntersuchung

Durch die Bodenuntersuchung auf den Gehalt an Kohlenstoff (C_{org}) und Stickstoff (N) sowie das C/N-Verhältnis des Bodens werden Informationen über die allgemeine Höhe der Humusgehalte und der -qualität des Standortes vermittelt. Die Bodenproben können im Rahmen der Probenahme zur Grunddüngung durchgeführt werden. An gut verteilten repräsentativen Stellen werden je Schlag ca. 20 Proben mit einem Bohrstock bis 20 cm (Ackerland) bzw. 10 cm Bodentiefe (Grünland) (vor einer organischen Düngung) im Frühjahr oder im Herbst nach der Ernte gezogen, getrocknet, gemischt und mit einem Probenzettel an ein anerkanntes Labor eingeschickt. Die Probenahme zur Humusbestimmung sollte möglichst sorgfältig, im Abstand von 3 – 6 Jahren jeweils zum gleichen Zeitpunkt und, wenn möglich, auch an denselben vorher markierten Stellen der Ackerschläge durchgeführt werden.

Bestimmungsmethoden für Kohlenstoff:

- Elementaranalyse (trockene Veraschung, DIN ISO 10964, VDLUFA, 2012)
- Bestimmung des Glühverlustes (DIN ISO 19684 Teil 3) für Böden mit über 80 % Sand.

Der Kohlenstoff ist der wichtigste Bestandteil der organischen Bodensubstanz. Er kommt im Boden auch in anorganischer Form als Carbonat vor, überwiegend als Calcit und Dolomit ($C_{carbonat}$). Die Dumas-Methode (Verbrennung mit Sauerstoff bei 1000 °C) ermöglicht eine quantitative und schnelle Erfassung des Gesamt-Kohlenstoffs (C_t) im Boden. Allgemein gilt folgende Gleichung 2:

$$C_t = C_{org} + C_{carbonat} \quad \text{GL 2}$$

Auf Grund hoher Schwankungen sollte der Carbonatgehalt bei Böden mit pH-Werten > 7 ($CaCO_3$ -Gehalt > 3%) immer mit untersucht werden. Der C_{org} -Gehalt carbonathaltiger Böden wird dann nach der Bestimmung von C_t und $C_{carbonat}$ per Differenz berechnet (Gleichung 3):

$$C_{org} = C_t - C_{carbonat} \quad \text{GL 3}$$

Der Kohlenstoffanteil im Humus beträgt in weiten Grenzen im Durchschnitt 58 %. Im Allgemeinen wird mit folgender Gleichung 4 umgerechnet:

$$C_{org}\text{-Gehalt} \times 1,724 \text{ (Schwankungsbreite: 1,4 – 3,3)} = \text{Humusgehalt (gemessen in \% der TM des Bodens)} \quad \text{GL 4}$$

Unter Kenntnis der Trockenrohddichte (und des Steinanteils) kann die Humusmenge für ein definiertes Bodenvolumen nach folgender Gleichung 5 berechnet werden (Humusgehalt 2 %; spezifisches Gewicht 1,5 g/cm³ Boden; 0,30 m Bodenkrume):

$$\text{Humusmenge (t/ha)} = \text{Volumen Bodenkrume (m}^3\text{)} \times \text{spezif. Gewicht (g/cm}^3\text{)} \times \text{Humusgehalt (\% TM)}$$

$$90 = 100 \times 100 \times 0,30 \times 1,5 \times 2,0/100 \quad \text{GL 5}$$

In Ackerböden kommt der Stickstoff überwiegend in organischer Form hauptsächlich in Proteinen und Peptiden vor. Der Anteil des anorganischen Stickstoffs (N_{min}) - im wesentlichen Nitrat (NO_3 -N) + Ammonium (NH_4 -N) - ist in der Ackerkrume im Allgemeinen kleiner als 5 % der Gesamt-N-Menge im Boden. Der Gesamt-Stickstoff (N_t) wird simultan dem C_t -Gehalt mittels der Dumas-Methode bestimmt, er ist in der Regel ein guter Indikator für N_{org} in der Ackerkrume und wird nach folgender Gleichung 6 bestimmt:

$$N_t = N_{org} + N_{min} \quad \text{GL 6}$$

Das C_{org}/N_t -Verhältnis ($N_t = 1$) ist ein klassischer Indikator für die Qualität der organischen Materialien und für die Stickstoffverfügbarkeit (siehe Abb.10 u. Abb.12). Je enger das C/N-Verhältnis ist, umso schneller erfolgt der mikrobielle Abbau der zugeführten organischen Primärschubstanz (OPS). Ab C/N-Verhältnissen von >20 ist mit dem Umsatz eine zunehmende Festlegung an N verbunden. Das C/N-Verhältnis ist auch ein Maß für den Abbau-grad der organischen Bodensubstanz (OBS). Mit fortschreitendem Abbau werden die organischen Materialien, deren C/N-Verhältnisse je nach organischem Düngemittel, Pflanzenart, -teil und -alter, in einem weiten Bereich (<10 – >100) variieren können, mikrobiell abgebaut. Hierbei dienen die Kohlenhydrate zur

Energiegewinnung, Stickstoff und die anderen Nährstoffe werden zum Substanzaufbau der Mikroorganismen verwendet. Durch die mit dem Umsatz verbundene Freisetzung von Kohlendioxid und die Bildung von mikrobieller Biomasse (C/N ca. 6–10) wird das C/N-Verhältnis der OBS verringert. Es nähert sich allmählich durchschnittlichen Werten zwischen 9–12 an, die in vielen landwirtschaftlich genutzten Böden vorkommen (Schwankungsbreite: 6,6–30,0). Das C/N-Verhältnis der Böden kann auch zur orientierenden Einschätzung der Umsatzgeschwindigkeit herangezogen werden: Je enger das Verhältnis ist, umso schneller ist offenbar der Humusumsatz.

Standort- und bewirtschaftungstypische Heterogenität

Die Messfehler sind auch bei sorgfältiger Probenahme für die Humus-Bestimmung mit etwa 0,1 % C_{org} und 0,01 % N_t anzusetzen (KÖRSCHENS & SPITZL, 1978; KÖRSCHENS, 2010). Bei hoher Heterogenität des Bodens und Beachtung der erheblichen zeitlichen Variabilität der Werte kann dieser Fehler auch doppelt so hoch liegen. Auf ein und demselben Schlag können hierbei nicht selten Differenzen von weit mehr als 0,5 % C_{org} gefunden werden. Durch die Bodenuntersuchung wird Kenntnis über die konkreten Gehalte an Humus auf den Ackerflächen erlangt. Über die Zusammenfassung von Untersuchungen vieler Ackerflächen kön-

nen dann die mittleren Gehalte und die Schwankungsbreite der C_{org}-Werte eines Anbaugesbietes bestimmt werden (Tab. 2). Im Prinzip nehmen mit steigenden Tongehalten die mittleren C_{org}-Gehalte zu. Unter bestimmten Standortbedingungen (u. a. bei hohen Niederschlägen) können jedoch auch Sandböden hohe Humusgehalte aufweisen und schluffige Lehme können durch relativ niedrige Werte gekennzeichnet sein (vgl. Abb. 9). Insgesamt ist eine enorme Spannweite der vorkommenden Werte auf allen Bodenarten zu erkennen, so dass bei Kenntnis der Bodenart nur eine grobe Zuordnung oder Einstufung der Humusgehalte für streng umgrenzte regionale Gebiete gelingen kann. Eine allgemein verbindliche Ausweisung von standort- und bewirtschaftungstypischen C_{org}-Gehalten für definierte Bodenarten scheint auf Grund dieser enormen Heterogenität der Humusgehalte nur als Orientierungswerte möglich zu sein. Da bei kontinuierlicher Ackernutzung der Einfluss von Bewirtschaftungsmaßnahmen auf den Humusgehalt insgesamt auf wenige Zehntel Prozentpunkte begrenzt ist, liegen die jährlich zu erwartenden Änderungen der Humusgehalte dann meistens unter 0,01 % C_{org}. Relevante Veränderungen in der Bodenfruchtbarkeit bewegen sich daher auf einem sehr niedrigen Niveau. Auch bei jährlichen Analysen kann auf Grund der hohen Schwankungsbreite und relativ langsamen Veränderung der Hu-

Tabelle 2: Mittelwerte und Schwankungsbreite der C_{org}-Gehalte (% TM) im Ap-Horizont von Ackerflächen verschiedener Anbauregionen, geordnet nach den Bodenarten

Region:	BB	BW	BY	HE	MV	NRW	SN	SN	M-EU	Mittelwert
Summe (n):	993	10513	1861	3555	460	74686	979	18272	2859	
Tongehalt (%)										
Leichte Böden (S, l'S)										
< 5	0,77 (0,56 – 1,03)	–	0,96 (0,50 – 1,99)	–	1,20 (0,24 – 7,61)	1,65 (1,25 – 2,14)	1,49 (0,61 – 3,05)	1,60	0,87 (0,30 – 4,95)	1,22 (0,58 – 3,46)
5 – 12	0,83 (0,62 – 1,15)	0,90 (0,41 – 2,38)	1,17 (0,43 – 2,85)	1,33	1,14 (0,52 – 3,82)	–	1,25 (0,73 – 2,11)	1,61	1,01 (0,28 – 5,05)	1,16 (0,50 – 2,89)
9 – 17	0,93 (0,65 – 1,29)	1,30 (0,73 – 3,69)	–	1,39	1,42 (0,24 – 10,81)	1,28 (1,10 – 1,77)	1,70 (0,58 – 4,34)	1,53	1,22 (0,23 – 4,64)	1,35 (0,59 – 4,42)
Mittlere Böden (lS, sL, uL)										
12 – 17	–	–	1,65 (0,73 – 3,84)	1,45	–	1,19 (1,02 – 1,47)	1,45 (0,67 – 3,39)	1,67	1,52 (0,49 – 9,45)	1,49 (0,73 – 4,54)
17 – 25	–	1,29 (0,84 – 3,22)	1,78 (0,85 – 4,61)	1,45	–	–	1,57 (0,61 – 4,41)	1,62	1,39 (0,52 – 5,10)	1,52 (0,71 – 4,34)
17 – 30	1,25 (0,81 – 1,90)	1,55 (0,91 – 3,31)	1,47 (0,76 – 2,91)	–	–	1,39 (1,18 – 1,70)	–	–	–	1,42 (0,92 – 2,46)
Schwere Böden (t'L, tL, IT, T)										
25 – 45	–	2,09 (1,08 – 5,10)	1,90 (0,74 – 4,50)	1,40	–	–	1,57 (0,86 – 3,32)	1,43	1,56 (0,55 – 5,50)	1,66 (0,81 – 4,61)
35 – 45	1,87 (1,40 – 2,72)	2,73 (1,27 – 4,30)	2,00 (0,94 – 4,70)	–	1,69 (1,15 – 2,32)	1,83 (1,39 – 2,37)	–	–	–	2,02 (1,23 – 3,28)
> 45	–	2,60 (1,49 – 3,60)	2,19 (1,46 – 4,03)	1,65	–	–	–	1,75	2,01 (0,60 – 5,39)	2,04 (1,18 – 4,34)

Quellen: Brandenburg (BB): LBGR (2015); Baden-Württemberg (BW): LTZ (2015); Bayern (BY): CAPRIEL (2010) Dauerbodenbeobachtungsflächen; Hessen (HE): HEYN (2013) HABIS 72 – 78; Mecklenburg-Vorpommern (MV): ANDERS (2015); Nordrhein-Westfalen (NRW): JACOBS (2013) Humusmonitoring; Sachsen (SN): KURZER (2013): Dauertestflächen, FÖRSTER (2014) BEFU-Rückmeldungen Praxis; Mitteleuropa (M-EU): KOLBE (LfJULG): 240 Dauerversuche.

musgehalte erst nach 10 oder mehr Jahren ein Trend über den Verlauf der Gehalte einigermaßen sicher erkannt werden. Als ein sinnvolles Beratungsinstrument für die landwirtschaftliche Praxis ist diese Zeitspanne jedoch als deutlich zu lang anzusehen. Auf Grund der enormen Spannweite der Humusgehalte kann von einem ermittelten Wert eines Schläges zudem nicht abgelesen werden, ob die Fläche einen ausreichenden Versorgungsgrad mit organischer Substanz aufweist oder nicht. Der Einfluss von landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsmaßnahmen auf den Humusversorgungszustand der Böden kann daher, im Gegensatz zur Nährstoffversorgung, meistens nicht direkt aus der Bodenuntersuchung unter Ableitung von Richtwerten für optimale Humusgehalte ermittelt werden. Zur Ableitung von Empfehlungen zur Humusversorgung landwirtschaftlich genutzter Ackerflächen sind Bodenuntersuchungen daher in der Regel nicht das richtige Mittel.

Humusbilanzierung

Zur Beurteilung von Bewirtschaftungsveränderungen sind in der Regel Methoden erforderlich, die im Vergleich zur Bodenuntersuchung durch eine deutlich höhere Sensibilität gekennzeichnet sind (KÖRSCHENS, 2010). Daher haben Methoden der Humusbilanzierung in letzter Zeit verstärkte Aufmerksamkeit erlangt, bei denen die Ermittlung des Versorgungsgrades mit organischer Substanz aus der Fraktion des Nährhumus im Mittelpunkt steht (vgl. Abb.1 u. Abb.14).

Zu den einfachen, beschreibenden Verfahren gehört z. B. die VDLUFA-Methode zur Humusbilanzierung (EBERTSEDER et al., 2014), deren Berechnungsgrundlagen aus mathematisch-statistischen Auswertungsarbeiten sowie von empirisch geprüften Erfahrungswerten aus einer Vielzahl von Dauerversuchen stam-

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

Abbildung 14: Das Prinzip der Humusbilanzierung (Quelle: KOLBE, 2007)

men. Unter Verwendung von Schlagkarteiaufzeichnungen können zu erwartende Veränderungen der Humusversorgung des Bodens direkt aus der Humusreproduktion mittels organischer Substanz und der aktuellen Bewirtschaftung der Ackerflächen abgeleitet werden. Mit diesen einfachen Methoden lässt sich so eine Humusbilanz nach folgender Gleichung 7 erstellen (kg HÄQ/ha u. Jahr):

$$\begin{aligned}
 &+ \text{Humifizierungsleistung humusmehrender Fruchtarten} \\
 &- \text{Humifizierungsleistung humuszehrender Fruchtarten} \\
 &+ \text{Humifizierungsleistung organischer Dünger} \\
 &= \text{Humusbilanz} \qquad \qquad \qquad \text{GL 7}
 \end{aligned}$$

Mit zunehmender Nutzung des Personal-Computers finden heute auch sog. Prozessmodelle Eingang in Praxis und Beratung. Diese Methoden bilden die fachlichen Grundlagen in Form ihrer komplexen naturwissenschaftlichen Gesetzmäßigkeiten im Zeitverlauf ab. Als Beispiel wird das Modell CCB (CANDY Carbon Balance) vorgestellt (FRANCO et al., 2011), das auf Grund einfacher Eingangsdaten zur Berechnung der C- und N-Dynamik des Bodens in Jahresschritten genutzt werden kann (Abb.15).

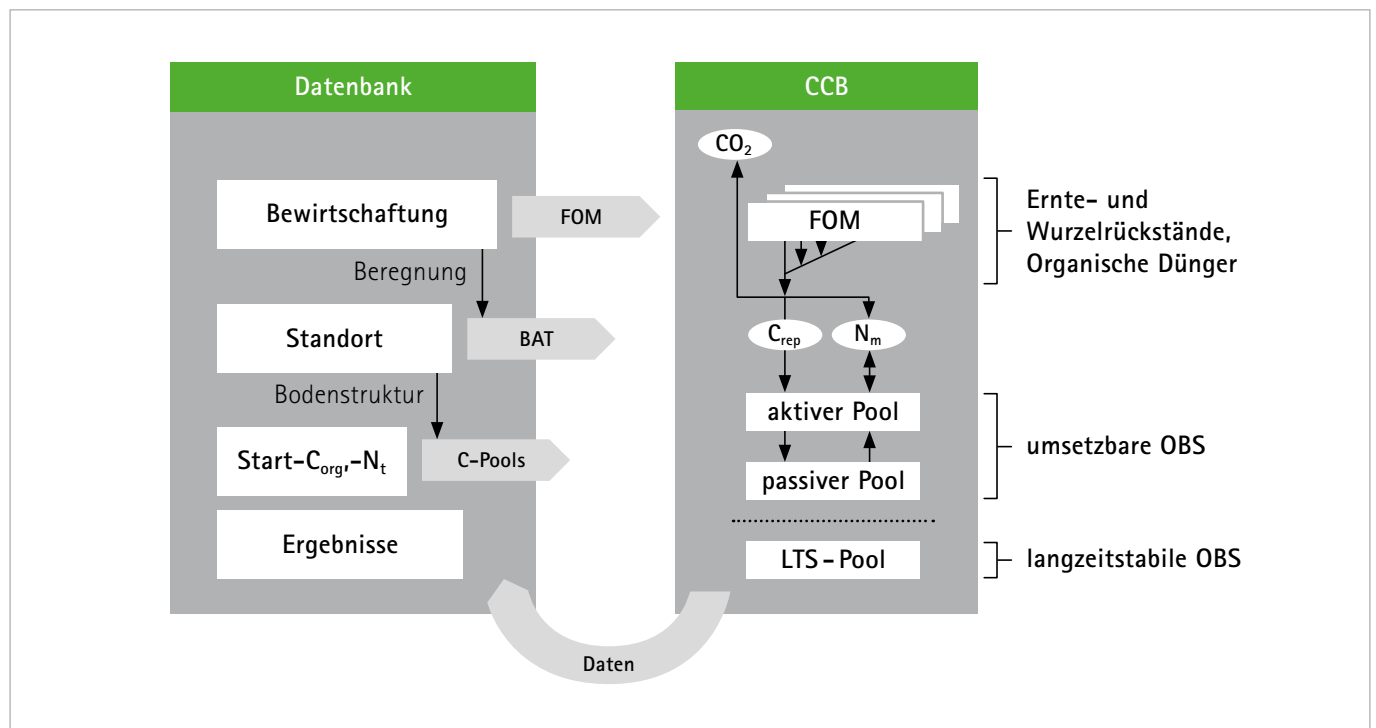


Abbildung 15: Aufbau und Funktionsweise des Prozessmodells CCB zur Berechnung der C- und N-Dynamik des Bodens (Quelle: FRANCO et al., 2011; FOM = Frische organische Masse; OBS = Organische Bodensubstanz; BAT = Biologisch aktive Zeit zur Abbildung der Umsatzbedingungen entsprechend Boden- und Klimadaten; C_{rep} = reproduktionswirksamer Kohlenstoff; N_m = mineralisierter Boden-N)

4 Vergleich geeigneter Methoden zur Humusbilanzierung

In den letzten Jahrzehnten sind einige Methoden zur Humusbilanzierung entstanden, die auf Grund ihrer verhältnismäßig einfachen Funktionsweise auch in der landwirtschaftlichen Praxis und Beratung angewendet werden können. Die Genauigkeit von Bilanzierungsmethoden ist inzwischen mehrfach an den Ergebnissen von Dauerversuchen eines großen Standortpektrums aus Mitteleuropa überprüft worden. Für eine hohe Repräsentanz der Ergebnisse war es entsprechend der standörtlichen und bewirtschaftungstypischen Variabilität erforderlich, eine Mindestanzahl von ca. 40 Versuchen mit 400 Varianten und einer Mindestdauer von 10 Jahren heranzuziehen. Unter Berücksichtigung von gesetzlichen Vorgaben und den Erfordernissen der Praxis kamen folgende Bewertungskriterien zur Anwendung:

- Genauigkeit zur Bestimmung der Entwicklung der C_{org} -Gehalte im Boden: Bewertung der Übereinstimmung zwischen berechneten Humusbilanzen in HÄQ und der C_{org} -Gehalte in Dauerversuchen
- Genauigkeit zur Erreichung optimaler Erträge der Fruchtarten: Bewertung des erreichten Ertragsniveaus aus Dauerversuchen in der VDLUFA-Versorgungsgruppe C
- Genauigkeit zur Bewertung der Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit: Bewertung der N-Bruttobilanzen aus Dauerversuchen (in den Versorgungsgruppen A/B werden N-Salden von 0 kg/ha unterschritten bzw. in Gruppen D/E werden N-Salden von 50 kg/ha überschritten)
- Anwenderfreundlichkeit: insbesondere unter den Bedingungen der landwirtschaftlichen Praxis und Beratung.

Die erhaltenen Ergebnisse weisen auf z.T. deutliche Unterschiede zwischen den aufgeführten Bilanzierungsmethoden hin. Auf Grund der dargelegten Prämissen können die Methoden in die nachfolgend aufgeführten drei Gruppen eingeteilt werden (Tab. 3).

Methoden zur quantitativen Analyse

Die **Methode CCB (CANDY Carbon Balance)** ist eine stark vereinfachte Version des wissenschaftlichen Prozessmodells CANDY. Das Verfahren befindet sich in der Testphase für eine praktische Nutzung zur Berechnung des Humusumsatzes und der N-Mineralisation (Tab. 3).

Die **standortangepasste Bilanzierungsmethode (STAND)** ist eine Weiterentwicklung der VDLUFA-Methode. Sie basiert auf einer Differenzierung der Humuskoeffizienten nach Standortfaktoren, die die Humusreproduktionsleistung beeinflussen. Dabei wird im Wesentlichen die unterschiedliche Wirkung von Bodenart, Feinanteil, C/N-Verhältnis, Temperatur und Niederschlag auf die Humifizierung berücksichtigt. Diese Parameter werden in 6 Standortgruppen (STG) ähnlich wirkender Standortfaktoren zusammengefasst und ausgewiesen. Da 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 (Tab. 3).

Einschätzung: Es handelt sich um Methoden mit halb- bis vollquantitativen Ergebnissen und deutlichen bis hohen Korrelationen zwischen den berechneten Humussalden bzw. -gehalten und den Humusgehalten des Bodens aus Dauerversuchen ($r = 0,74$). Weil Standortunterschiede berücksichtigt werden, können gesicherte Aussagen über die grundsätzliche Veränderung der Humusgehalte des Bodens getroffen werden. Die mittlere Abweichung zwischen berechneten und experimentell ermittelten Werten beträgt zwischen $-0,01\%$ (CCB) und $+0,06\%$ C_{org} (STAND), so dass bei ausgeglichenen Salden eine relativ genaue Humusreproduktion erreicht wird. Daher können bei diesen Methoden die Ergebnisse der Humusbilanzierung in Humusäquivalenten (kg HÄQ/ha) angegeben werden (STAND). Die Ergebnisse können zudem in Humusgehalte des Bodens umgerechnet werden (CCB, STAND; siehe Kap 8). Die Abschätzung von Abfuhrpotenzialen an Energiepflanzen (z. B. Silomais, Stroh, siehe Kap. 9) erfolgt standortgenau und in Versorgungsgruppe C werden optimale Erträge der Fruchtarten angestrebt.

Der Erhebungsaufwand ist für die STAND-Methode nur unbedeutend höher als bei der VDLUFA-Methode und es ist sowohl eine manuelle Nutzung als auch eine Berechnung mit Hilfe des Personalcomputers möglich:

Tabelle 3: Überblick über die Genauigkeit von Humusbilanz-Methoden (Quelle: KOLBE, 2012)

Methode (Quellen)	Korrelation zw. Modell-Ergebnis u. Feldversuch C_{org} (r)	Mittlere Abweichung bei ausgeglichenen Humussalden (= 0 kg HÄQ/ha)		Ertragsniveau in VG C	Korrelation zw. Humus- u. N-Saldo (Praxisversuche) (r)	N-Saldo bei Übergang zw. VG D/E (kg N/ha)	Standort-Anpassung Bewertung	Einschätzung Methoden-genauigkeit
		C_{org} (%)	Einschätzung Reproduktion					
CCB (FRANKO et al., 2011)	0,74***	-0,01	genau	-	-	-	ja (gut)	quantitativ
STAND (KOLBE, 2010)	0,74***	+0,06	einfache bis genau	opt	0,61	z. T. ≥ 50	ja (befriedigend)	quantitativ
VDLUFA untere Werte (KÖRSCHENS et al., 2004; EBERTSEDER et al., 2014)	0,29*	+0,02	einfache	opt (Öko: linear - opt)	0,57	≤ 50	nein	halb-quantitativ
VDLUFA mittlere Werte (KÖRSCHENS et al., 2004; EBERTSEDER et al., 2014)	0,27*	+0,13	erweitert	max (opt = VG B)	0,54	≥ 50	nein	halb-quantitativ
VDLUFA obere Werte (EBERTSEDER et al., 2014)	ca. 0,22 ^{n.s.}	+0,20 bis +0,28	stark erweitert	max	0,54	ca. 100	nein	nicht quantitativ
REPRO-stat (LEITHOLD, et al., 1997)	0,22 ^{n.s.}	+0,14 (Öko: +0,28)	erweitert (Öko: stark erweitert)	max	0,54	ca. 100	nein	nicht quantitativ
REPRO-dyn (HÜLSBERGEN, 2003)	ca. 0,19 ^{n.s.}	ca. +0,18	stark erweitert	max	0,52	z. T. ≥ 100	ja (unzureichend)	nicht quantitativ

Bewertung Korrelationskoeffizient (r): $\leq 0,25$: keine – schwache Beziehung; 0,25 – 0,50: schwache – mäßige Beziehung; 0,50 – 0,75: deutliche bis gute Beziehung; $\geq 0,75$: sehr hohe u. enge Beziehung; opt = Optimaler Ertrag; max = Ertragsmaximum; Öko = ökologischer Landbau; VG = VDLUFA-Versorgungsgruppe; Signifikanzniveau: ^{n.s.} = nicht signifikant; * = 5 %; ** = 1 %; *** = 0,1 %.

- Internetquelle für die STAND-Methode: <http://orgprints.org/13626>; www.landwirtschaft.sachsen.de/befu/

Der Erhebungsaufwand zur Nutzung des CCB ist etwas höher. Zusätzlich sind Angaben zum Tongehalt des Bodens sowie Witterungsdaten erforderlich. Das Verfahren kann nur mit Hilfe des Personalcomputers genutzt werden:

- Internetquelle für die CCB-Methode: www.ufz.de/index.php?de=13999

Methoden zur halbquantitativen Analyse

Mit der **VDLUFA-Methode** wird ein Saldo aus dem Humusverlust bzw. dem -reproduktionsbedarf (Anbau humuszehrender Kulturarten) und der Humuszufuhr bzw. der -reproduktionsleistung (Anbau humusmehrender Kulturarten, organische Düngung) errechnet. Die Humuswirkung der angebauten Fruchtarten und der zugeführten organischen Materialien werden in Form von Koeffizienten erfasst. Bei den Fruchtartenkoeffizienten kann mit den unteren, mittleren oder/und den oberen Werten der Methode gerechnet werden (Tab. 3).

Einschätzung: Mit dieser Methode werden halb-quantitative Ergebnisse mit mäßig hohen Korrelationen ($r = 0,27 - 0,29$) zwischen berechneten Humussalden und experimentell ermittelten Humusgehalten erlangt (obere Werte: siehe nächstes Kapitel). Es können keine Aussagen über die Veränderung der Bodenhumus-

gehalte getroffen werden. Standortunterschiede werden nicht berücksichtigt, was erheblich zur statistischen Streuung der Ergebnisse beiträgt. Bei Verwendung der **unteren Werte der Koeffizienten** wird im Durchschnitt eine geringe Abweichung zwischen berechneten und experimentell ermittelten Werten von +0,02 % C_{org} ermittelt. Bei ausgeglichenen Salden werden somit eine weitgehend einfache Humusreproduktion und ein annähernd optimales Ertragsniveau erreicht. Dagegen erfolgt eine relativ unsichere Ermittlung von Abfuhrpotenzialen (von z. B. Stroh, Kap.9) mit der Tendenz zu einer Überschätzung auf Standorten, die durch einen hohen Humusumsatz gekennzeichnet sind. Werden bei Anwendung der **mittleren Werte der Fruchtartenkoeffizienten** ausgeglichene Salden berechnet, so beträgt die mittlere Differenz zwischen berechneten und aus Dauerversuchen experimentell ermittelten Werten um +0,13 % C_{org} (= erweiterte Humusreproduktion). Hierdurch kommt es zu einer Unterschätzung von Abfuhrpotenzialen und es werden in Versorgungsgruppe C bereits weitgehend maximale Erträge erzielt.

Mit der VDLUFA-Methode können orientierende bis halb-quantitative Ergebnisse über den Versorgungsgrad mit organischer Substanz ermittelt werden. Die quantitative Abschätzung von Veränderungen der Boden-Humusvorräte wird nicht angestrebt. Die Ergebnisse werden daher dimensionslos als Humusäquivalente (HÄQ/ha) ausgewiesen. Der Erhebungsaufwand ist gering: Fruchtart (Ertrag Hauptprodukt zur Berechnung des Ertrags an Nebenprodukt, z. B. Stroh) bzw. Ertrag Nebenprodukt, Frucht-

folge inkl. Zwischenfrüchte, Art und Menge an organischen Düngemitteln. Durch Nutzung des Verfahrens ist ein rascher Überblick über den mittleren Versorgungsgrad mit organischer Substanz möglich. Die Methode kann für manuelle Berechnungen und unter Nutzung des Personalcomputers verwendet werden. Internetquellen für die VDLUFA-Methode:

- www.vdlufa.de/index.php?option=com_content&view=article&id=21&Itemid=37,
- <http://orgprints.org/13626>;
- www.landwirtschaft.sachsen.de/befu/
- www.lfl.bayern.de/iab/boden/45108/
- www.dlr.rlp.de/Internet/global/themen.nsf/ALL/D8F724E7D82518DFC12570980052AC4B?OpenDocument

Methoden mit geringer Genauigkeit

VDLUFA-Methode obere Werte der Koeffizienten, REPRO bei Anwendung dynamischer oder statischer Koeffizienten. Einschätzung (Tab. 3): Nach den bisher zur Verfügung stehenden Analysen handelt es sich um Methoden mit nur schwachen Korrelationen zwischen den berechneten Humussalden und den Humusgehalten des Bodens aus Dauerversuchen ($r = 0,19 - 0,22$). 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). Mit diesen Methoden berechnete ausgeglichene Salden weisen im Vergleich zu Ergebnissen aus Dauerversuchen im Durchschnitt eine stark erweiterte Humusproduktion auf (+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 ungenau abgebildet bzw. können nicht berücksichtigt werden. Die Verfahren sind geeignet zur raschen Aufdüngung unterversorgter Böden und zum Zweck der Melioration. Die Methoden können in der Regel unter Nutzung des Personalcomputers oder im Rahmen einer kostenpflichtigen Dienstleistung, z. B. in Form des DLG-Nachhaltigkeitsstandards, genutzt werden:

- www.vdlufa.de/index.php?option=com_content&view=article&id=21&Itemid=37
- Internetquelle REPRO:
www.nachhaltige-landbewirtschaftung.de

5 Anforderungen an das Datenmaterial für die Humusbilanzierung

Bezugsebene Schlag, Betrieb, Region

Für fast alle in Kapitel 5 beschriebenen Methoden können die zur Berechnung von Humusbilanzen auf Betriebsebene erforderlichen Angaben in der Regel aus Schlagkarteiaufzeichnungen entnommen werden. Auf Schlagebene erfolgt die Auswahl der Fruchtarten (der Fruchtfolge), die Festlegung des mittleren Ertragsniveaus der Fruchtarten sowie der anfallenden Koppelprodukte (Stroh-, Blattmenge) mit Hilfe der Hauptprodukt-/Nebenprodukt-Verhältnisse (z. B. Korn-/Stroh-Verhältnis bei Getreidearten). Danach erfolgt die Auswahl der Art und Menge der verabreichten organischen Düngung. Für einige Verfahren (STAND, CCB) sind zusätzliche Angaben über die Bodenarten und die Körnung des Bodens sowie das C/N-Verhältnis der Böden und die klimatische Einstufung (Niederschläge, Lufttemperatur, Höhenlage) erforderlich. Die auf Schlagebene erfassten Merkmale können in Form der aggregierten Schlagbilanz als gewichtete Mittelwerte zu einer Betriebsbilanz oder auch zu Mittelwerten mehrerer Betriebe zusammengeführt werden.

Bei der Bilanzierung ganzer Regionen (Landkreise) oder im Durchschnitt eines Landes können die meisten erforderlichen Daten aus den statistischen Jahrbüchern über die Ackerflächen, angebauten Fruchtarten und Fruchtartenerträgen, der Tierbesatz zur Ermittlung der anfallenden Düngemittel, etc., erhoben werden. Weitere Datenquellen können heute oft auch aus digital verfügbaren Flächennachweisen, Bodenkarten etc. entnommen werden.

Zuordnung von Nutzungsarten/Nutzungscode der Agrarförderung zu den Fruchtartengruppen der Humusbilanzierung

Bei der Erstellung von Humusbilanzen kann es zu Problemen bei der ordnungsgemäßen Zuordnung der Kulturarten aus dem Flächennutzungsnachweis der einzelbetrieblichen Antragsstellung auf Agrarförderung mit den Fruchtartengruppen der Humusbilanzierung kommen. Aus diesem Grund wird nachfolgend eine entsprechende Zuordnung vorgestellt, damit eine korrekte Anwendung der Kennzahlen zur fruchtartenspezifischen Veränderung des Humusvorrates erfolgen kann (Tab. 4).

Zu beachten ist, dass die Fruchtartengruppe Getreide ausschließlich den Getreideanbau zur Körnernutzung umfasst. Die Unterteilung von Sonnenblumen, Öl- und Faserpflanzen sowie Körner- und Silomais ist in den Humusbedarfsfaktoren zur Humusbilanzierung begründet, die bei Sonnenblumen und Silomais die Humuszufuhr von Koppelprodukten berücksichtigt, bei Öl- und Faserpflanzen sowie Körnermais dagegen nicht.

Die Fruchtartengruppen von mehrjährigem Feldfutter und Brache sind für die Auswahl der zutreffenden Kennzahl der Humusmehrung weiter zu unterteilen. So ist für mehrjähriges Feldfutter die Kenntnis vom Anbau in einem Ansaat- (Frühjahrsblanksaat, Gründeckfrucht, Untersaat bzw. Sommerblanksaat) oder Hauptnutzungsjahr und bei Brache die Kenntnis der Begrünungsart (Selbstbegrünung ab Herbst oder ab Frühjahr des Brachejahres, gezielte Begrünung ab Sommer der Brachlegung inkl. des folgenden Brachejahres oder ab Frühjahr des Brachejahres) notwendig. Über diese Informationen verfügt allein der Flächenbewirtschafter, sie können der Antragstellung auf Agrarförderung nicht entnommen werden. Dies traf bis zum Jahr 2014 auch auf den Anbau von Zwischenfrüchten (Winterzwischenfrüchte, Stoppelfrüchte, Untersaaten) zu, es sei denn, es wurde an länderspezifischen Förderprogrammen, wie z. B. Winterbegrünung durch Zwischenfrüchte und Untersaaten im Rahmen von KULAP-Maßnahmen, teilgenommen. Ab dem Jahr 2015 können diese Informationen den Angaben zu den ökologischen Vorrangflächen (OVF) der Antragsstellung auf Agrarförderung entnommen werden:

- Humusbilanzierung Winterzwischenfrüchte: Code 2 (= Zwischenfrucht/Gründecke)
- Humusbilanzierung Untersaaten: Code 3 (= Untersaat).

Tabelle 4: Zuordnung von Nutzungsarten und Nutzungscodes aus der betrieblichen Antragstellung auf Agrarförderung zu den Fruchtartengruppen der Humusbilanzierung (Quelle: ZIMMER, LELF)

Fruchtartengruppe Humusbilanzierung	Nutzungsnachweis gemäß Feldblockkataster der Anlage 1 des Antrags auf Agrarförderung		
	Nutzungsart	Code für Nutzung (NC)	
		ab 2015	bis 2014
Getreide (Körnernutzung)	Winterhartweizen/Durum	112	
	Sommerhartweizen/Durum	113	113
	Hartweizen (Durum)		114
	Winter-Dinkel	114	
	Dinkel		115
	Winterweichweizen	115	
	Winterweizen (ohne Durum)		116
	Sommerweichweizen	116	
	Winter-Emmer/-Einkorn	118	
	Sommer-Emmer/-Einkorn	119	
	Sommerweizen (ohne Durum)		
	Roggen		120
	Winterroggen	121	121
	Sommerroggen	122	122
	Wintermenggetreide	125	125
	Wintermengetreide ohne Weizen	126	
	Wintergerste	131	131
	Sommergerste	132	132
	Hafer		140
	Winterhafer	142	142
	Sommerhafer	143	143
	Sommermenggetreide	144	145
	Sommermenggetreide ohne Weizen	145	
	Triticale		155
	Wintertriticale	156	156
	Sommertriticale	157	157
	Buchweizen	182	182
Getreide einer Gattung/Art, die in der aktuelle Liste nicht aufgeführt ist	190	190	
Alle anderen Getreidearten			
Körnermais	Körnermais und CCM	171	
	Körnermais		171
	Corn Cob Mix		172
Silomais	Mais für Biogas	172	
	Silomais (als Hauptfutter)	411	411

Tabelle 4: Fortsetzung

Fruchtartengruppe Humusbilanzierung	Nutzungsnachweis gemäß Feldblockkataster der Anlage 1 des Antrags auf Agrarförderung		
	Nutzungsart	Code für Nutzung (NC)	
		ab 2015	bis 2014
Körnerleguminosen	Erbsen (Erbsen, Markerbse, Schälerbse, Zuckerbse)	210	
	Erbsen zur Körnergewinnung		210
	Ackerbohne/Puffbohne//Pferdebohne/Dicke Bohne	220	
	Acker-, Puff- und Pferdebohnen zur Körnergewinnung		220
	Wicken (Pannonische, Zottelwicke, Saatwicke)	221	
	Wicken (auch Saatwicken)		291
	Lupinen (Süßlupinen, weiße Lupine, blaue (schmalblättrige) Lupine, gelbe Lupine, andere Lupinen)	230	
	Süßlupinen zur Körnergewinnung		230
	Erbsen/Bohnen	240	
	Erbsen/Bohnen zur Körnergewinnung		240
	Hülsenfrucht einer Gattung/Art, die in der aktuellen Liste nicht aufgeführt ist	290	
	Alle anderen Hülsenfrüchte zur Körnergewinnung		290
Öl- und Faserpflanzen	Winterraps (00) zur Körnergewinnung	311	311
	Sommerraps (00) zur Körnergewinnung	312	312
	Winterrüben zur Körnergewinnung	315	315
	Sommerrüben zur Körnergewinnung	316	316
	Sojabohnen zur Körnergewinnung	330	330
	Öllein zur Körnergewinnung		341
	Lein (Gemeiner Lein, Flachs)	341	
	Faserflachs		342
	Ölfrucht einer Gattung/Art, die in der aktuellen Liste nicht aufgeführt ist	390	
	Alle anderen Ölfrüchte		390
Sonnenblumen	Sonnenblumen	320	320
Zucker- und Futterrüben	Futterhackfrüchte		412
	Futterrübe/Runkelrübe	413	
	Runkel-Futterrüben		413
	Kohl-Steckrüben	414	414
	Zuckerrüben	603	620
	(Beta-)Rübensamenvermehrung	911	
	Alle anderen Hackfrüchte		690
Mehrjähriges Feldfutter	Klee (stickstoffbindende Pflanze/ÖVF)	421	
	Klee		421
	Kleegras	422	422
	Luzernegras	423	423
	Ackergras	424	424
	Klee-Luzerne-Gemisch	425	
	Klee (nicht stickstoffbindende Pflanze/nicht ÖVF, z. B. Bockshornklee)	426	
	Grassamenvermehrung	912	912
	Leguminosensamenvermehrung	913	913
	Futterpflanze einer Gattung/Art, die in der aktuellen Liste nicht aufgeführt ist	429, 430	
	Alle anderen Futterpflanzen		429

Tabelle 4: Fortsetzung

Fruchtartengruppe Humusbilanzierung	Nutzungsnachweis gemäß Feldblockkataster der Anlage 1 des Antrags auf Agrarförderung		
	Nutzungsart	Code für Nutzung (NC)	
		ab 2015	bis 2014
Brache	Stilllegung nach FELEG/GAL/ALG	545	
	Stilllegung nach FELEG		545
	Stilllegung für Naturschutz und Landschaftspflege (5-Jahresprogramme)	549	
	nach Art. 22 bis 24 der VO (EG) Nr. 1257/99 stillgelegte Ackerfläche	563	563
	Grünbrache 1-jährig	581	
	Grünbrache 2-jährig	582	
	Ackerland aus der Erzeugung genommen	591	591
Kartoffeln	Stärkekartoffeln	601	616, 640 – 642
	Speisekartoffeln	602	
	Frühkartoffeln		611
	sonstige Speisekartoffeln (mittelfrühe und späte)		612
	Industriekartoffeln (außer Stärkekartoffeln)		613
	Futterkartoffeln		614
	Pflanzkartoffeln	006	615
	Stärkekartoffeln		616, 640 – 642
	sonstige Kartoffeln		619
	Topinambur	604	630
Sonderkulturen Gruppe I	Gemüserüben	612	
	Gemüsekohl (sofern Blumenkohl, Brokkoli, Rotkohl, Weißkohl, Wirsingkohl)	613	
	Blumenkohl (Freiland)		712
	Tomaten	622	
	Tomaten (Freiland)		713
	Gemüse-Kürbisgewächse, Riesenkürbis, Gartenkürbis	626, 629, 630	
	Salatgurke (Gurke, Salatgurke, Einlegegurke)	627	
	Zuckermelone (cucumis melo), Melone (Citrullus)	628, 631	
	Sellerie (Knollen-Sellerie, Bleich-Sellerie, Stangen-Sellerie)	641	
	Rharbarber	851	892
Sonderkulturen Gruppe II	Steckrübe, Kohlrübe	620	
	Auberginen	623	
	Spanischer Pfeffer (Paprika, Chilli, Peperoni)	624	
	Allium/Lauch (sofern Knoblauch)	633	
	Möhre/Karotte, Futtermöhre	634	
	Passtinake	643	
	Meerrettich, Schwarzwurzeln	646, 647	
	Zuckermais		174
	Ringelblumen (Garten-Ringelblume), Sonnenhut (schmalblättriger Sonnenhut, Purpur-Sonnenhut), Kamillen (Echte Kamille)	674, 675, 678	
	Malve (Wilde Malve)	686	
	Goldlack	721	

Tabelle 4: Fortsetzung

Fruchtartengruppe Humusbilanzierung	Nutzungsnachweis gemäß Feldblockkataster der Anlage 1 des Antrags auf Agrarförderung		
	Nutzungsart	Code für Nutzung (NC)	
		ab 2015	bis 2014
Sonderkulturen Gruppe III	Gemüsekohlrabi (sofern Grünkohl, Kohlrabi, Kopfkohl, Spitzkohl, Markstammkohl, Rosenkohl, Zierkohl)	613	
	Gartenrettiche (Weiße/Rote Rettiche, schwarzer Winterrettich, Ölrettich, Radieschen)	618	
	Allium/Lauch (sofern Schnittlauch, Zwiebel, Schalotte, Lauch)	633	
	Gartenbohne (Garten-, Busch-, Stangen-, Feuer-, Prunkbohne)	635	
	Feldsalate (Feldsalat, Ackersalat, Rapunzel)	636	
	Lattich (Garten-Salat/Lattich, Lollo Rosso, Romana-Salat/Römischer Salat)	637	
	Spinat, Mangold, Rote Beete, Rote Rübe	638, 639	
	Zichorien/Wegwarten (Chicoree, Radiccio, krausblättrige Endivie, ganzblättrige Endivie, Zichorie)	644	
	Kichererbsen	645	
	Fenchel (Gemüsefenchel, Körnerfenchel)	648	
	Anethum (Dill, Gurkenkraut)	651	
	Bibernellen (Anis)	653	
	Kümmel (Echter Kümmel), Kreuzkümmel (Echter Kreuzkümmel)	654, 655	
	Schwarzkümmel (Echter Schwarzkümmel, Jungfer im Grünen)	656	
	Liebstöckel/Maggikraut	658	
	Petroselinum (Petersilie)	659	
	Salbei (Küchen-, Heilsalbei, Buntschopf-Salbei)	662	
	Borretsch	663	
	Oregano (Echter Majoran, Oregano/Dost/Wilder Majoran)	664	
	Bohnenkräuter	665	
	Thymiane (Thymian, Gartenthymian, Echter Thymian)	669	
	Melissen (Zitronenmelisse), Minzen (Pfefferminze, Grüne Minze)	670, 672	
	Artemisia (Wermut, Estragon, Beifuß)	673	
	Wegerichte (Spitzwegerich)	676	
	Schafgarben (Gelbe Schafgarbe)	678	
	Baldriane (Echter Baldrian)	679	
	Johanniskräuter (Echtes Johanniskraut)	680	
	Engelwurz (Arznei-Engelwurz, Echter Engelwurz)	685	
	Faserhanf	701	
	Hanf		
	Virginischer Tabak	705	793
	Tabak		
Erdbeeren	707	760	
Erdbeeren (Freiland)			
Brennnesseln (Große Brennnessel)	709	723	
Wucherblumen (Mutterkraut)	740		
Nachtkerzen	762		
Kornblumen	775		
Hopfen, Aromahopfen, Bitterhopfen	856, 857, 858		

Als Empfehlung erfolgt die Zuordnung weiterer Kulturarten in Tabelle 5. Der fruchtartenspezifische Humusbedarf von Getreide mit Nutzung als Ganzpflanze und von ‚neuen Energiepflanzen‘ wie Sudangras etc. ist gegenwärtig nicht bekannt. Auf Grund der zunehmenden Anbaubedeutung wird dennoch eine erste orientierende Einschätzung vorgenommen und mit der Benennung von zwei neuen Fruchtartengruppen zur Humusbilanzierung ausgewiesen.

Der Humusbedarf von Getreide mit Ganzpflanzennutzung ist dem Humusbedarf von Getreide zur Körnernutzung gleichzusetzen. Lediglich bei sehr früher Ernte (bis Mitte April), z. B. bei Anbau von Grünfütterroggen, kann als Orientierungswert die Differenz aus der Kennzahl des Humusbedarfs von Getreide minus der Kennzahl für die positive Humuswirkung einer Winterzwischenfrucht angesetzt werden. Ein ähnliches Vorgehen wird für die Ermittlung eines vorläufigen Orientierungswertes für den Humusbedarf von Sorghum durch Mittelwertbildung der beiden Kennzahlen für den Humusbedarf von Silomais und Getreide empfohlen. Bis neuere Erkenntnisse vorliegen wird unterstellt, dass der Humusbedarf von Sorghum im Vergleich zu Silomais auf Grund höheren Wurzelwachstums etwas geringer ist.

Bis zum Jahr 2014 sind Silo- bzw. Körnermaisflächen mit Bejaugungsschneisen bei der Humusbilanzierung als einheitlich mit Silo- bzw. Körnermais bestellt anzusehen. Sofern für den Mischanbau von Silomais und Sonnenblumen keine näheren Anbauinformationen vorliegen, sollte die Zuordnung zur Fruchtartengruppe Silomais erfolgen. Andernfalls kann hier die Ableitung der Kennzahl für den Humusbedarf entsprechend dem Silomais-Sonnenblumen-Verhältnis im Bestand erfolgen. Sofern nicht in Tabelle 4 enthalten, sollte die Zuordnung von Freilandgemüse, Heil-, Duft- und Gewürzpflanzen, Küchenkräutern und anderen Handelsgewächsen wie vorgeschlagen pauschal erfolgen. Es ob-

liegt dem Flächenbewirtschafter hier entsprechend der im Feld stehenden Kultur weitere Konkretisierungen vorzunehmen.

Der in der Landbaupraxis zunehmende Zweitfruchtanbau bleibt in der einzelbetrieblichen Antragstellung auf Agrarförderung unberücksichtigt, da hier lediglich die Hauptanbaukulturen eines Antragsjahres zu dokumentieren sind. Zur Humusbilanzierung ist dagegen der Humusbedarf der Hauptfrucht (z. B. bei Triticale mit Ganzpflanzennutzung Kennzahl Humusbedarf Getreide) und der Humusbedarf der Zweitfrucht (z. B. bei Zweitfrucht-Silomais Kennzahl Humusbedarf Silomais) jeweils separat zu bewerten und deren Summe (Kennzahl Humusbedarf Getreide plus Kennzahl Humusbedarf Silomais) als Gesamt-Humusbedarf im Anbaujahr anzusetzen. Ausnahme bildet auch hier eine sehr frühe Getreide-Ganzpflanzenernte bis Mitte April (Kennzahl Humusbedarf Getreide minus Kennzahl der positiven Humuswirkung einer Zwischenfrucht plus Kennzahl Humusbedarf Silomais).

Zu beachten ist, dass eine Anzahl an Kulturarten der Antragstellung auf Agrarförderung nicht bei der Humusbilanzierung berücksichtigt werden können. Die Ursache hierfür ist, dass die Humusbilanzierung auf fachlicher Grundlage ausschließlich für Ackerflächen mit tatsächlicher ackerbaulicher Bodennutzung anzuwenden ist. Ausgenommen sind daher u. a. Grünland, Aufforstungsflächen, nicht landwirtschaftlich genutzte Flächen, Anbau unter Glas oder Folie bzw. in Gebäuden, Weihnachtsbäume, Biotop ohne landwirtschaftliche Nutzung sowie unkultivierte Heideflächen. Keine gesicherten Erkenntnisse liegen u. a. für Zierpflanzen, Obstbau, Rebflächen, Hanf, Rollrasen, schnellwüchsige Forstgehölze < 20 Jahre (KUP), Blühstreifen bzw. Uferrandstreifen, Spargel, Chinaschilf/Miscanthus, Mohn (Schlafmohn/Backmohn), Silphium (Durchwachsene Silphie, Becherpflanze), Igniscum, Färberdisteln vor. Eine Berücksichtigung bei der Humusbilanzierung kann daher nicht empfohlen werden.

Tabelle 5: Zuordnung von Nutzungsarten und Nutzungscodes aus der betrieblichen Antragstellung auf Agrarförderung zu den Fruchtartengruppen der Humusbilanzierung (Quelle: ZIMMER, LELF)

Fruchtartengruppe Humusbilanzierung	Nutzungsnachweis gemäß Feldblockkataster der Anlage 1 des Antrags auf Agrarförderung		
	Nutzungsart	Code für Nutzung (NC)	
		ab 2015	bis 2014
Getreide (Ganzpflanzennutzung)		115 – 190	121 – 190
Sorghum	Rispenhirse (Panicum)	181	
	Hirse		181
	Sorghumhirse (Körnersorghum)	183	
	Körnersorghum		183
	Sudangras	803	980
Getreide ¹⁾	Gemenge Erbsen/Getreide	250	
	Gemenge Körnerleguminosen/Getreide		250
Silomais ²⁾	Mischanbau Mais/Sonnenblumen		175
Silomais bzw. Körnermais ³⁾	Mais mit Bejagungsschneise als Selbstbegrünung		176
	Mais mit Bejagungsschneise mit Anbau anderer Kulturpflanze		177
Mehrjähriges Feldfutter	Riesenweizengras/Szarvasi-Gras (Energiepflanzenverwertung)	853	
	Rohrglanzgras (Energiepflanzenverwertung)	854	
	Gründüngung im Hauptfruchtanbau (für Ausgleichszulage)	941	941

¹⁾ oder Ableitung der Kennzahl für den Humusbedarf entsprechend des Körnerleguminosen- bzw. Erbsen-Getreide-Verhältnis im Bestand

²⁾ oder Ableitung der Kennzahl für den Humusbedarf entsprechend des Silomais-Sonnenblumen-Verhältnis im Bestand

³⁾ gilt als einheitlich mit Hauptkultur bestellt

6 Erstellung einer Humusbilanz

Auswahl der Methode und der Fruchtarten-Koeffizientengruppe

Für die Erstellung von Humusbilanzen ist es zunächst erforderlich, aus tabellarischen Aufstellungen die Fruchtartenkoeffizienten-Gruppe auszusuchen.

Bei Nutzung der VDLUFA-Methode sollten im konventionellen und ökologischen Landbau (siehe Kap.11) standardmäßig die unteren Werte genutzt werden. Für bestimmte Sonderfälle (z. B. bei deutlich unterversorgten Böden, zur Rekultivierung und bei vorwiegender bis ausschließlicher organischer Düngung) können die mittleren oder die oberen Werte der Fruchtartenkoeffizienten eingesetzt werden (Tab. 6). In diesen Fällen kann es mit der Zeit zu einer deutlichen Humusanreicherung kommen (siehe Kap.10) und es sind die düngerechtlichen Vorgaben zu beachten (N-Bilanzierung).

Tabelle 6: Auswahlkriterien für die Fruchtartenkoeffizienten der VDLUFA-Methode (Quelle: nach KOLBE, 2008, erweitert)

Untere Werte zur »einfachen Reproduktion« der Humusversorgung
<ul style="list-style-type: none">■ Böden in gutem Kulturzustand■ Einsatz gering abbaustabiler und/oder nährstoffreicher OPS (z. B. Gülle, Gärprodukte, Stallmist, Klärschlamm)■ Flächen mit hoher (mineralischer) Nährstoffzufuhr■ Standorte mit geringem Humusabbau (niedrige Durchschnittstemperaturen und hohe Niederschläge, Bergstandorte, grundwasserbeeinflusste Moorböden).
Mittlere Werte zur »erweiterten Reproduktion« der Versorgung
<ul style="list-style-type: none">■ Bei angestrebtem Humusaufbau (z. B. mit Humus unterversorgte Böden)■ Einsatz abbaustabiler und nährstoffarmer OPS (z. B. Bio- und Grüngutkompost, Rindenprodukte, Mudden)■ Flächen mit niedrigerer (mineralischer) Nährstoffversorgung■ Anbauverfahren mit höherem Bedarf an organischer Substanz (z. B. Sonderkulturen, reine Hackfruchtnutzung)■ Standorte mit hohem Humusabbau (hohe Durchschnittstemperaturen, sehr aktive Lehmböden, grundwasserferne Moorböden).
Obere Werte zur »stark erweiterten Reproduktion«
<ul style="list-style-type: none">■ Humusaufbau (z. B. Böden in schlechtem Kulturzustand, Rekultivierungsflächen, Meliorationsmaßnahmen)■ Anbauverfahren mit hohem Bedarf an organischer Substanz und ohne mineralische Nährstoffversorgung (N)

Bei Nutzung der STAND-Methode ist eine Standortgruppe (STG) festzulegen, die mit den Standortgegebenheiten der Ackerfläche, des Betriebes oder der Region am besten übereinstimmt (Tab. 7). Ist man sich nicht sicher, welche Werte zu wählen sind, so können auch zwei benachbarte Gruppen ausgewählt werden. Durch die Ergebnisse werden dann zwei Werte ausgewiesen, die einen Schwankungsbereich darstellen, zwischen denen die Humusbilanzen anzusiedeln sind. Für die Auswahl der Koeffizienten der organischen Materialien (niedrig, mittel, hoch) sollten die Werte Verwendung finden, die für die verabreichte Höhe eines organischen Düngemittels im Durchschnitt der Fruchtfolge zutreffen.

Beispielsrechnungen

Am Beispiel der STAND-Methode wird der Rechengang unter Verwendung der Standortgruppe (STG) 5 (≈ vergleichbar mit den Ergebnissen der unteren Werte der VDLUFA-Methode) für den Anbau von Winterweizen erläutert (Tab. 8). Allein durch das hohe Ertragsniveau kommt es durch Belassung der Strohmenge auf dem Feld zu einem annähernd ausgeglichenen Saldo. Die Düngung mit 35 m³/ha Schweinegülle bringt nochmals 203 kg HÄQ/ha in die Bilanz ein, so dass mit insgesamt 187 kg HÄQ/ha ein Humussaldo durch den einjährigen Anbaus entsteht, der der VDLUFA-Versorgungsgruppe D zugeordnet werden kann (siehe Kap. 7).

Unter Verwendung der VDLUFA-Methode wird ein Fruchtfolgebeispiel mit vier Anbaufeldern unter Nutzung der unteren und mittleren Werte der Fruchtartenkoeffizienten dargestellt (Tab. 9). Im Vergleich zu dem vorwiegenden Anbau von negativ anzurechnenden humuszehrenden Früchten (Summe: -1.120 bzw. -1.600 HÄQ/ha) kommt es zu keinen ausgeglichen Salden, da die positiv anzurechnenden humusmehrenden Früchte inkl. Untersaat und Zwischenfrucht (Summen: +510 HÄQ/ha) einen zu geringen Umfang umfassen. Durch die zusätzliche Einbringung von Rindergülle, Stroh und Gründüngung können jedoch positive Gesamtsalden der Versorgungsstufen C – D im Durchschnitt der viergliedrigen Fruchtfolge erreicht werden.

Tabelle 7: Charakterisierung der Standortgruppen (STG) zur Humusbilanzierung bei Nutzung der STAND-Methode (Quelle: KOLBE, 2008)

STG	Bodenart, Bodentyp	Feinanteil (%) des Bodens ¹	C/N-Verhältnis des Bodens	Durchschnittstemperatur (°C)	Niederschläge (mm je Jahr)
1	■ Sand (u. a. Nord-West-D)	≤ 8	≥ ca. 14	-	-
	■ Schwarzerde	ca.17 – 30	-	-	-
	■ Ton	≥ 38	-	-	Bergregion ≥ 700, Flachland ≥ 800
	■ 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	-	-	-	-

¹= Ton + Feinschluff

Tabelle 8: Berechnung der Humusbilanz für den Anbau von Winterweizen inkl. Stroh- und Gülledüngung mit Hilfe der STAND-Methode

Standortmerkmale:	sandiger Lehm, > 8,5 °C	= STG 5
Fruchtart:	W.-Weizen mit 8,0 t/ha Kornertrag	= -280 kg HÄQ/ha
	und 6,4 t/ha Stroh × 41,3 kg HÄQ/ha	= 264 kg HÄQ/ha
Organische Düngung:	35 m³/ha Schweinegülle × 5,8 kg HÄQ/ha	= 203 kg HÄQ/ha
Summe Humusbilanz:		= 187 kg HÄQ/ha
Einstufung Versorgungsgruppe:		= D

Tabelle 9: Fruchtfolgebeispiel zur Humusbilanzierung mit der VDLUFA-Methode

Fruchtfolge	Fruchtarten		Organische Materialien			
	Untere Werte (HÄQ/ha)	mittlere Werte (HÄQ/ha)	Art	Menge (t/ha)	(HÄQ/t FM)	(HÄQ/ha)
1.Jahr: S.-Mais	-560	-800	R.-Gülle	30	9	270
Untersaat Gras	+250	+250	Gründüngung	20	8	160
2.Jahr: W.-Weizen	-280	-400	Stroh	6	100	600
3.Jahr: W.-Gerste	-280	-400	-	-	-	-
Stoppelfrucht	+100	+100	Gründüngung	15	8	120
4.Jahr: Ackerbohne	+160	+160	-	-	-	-
Summen je Fruchtfolge	-610	-1.090				+1.150
Summen je Jahr	-153	-273				+288
Inkl. organ. Materialien	+288	+288				
Humussaldo je Jahr	+135	+15				
Versorgungsstufe	D	C				

7 Interpretation und Bewertung der Ergebnisse der Humusbilanzierung

VDLUFA-Bewertungsschlüssel und Bewertungseinheit

Die Bewertung der berechneten Bilanzsalden erfolgt nach dem 5-stufigen VDLUFA-Bewertungsschlüssel. Zwischen dem konventionellen und dem ökologischen Landbau kommt eine unterschiedliche Bewertung zur Anwendung (Tab.10).

Tabelle 10: Versorgungsgruppen (VG) für Humusbilanzen im konventionellen und ökologischen Landbau

(Quelle: KÖRSCHENS et al., 2004; KOLBE, 2008; EBERTSEDER et al., 2014)

Versorgungsgruppe (VG)	Humusäquivalente (in kg HÄQ/ha)	
	Konventioneller Landbau	Ökologischer Landbau
A (sehr niedrig)	≤ -200	≤ -200
B (niedrig)	-200 bis -76	-200 bis -1
C (optimal)	-75 bis +100	0 bis +300
D (hoch)	+101 bis +300	+301 bis +500
E (sehr hoch)	≥ 300	≥ 500

Die Stufen des A-E-Bewertungssystems sind so ausgerichtet, dass bei Einhaltung der anzustrebenden Versorgungsgruppe C zwei Ziele verfolgt werden:

1. Durch Erreichen eines mindestens ausgeglichenen Humussaldos (0 kg HÄQ/ha) kann die Einhaltung eines standort- und bewirtschaftungstypischen Humusgehaltes gewährleistet werden
2. Im Bereich der Versorgungsgruppe C wird ein weitgehend optimales Ertragsniveau der Fruchtarten erzielt.

Dagegen ist eine Unterversorgung der Versorgungsstufen A und B genauso zu unterlassen wie eine länger andauernde Überversorgung mit organischer Substanz der Stufen (D und) E. Mit steigendem Grad der Unterversorgung nimmt die Wahrscheinlichkeit zu, dass mit der Zeit abfallende Humusgehalte und entsprechend negative Auswirkungen auf die Bodenfruchtbarkeit eintreten werden. Es können (besonders im Ökolandbau) negative Nährstoffsalden (N) auftreten und es sind deutlich defizitäre Fruchtarternerträge zu erwarten.

Bei entsprechender gravierender Überversorgung mit organischer Substanz werden dagegen in Folge hoher Nährstoffmineralisation maximale Erträge erzielt, die Nährstoffsalden können gesetzlich vorgegebene Grenzen erreichen bzw. überschreiten (Dünge-VO). Niedrige Nährstoff-Effizienzen und eine Gefährdung der Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit des Bewirtschaftungssystems

können die Folge sein. In Abhängigkeit von der gewählten Humusbilanzmethode werden diese genannten Einstufungen mit unterschiedlicher Genauigkeit erreicht (vgl. Tab. 3).

Die Ergebnisse der Humusbilanzierung können zur Bewertung einzelner Fruchtarten unter Zugrundelegung eines oder mehrerer Anbaujahre Verwendung finden. Hierbei erfolgt eine Bewertung der Fruchtart alleine oder unter Einbeziehung von z.B. Zwischenfrüchten und eventuell vorgenommener Düngungsmaßnahmen (Gründüngung, Stroh, organische Düngemittel). Für die Bewertung einzelner Ackerflächen oder ganzer Betriebe sind einjährige Untersuchungen meistens nicht ausreichend. In großen Betrieben mit einer Vielzahl an Ackerschlägen können jedoch für eine orientierende Bewertung des Versorgungsgrades mit organischer Substanz die aggregierten Schlagsalden eines Betriebsjahres bereits als ausreichend angesehen werden. Für fundierte Bewertungen und die Ableitung von Empfehlungen zur Versorgung mit organischer Substanz sind in der Regel separat für jeden Ackerschlag (oder homogene Ackerschlaggruppen) Ergebnisse aus mehreren Jahren heranzuziehen.

Bestehen kaum Unterschiede im Anbausystem, z. B. indem ausschließlich Fruchtarten mit ähnlicher Humuswirkung angebaut werden, so reichen wenige Anbaujahre für eine Bewertung aus. Werden jedoch deutlich unterschiedlich hohe jährliche Humussalden ermittelt, z. B. in Folge abwechselnden Anbaus von Humusmehrern und Humuszehrer und der Integration von organischen Düngungsmaßnahmen, so muss darauf geachtet werden, dass eine Bewertung immer genau für eine Fruchtfolge-Rotation (3–10 Jahre) oder genau im Durchschnitt mehrerer Fruchtfolgen vorgenommen wird. Bei dieser Vorgehensweise können repräsentative Ergebnisse erlangt werden, weil extreme Humussalden von einzelnen Anbaugliedern in einzelnen Jahren ausgeglichen werden.

Gegenüberstellung humuszehrender und humusmehrender Komponenten

Von den Ergebnissen einer Humusbilanzierung können die einzelnen Glieder der Bilanz einer näheren Untersuchung unterzogen werden. Eine Methode besteht darin, dass die Humuszehrer auf der einen Seite und die humusmehrenden Komponenten auf der anderen Seite in absoluten und relativen Werten gegenübergestellt werden (Abb.16). In dem abgebildeten Beispiel haben die Fruchtarten der Humuszehrer mit 43 – 49 % die größte Bedeutung, während von den humusmehrenden Komponenten die

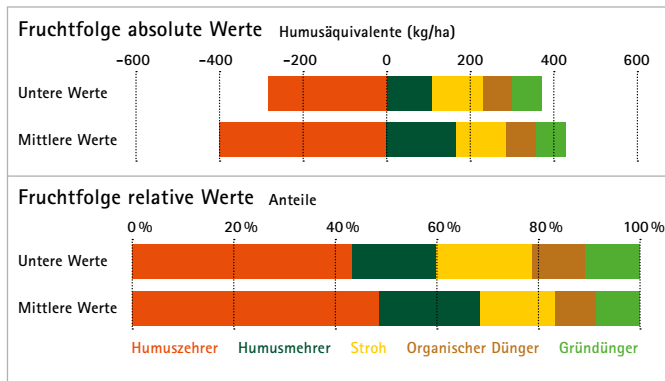


Abbildung 16: Vergleich der absoluten und relativen Komponenten der Ergebnisse einer Humusbilanzierung mit Hilfe der unteren und mittleren Werte der VDLUFA-Methode (siehe Beispielfruchtfolge in Tab. 9)

humusmehrenden Fruchtarten und das Stroh jeweils eine mittlere Bedeutung aufweisen. Eine andere nützliche Form ist die Darstellung der Ergebnisse in einem Kreisdiagramm. Auch ist es möglich, nur einen Teil der Ergebnisse, z. B. die humusmehrenden Komponenten, graphisch darzustellen.

Ableitung von schlagbezogenen Empfehlungen

Die Vorteile eines hohen Maßes an Bodenfruchtbarkeit können nur realisiert werden, wenn möglichst auf jedem Ackerschlag (oder homogener Ackerschlaggruppe) eine ausgeglichene Versorgung mit organischer Substanz gewährleistet wird. Deshalb sollten aus den bewerteten Ergebnissen der Humusbilanzierung schlagbezogene Empfehlungen mit folgenden Zielstellungen abgeleitet werden:

- Verteilung von organischen Düngemitteln: Oft sind hoffene Flächen mit organischer Substanz, z. B. wegen der längeren Fahrstrecken, stärker unterversorgt als gut erreichbare hofnahe Flächen. Daher sollte ein besserer Ausgleich von unterversorgten und überversorgten Flächen eines Betriebes angestrebt werden (auch überbetrieblich möglich).

- Fruchtfolgegestaltung: Bessere Anpassung der Fruchtfolgen zwischen Humuszehrnern und Humusmehrern inkl. dem Anbau von Zwischenfrüchten mit dem Ziel der Erreichung ausgeglichener Bilanzen für alle Betriebsflächen.
- Standort- und Schlaghomogenität: Auf Betrieben mit extremen Standortverhältnissen ist auf eine entsprechend geeignete Methode zur Humusbilanzierung und bei hohen Schlag-Inhomogenitäten bei der Ausbringung organischer Düngemittel auf den Einsatz von Verfahren zur teilflächenspezifischen Bewirtschaftung zu achten.

Heterogenität der Standorte

Auf Grund der enormen standörtlichen Differenzierung der Humusversorgung ist es nicht verwunderlich, dass auch die Methoden zur Humusbilanzierung ein unterschiedliches Eignungsprofil aufweisen (Tab. 11). Auf Basis der Tabelle 7 wurden für 6 Standorte verschiedener Bodenarten und Klimaregionen sowie mit stark unterschiedlichem Ertragspotenzial am Beispiel des Getreideanbaus mit mehreren Methoden die Humusbilanzen ermittelt. Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass man nicht alle Standorte gleichsam »über einen Kamm scheren« kann. Außer dem Ertragspotenzial und den daraus abgeleiteten Strohmenngen (siehe Kap. 9), können diese Standortunterschiede mit der VDLUFA-Methode nicht berücksichtigt werden. Die Bilanzierung erfolgt immer auf Grund mittlerer Standortverhältnisse. Bei der STAND-Methode erfolgt dagegen eine standortdifferenzierte Ermittlung und Bewertung der Humusbilanzen.

So werden auf den mittleren Standorten (STG 3 – 5) geringere Differenzen zwischen den Methoden berechnet als auf den jeweils extremen Standorten STG 1 bzw. STG 6. Je besser Standortunterschiede von den verwendeten Methoden berücksichtigt werden können, umso genauere und verlässlichere Ergebnisse können erwartet werden. Wenn ein hohes Genauigkeitsniveau angestrebt werden soll, ist daher auch die richtige Wahl der Methode zur Humusbilanzierung umso wichtiger, je extremer die jeweiligen Standortbedingungen einzuschätzen sind.

Tabelle 11: Beurteilung von Standortunterschieden zur Humusbilanzierung bei Anwendung verschiedener Methoden (in HÄQ/ha)

Standortgruppe (STG):	STG 1	STG 2	STG 3	STG 4	STG 5	STG 6
Getreidearten, Korn-Strohverhältnis 0,8						
Kornertrag (t/ha):	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0
Strohertrag (t/ha):	3,2	4,0	4,8	5,6	6,4	7,2
Getreide-GPS bzw. Getreide-Korn u. Strohabfuhr						
STAND-Methode (= Vergleichs-Methode)	-30	-130	-230	-180	-280	-420
VDLUFA-Methode, untere Werte	-280	-280	-280	-280	-280	-280
VDLUFA-Methode, mittlere Werte	-400	-400	-400	-400	-400	-400
Getreide-Korn + Strohzufuhr						
STAND-Methode	187	141	96	200	155	69
VDLUFA-Methode, untere Werte	40	120	200	280	360	440
VDLUFA-Methode, mittlere Werte	-80	0	80	160	240	320

Bewertung Stroh: STAND = mittlere Werte 67,9 kg HÄQ/t; untere und mittlere Werte VDLUFA = 100 HÄQ/t

Blaue Werte = Vergleichsmethode STAND; Grüne Werte = Differenz ≤ 50 HÄQ/ha gegenüber Vergleichsmethode; Rote Werte = Differenz ≥ 80 HÄQ/ha gegenüber Vergleichsmethode; Eine Differenz von 100 HÄQ/ha bedeutet einen Betrag von ca. 1,5 t/ha und Jahr an Stroh entsprechend der Vergleichsmethode

8 Kalkulation der Auswirkung von Bewirtschaftungs- und Betriebsveränderungen auf Humusbilanz und Humusgehalte des Bodens

An konkreten Beispielen können die Auswirkungen von (geplanten) Veränderungen der Bewirtschaftung auf die Humusbilanzen und die C_{org} - und N_t -Gehalte im Boden aufgezeigt werden. Hierzu sollten nur Methoden verwendet werden, die durch eine hohe Berechnungsgenauigkeit gekennzeichnet sind (siehe Tab. 3, $r = > 0,5$).

Umrechnung der Ergebnisse der Humusbilanzierung auf Humusgehalte des Bodens

Aus den Auswertungen von Dauerversuchen zur Begründung der Humifizierungskoeffizienten kann folgende allgemeine Interpretation von Ergebnissen zur Humusbilanzierung abgeleitet werden. Eine Düngung von z. B. 10 t/ha Stallmist führt mit Hilfe der STAND-Methode zu einer Humusbilanz von 375 kg HÄQ/ha (Gleichung 8):

$$10 \text{ t} \times 37,5 \text{ kg HÄQ/t} = 375 \text{ kg HÄQ/ha} \quad \text{GL 8}$$

Diese Bilanz für 10 t/ha Stallmist zeigt den Wert an, der bei stetiger (jährlicher) Beibehaltung dieser Maßnahme für den Zeitpunkt zu veranschlagen ist, wenn das Gleichgewicht zwischen Zufuhr und Abbau in etwa erreicht wird (vgl. Abb. 2). Die erhaltenen Ergebnisse der Humusbilanzierung können dann mit einem aus Dauerversuchen abgeleiteten Faktor umgerechnet und als C_{org} -Differenzen ausgewiesen werden, die in ca. 20–30 Jahren unter Beibehaltung der postulierten Bewirtschaftung zu erwarten sind (0,3 m Ackerkrume, spezifisches Gewicht 1,5 in g/cm^3 ; Gleichung 9):

$$\text{Humussaldo} \times \text{Faktor} = C_{org}\text{-Differenz} \quad \text{GL 9}$$

$$375 \text{ kg HÄQ/ha u. Jahr} \times 0,0005672 = 0,21 \text{ \% } C_{org}$$

Die ausgewiesene Humusbilanz kann somit in eine Differenz an Humusgehalten des Bodens umgerechnet werden, die im Durchschnitt durch die zugrundeliegende Bewirtschaftung bis zur Erreichung des Gleichgewichtszustandes erreicht werden kann.

Berechnung einer Betriebsumstellung und Interpretation der Ergebnisse

Mit Hilfe der STAND-Methode werden die zu erwartenden Auswirkungen der Umstellung von Futterbaubetrieben auf Biogasproduktion für verschiedene Standortbedingungen berechnet.

Es wird angenommen, dass auf den Betrieben oder den zu bewertenden Flächen bisher seit längerer Zeit (ca. 20 Jahre) entsprechend der in Tabelle 12 ausgewiesenen Fruchtfolge F1 mit 1,5 GV/ha Rinderhaltung gewirtschaftet worden ist. Für diese Nutzungsintensität werden zunächst Humusbilanzen berechnet, um den Ist-Zustand für die ausgewiesenen Standorte zu fixieren. Danach wird folgendes Szenario über eine geplante Betriebsveränderung erstellt (entsprechend F2, Tab. 12):

- Abschaffung der Viehhaltung
- Umstellung auf Biogasproduktion (mit Gewährleistung einer herkunftsbezogenen Gärproduktrückführung)
- Geringfügige Anpassung der Fruchtfolge.

Anschließend werden von diesem Szenario ebenfalls Humusbilanzen berechnet. Damit die Auswirkungen der neuen Anbaufolgen im Vergleich zur Ausgangssituation langfristig abgeschätzt werden können, werden in einem weiteren Rechengang die Ergebnisse der beiden Humusbilanzserien für alle Standorte miteinander in Beziehung gesetzt (Tab. 13).

Entsprechend den unterschiedlichen Humifizierungsraten auf den Standorten 1–6 sind die erhaltenen Differenzwerte in den Humussalden und den C_{org} -Gehalten nicht gleich hoch. Es ist zu erkennen, dass durch die geplante Betriebsveränderung (F2) auf einigen Standorten es zu einer Verbesserung der Versorgungslage mit organischer Substanz kommen wird (Standorte 1–3), während auf anderen Standorten sogar Verschlechterungen erwartet werden können (Standorte 5 u. 6).

Am Beispiel der leichten Böden (Tab. 13: Standortgruppe 2) werden die verschiedenen Verrechnungsmöglichkeiten näher erläutert. Aus einer Laboranalyse am Ende der bisherigen Bewirtschaftung (F1, Ist-Zustand) ist außerdem von diesem Standort ein C_{org} -Gehalt von 1,50 % ermittelt worden (C/N-Verhältnis 11:1; Ackerkrume 0,30 m, spezifisches Gewicht 1,5 g/cm^3). Bei der Berechnung des Ist-Zustandes wurde ein defizitärer Humussaldo von -77 kg HÄQ/ha festgestellt, der mit der Zeit ebenfalls zu einer tendenziellen Verringerung der Humusgehalte um 0,04 % C_{org} geführt hat.

Bilanzergebnisse von -77 kg HÄQ/ha werden bereits als ungünstige Bewirtschaftungsverhältnisse umschrieben. Sie weisen Fehlbeträge an organischer Substanz auf und werden deshalb

Tabelle 12: Humusbilanzen (kg HÄQ/ha; Versorgungsgruppen) von zwei Fruchtfolgen mit Silomais sowie Rinderhaltung bzw. Biogasproduktion (Quelle: nach KOLBE, 2013a)

Anbauverfahren	Standortgruppe (STG):	1	2	3	4	5	6
	Fruchtarten-Erträge (t/ha)	Leichte Böden		Mittlere Böden		Schwere Böden	
	Silomais:	35	38	40	45	50	60
	Zuckerrübe:	50	53	55	60	65	75
	Getreide:	4	5	6	7	8	9
Ist-Zustand F 1 1,5 GV/ha	Fruchtfolge F1: 50 % S.-Mais + R.-Gülle 25 % Z.-Rübe – Blatt 25 % Getreide + Stroh + W.-Zwischenfrucht + Gründüngung	35 C	-77 B	-148 B	-72 C	-142 B	-303 A
Szenario F2 0 GV/ha	Fruchtfolge F2 : 50 % S.-Mais + Gärsubstrat + Untersaat + Gründüngung 25 % Z.-Rübe + Blatt 25 % Getreide-GPS – Stroh	180 D	13 C	-154 B	-50 C	-208 A	-419 A

Tabelle 13: Berechnungsbeispiel des mittel- bis langfristigen Einflusses einer Änderung des Bewirtschaftungssystems auf die Humusbilanzen und die C_{org} -Gehalte des Bodens der untersuchten Standorte (Erklärung siehe Text)

Anbauverfahren	Standortgruppe (STG):	1	2	3	4	5	6
		Leichte Böden		Mittlere Böden		Schwere Böden	
F1 1,5 GV/ha	Humusbilanzen (kg HÄQ/ha)	35	-77	-148	-72	-142	-303
	Humusdifferenzen (% C_{org})	0,02	-0,04	-0,08	-0,04	-0,08	-0,17
F2	Humusbilanzen (kg HÄQ/ha)	180	13	-154	-50	-208	-419
	Humusdifferenzen (% C_{org})	0,10	0,01	-0,09	-0,03	-0,12	-0,24
F2-F1	Humusbilanzen (kg HÄQ/ha)	145	90	-6	22	-66	-116
	Humusdifferenzen (% C_{org})	0,08	0,05	~0,00	0,01	-0,04	-0,07

durch das VDLUFA-Bewertungssystem mit der Versorgungsgruppe B eingestuft. Nach Umrechnung wird rechnerisch eine C_{org} -Differenz von lediglich -0,04 % ermittelt. Wegen der hohen statistischen Streuung kann die zweite Kommastelle meistens nicht mehr mit Sicherheit ausgewiesen werden, was bei der Interpretation der Ergebnisse zu beachten ist. An diesem Beispiel wird deutlich, dass Versuche, derartige beschriebene Bewirtschaftungsverhältnisse über die alleinige Bodenuntersuchung auf C_{org} herleiten zu wollen, meistens zum Scheitern verurteilt sind, da die gewöhnlich vorzufindende Schwankungsbreite der C_{org} -Ergebnisse auf Praxisflächen viel zu groß ist (vgl. Kap. 3). Durch Kenntnis des C/N-Verhältnisses des Bodens kann ebenfalls die Differenz-Menge an Stickstoff berechnet werden, die durch diese Bewirtschaftung im Boden über einen Zeitraum von ca. 20–30 Jahren bis zur Erreichung eines neuen Gleichgewichtes durch die postulierte Humusveränderung freigeworden bzw. gebunden worden ist (siehe KOLBE, 2013a,b). Aus der Kenntnis der

Ist-Analyse kann schließlich der an diesem Standort typische Humus- bzw. C_{org} -Gehalt berechnet werden (Gleichung 10):

$$\text{Bodengehalt an } C_{org} \quad \text{GL 10}$$

$$1,50 \% + 0,04 \% C_{org} = 1,54 \% C_{org}$$

Da die bisherige Bewirtschaftung zu einem negativen Humus-saldo und deshalb auch tendenziell zu einer Abnahme der C_{org} -Gehalte des Bodens geführt hat, muss die ermittelte Differenz im C_{org} -Gehalt dem Laborwert hinzuaddiert werden. Der durchschnittliche Gehalt vor Beginn der defizitären Fruchtfolge ist daher in etwa mit 1,54 % C_{org} anzusetzen. Zur Aufrechterhaltung dieses Wertes würde also der Einsatz von standortangepassten Methoden immer zu einem weitgehend ausgeglichen Humus-saldo um 0 kg HÄQ/ha und Jahr führen. Die erhaltenen Ergebnisse sind dann als durchschnittliche standort- und bewirtschaftungstypische Werte anzusehen.

Die Humusbilanzierung der zukünftigen Bewirtschaftung durch das Szenario F2 (Tab. 13) hat auf dem leichten Standort mit 13 kg HÄQ/ha zu einem annähernd ausgeglichenen Humussaldo geführt, der über dem der Ausgangsbewirtschaftung liegt. Bei Vorlage nur dieser Informationen (13 kg HÄQ/ha) würde dann durch das neue Bewirtschaftungssystem quasi keine Veränderung der C_{org} -Gehalte eintreten ($0,01\% C_{org}$) wodurch der Laborwert an Humus sich praktisch nicht verändern würde: $1,50 + 0,01 = 1,51\% C_{org}$.

Aus diesen Berechnungen könnte dann zunächst die Schlussfolgerung abgeleitet werden, dass die eingeplante Betriebsumstellung auf diesem Standort zu keinen Veränderungen führen würde. Diese Schlussfolgerungen würden aber nur dann einen realistischen Hintergrund aufweisen, wenn die Bewirtschaftung vor der geplanten Änderung bereits zu weitgehend ausgeglichenen Humusbilanzen geführt hätte. Dies war aber nicht der Fall, wie das Beispiel F1 zur Ermittlung des Ist-Zustandes gezeigt hat. Zur möglichst genauen Berechnung der zu erwartenden Veränderung in der Versorgung mit organischer Substanz muss daher die Ist-Analyse mit dem Zukunfts-Szenario nach folgender Gleichung 11 verrechnet werden (Tab. 13: F2–F1):

Humusbilanz Szenario –	GL 11
Humusbilanz Ist-Zustand =	
Humusbilanz-Differenz	
13 kg HÄQ/ha - -77 kg HÄQ/ha = 90 kg HÄQ/ha	
$0,01\% C_{org} - -0,04\% C_{org} = 0,05\% C_{org}$	

Diese Ergebnisse zeigen jetzt, dass die Humusbilanz sich dann um +90 kg HÄQ/ha und der ermittelte Humusgehalt um +0,05 % C_{org} auf dann 1,55 % C_{org} etwas verbessern wird (Gleichung 12):

Bodengehalt an C_{org}	GL 12
$1,50\% C_{org} + 0,05\% C_{org} = 1,55\% C_{org}$	

Zusammenfassend kann ausgesagt werden, dass bei genauer Analyse des Szenarios auf dem leichten Standort eine geringfügige Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit zu erwarten ist. Daher kann die geplante Betriebsveränderung in dieser Form befürwortet werden. Aus dem aufgeführten Beispiel wird deutlich, dass unter Einrechnung der Ist-Bewirtschaftung es zu anderen Ergebnissen kommen kann, woraus wesentlich differenziertere Schlussfolgerungen abgeleitet werden können. Auf jeden Fall können die realen Verhältnisse durch diese Vorgehensweise mit zwei Arbeitsschritten deutlich besser beschrieben werden.

Für genaue Berechnungen zur Betriebsentwicklung und anderen Fragestellungen mit bedeutenden Veränderungen in der zukünftigen Intensität und Ausgestaltung der Fruchtfolgen sind daher jeweils zwei Untersuchungen zu erstellen, die dann miteinander verrechnet werden müssen. Außer zu den Humussalden können auch Berechnungen zur Veränderung der C_{org} -Gehalte und zu einigen wichtigen Pflanzennährstoffen angestellt werden. So kann es in Zeitperioden mit starkem Humusabbau (bzw. Humusanreicherung) zu einer nicht unbedeutenden Freisetzung (bzw. Festlegung) an Stickstoff und anderen Nährstoffen kommen.

9 Ermittlung eines Abfuhrpotenzials am Beispiel Stroh

Erfolgreiche ackerbauliche Bodenbewirtschaftung erfordert die Erhaltung eines optimalen Bodenfruchtbarkeitszustandes. Getreidestroh ist der wichtigste hierfür zur Verfügung stehende organische Dünger und keinesfalls ein Reststoff oder gar ein Abfall ackerbaulicher Bodennutzung. Von den humusmehrenden Komponenten umfasst Stroh in vielen Betrieben einen Anteil zwischen 25 % und weit über 50 %. So kann der Humusbedarf zur Absicherung eines ausgeglichenen Saldos in einer Silomais-Getreide-Getreide-Fruchtfolge bereits mit einer einmaligen Strohdüngung von 50 dt/ha vollständig abgedeckt werden. Für die gleiche Humusreproduktionsleistung wären andernfalls ca. 45 m³/ha Rindergülle, 55 m³/ha Gärrest, 110 dt/ha Geflügelkot, 100 dt/ha Stalldung oder 70 dt/ha Kompost erforderlich (VDLFA-Methode, EBERTSEDER et al., 2014). Mit Zwischenfruchtanbau könnten lediglich 10 % des Humusbedarfs der genannten Fruchtfolge abgesichert werden. Zwischenfruchtanbau stellt daher eine Ergänzung, nicht jedoch eine Alternative zur Strohdüngung dar.

Strohverkauf oder Bodenfruchtbarkeit?

Generell unterbleiben sollte eine Strohabfuhr von Ackerflächen mit ungünstigem Bodenfruchtbarkeitszustand, wie bei

- mehrjährig negativen Humusbilanzen
- unzureichender Humusversorgung (Humusgehalte liegen unterhalb der regional empfohlenen Orientierungswerte; siehe Kap. 3)
- unzureichender Kaliumversorgung (Kalium-Gehaltklassen A u. B).

Zusätzlich sind folgende Aspekte von wesentlicher Bedeutung:

- Strohmulch ist ein hervorragender Erosionsschutz und vermindert oberflächigen Abfluss von Niederschlagswasser
- Strohmulch bietet einen wertvollen Verdunstungsschutz, der insbesondere in trockenheitsgefährdeten Gebieten zur Ertragssicherheit beiträgt

- Strohdüngung fördert die biologische Bodenaktivität, da Getreidestroh eine ausgezeichnete Nahrungsquelle für Regenwürmer ist, die durch ihre Aktivität kostenlos das Bodengefüge, Wurzelwachstum und die Wasserversickerung verbessern
- Getreidestroh ist ein trockenmassereicher und zugleich stickstoffarmer organischer Dünger, der keinen dünge-, umwelt- und wasserrechtlichen Einsatzbeschränkungen unterliegt; Strohdüngung ist daher insbesondere in Regionen mit hohem Viehbesatz meistens günstig zu bewerten (vgl. Kap. 10)
- Der Verbleib von Getreidestroh auf dem Feld ist deshalb ein wichtiger Nachweis der Einhaltung einer guten fachlichen Praxis der landwirtschaftlichen Bodennutzung
- Verbleibt das Stroh zur Düngung auf dem Feld, fallen keine zusätzlichen Bergungs-, Transport- und Lagerungskosten sowie keine Ausbringungskosten für andere organische Dünger an
- Strohdüngung schließt Nährstoffkreisläufe bereits auf dem Feld und kann die Aufwendungen zur Mineraldüngung deutlich reduzieren (50 dt Stroh ~ 25 kg N, 7 kg P bzw. 16 kg P₂O₅, 70 kg K bzw. 84 kg K₂O).

Im einzelnen Landwirtschaftsbetrieb ist die zum Verkauf verfügbare Strohmenge abhängig vom Getreideanteil in der Fruchtfolge, dem standortspezifisch erzielbaren Strohertrag, dem Stroheinstreu- und Futterstrohbedarf der Tierhaltung sowie dem Strohbedarf zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit. Eine gute Abschätzung kann nur gelingen, wenn alle betrieblichen Effekte bewertet und für Stroh ein Mindestverkaufspreis kalkuliert wird. Die beim Strohverkauf erzielbaren Marktpreise leiten sich aktuell im Wesentlichen aus den regionalen Rahmenbedingungen der stofflichen Nutzung ab, wie z. B. dem Rohstoffbedarf zur industriellen Verarbeitung, dem Strohbedarf von Pferdehaltern, Gartenbaubetrieben und weiteren Nutzungsalternativen. Nährstoffwert und Verfahrenskosten für die Strohbergung frei Feldrand belaufen sich unter den gegenwärtigen ökonomischen Rahmenbedingungen (2015) auf durchschnittlich ca. 3,50 € je dt Stroh. Noch im Jahr 2011 mussten hierfür, bedingt durch hohe Mineraldüngerkosten teilweise 4,00 € je dt Stroh einkalkuliert

werden. Die Transportkosten betragen aktuell ca. 1,40 €/dt Stroh bei 10 km bzw. 6,20 €/dt Stroh bei 30 km Transportentfernung (HANFF et al., 2008, aktualisiert).

Neben den Verfahrenskosten der Strohernte und dem Nährstoffwert ist auch der Wert von Stroh zur Sicherung der Bodenfruchtbarkeit und zur Vermeidung von schädlichen Bodenveränderungen anzurechnen. Hierbei sind die konkreten betrieblichen Anbau- und Verwertungsverhältnisse zu berücksichtigen. So kann bei positiven Humusbilanzen und optimaler Humusversorgung ein Teil des Strohs aus dem Betrieb entnommen werden, ohne dass eine Minderung der Bodenfruchtbarkeit zu erwarten ist.

Sofern jedoch ein negativer Humussaldo vorliegt, sind Ersatzmaßnahmen zum Ausgleich der Humusbilanz zu treffen. Die dafür anfallenden Kosten, einschließlich der damit verbundenen betriebswirtschaftlichen Effekte, sind als zusätzliche Kosten für den Humusersatz zu bewerten. Unter Berücksichtigung der tatsächlichen ökonomischen Betriebssituation, inklusive ggf. notwendiger zusätzlicher Aufwendungen zum Humusbilanzausgleich, können die Kosten der Strohbereitung für den Verkauf zwischen 8,00 € und 15,00 €/dt Stroh schwanken (HANFF et al., 2008, aktualisiert).

In diesem Zusammenhang sei auch auf neuere energiepolitische Entwicklungen hingewiesen, die die Nutzung von Getreidestroh zur Herstellung von Bioenergie und BtL-Kraftstoffen der 2. Generation forcieren. Landwirte sollten sich daher beim Strohverkaufspreis künftig auch an der Preisentwicklung von Strom und Kraftstoffen orientieren. Als einfache Anhaltspunkte können die jeweils aktuellen Preise für Strom, Benzin bzw. Diesel genutzt werden. Unterstellt man einen erzielbaren Stromertrag in Höhe von 640 kWh je dt Stroh (REINHOLD, 2014) und daraus ableitend einen potenziellen Energieertrag in Höhe von ca. 1.500 kWh je dt Stroh, errechnet sich auf Basis mittlerer Strom- und Kraftstoffpreise des Jahres 2014 ein energetisches Preisäquivalent für Getreidestroh von 18,00–28,00 € je dt Stroh (Strom: 30 ct je kWh; Superbenzin E10: 1,49 € je L, Energiewert: 8,9 kWh je L; Diesel: 1,35 € je L, Energiewert: 9,7 kWh je L; StrBa, 2015). Dies sollte bei künftigen Preisverhandlungen durchaus eine gewichtige Rolle spielen.

Berechnungsschritte zur Abschätzung des verfügbaren Strohaufkommens am Beispiel Deutschlands

Neben den betriebsspezifischen Aspekten gehen die Zielrichtungen zur Potenzialabschätzung auf Regions- und Landesebene in eine andere Richtung. Ergebnisse der Potenzialabschätzung können nützliche Hinweise für Akteure der Raumordnung, Anlagenplanung und Standortfindung geben. Nachfolgend ein Beispiel zur Abschätzung des verfügbaren Strohanfalls für das Gebiet von Deutschland (nach WEISER et al., 2014).

Im Bezugsjahr 2007 fielen in Deutschland 60,8 Mio. t TM an landwirtschaftlichen Nebenprodukten an. Mit einem Anteil von 42 Prozent dominierte Getreidestroh die Gesamtmenge (Tab. 14). Die zukünftige Bedeutung des Sektors kann daran erkannt werden, dass in Anlagen zur Energieerzeugung bisher weniger als 1 % der aufgewachsenen Strohmenge genutzt wird.

Tabelle 14: Aufkommen verschiedener landwirtschaftlicher Nebenprodukte (Mio. t TM), Bezugsjahr 2007 (Quelle: WEISER et al., 2014)

Nebenprodukt	Menge	Nutzung
Getreidestroh	25,8 Mio.	~17 % Einstreu für die Viehhaltung
Rinder- und Schweinegülle	12,2 Mio.	~12 % als Biogas-substrat, organischer Dünger
Raps- und Körnermaisstroh	9,5 Mio.	100 % organischer Dünger
Festmist	7,5 Mio.	~3 % Biogassubstrat, organischer Dünger
Rübenblatt und Kartoffelkraut	3,1 Mio.	100 % organischer Dünger
Rapspresskuchen	2,7 Mio.	Futter

Da Stroh maßgeblich für den Humusersatz verantwortlich ist, kann jedoch nur eine bestimmte Menge an Getreidestroh ohne eine humuswirksame Rückführung von Konversionsprodukten genutzt werden. Zur Bestimmung des Abfuhrpotenzials ist eine Humusbilanzierung als wichtiger unverzichtbarer Bestandteil anzusehen. Dieser Ansatz soll sicherstellen, dass nur so viel Getreidestroh je Flächeneinheit als Potenzial ausgewiesen wird, wie nicht zur Strohdüngung und damit für eine ausgeglichene Humusbilanz benötigt wird.

Unter Anwendung mehrerer Methoden der Humusbilanzierung wurde das Abfuhrpotenzial an Stroh für das Gebiet von Deutschland bestimmt. Hierzu wurden auf Landkreisebene u. a. folgende Eingangsparameter für drei Jahre (1999, 2003, 2007) berücksichtigt:

- Anbauflächen und Erträge von 17 Fruchtarten
- Fläche der Brache und Zwischenfrüchte
- Wirtschaftsdünger- und Klärschlammeinsatz
- Stoffliche Nutzung von Stroh (z. B. Einstreu).

In den Gebieten bzw. Landkreisen mit negativen Humusbilanzen wurde kein Strohpotenzial veranschlagt. In den Kreisen mit positiven Bilanzen wurde eine Abfuhrpotenzialbestimmung nach folgendem Muster vorgenommen:

- Bestimmung der Menge an Humusäquivalenten oberhalb einer ausgeglichenen Humusbilanz (0 kg HÄQ/ha), die auf das Stroh zurückgeführt werden kann
- Umrechnung der Humusäquivalente (HÄQ) in Strohmenge (dt/ha)
- Abzug anderweitiger stofflicher Nutzungen (Einstreu)
- Abzug des nicht bergbaren Strohanteils.

Es ergab sich für das Gebiet von Deutschland ein Abfuhrpotenzial von 8–13 Mio. t Stroh-FM (WEISER et al., 2014). Die erhebliche Variationsbreite konnte zwar auf die verwendeten Bilanzierungsmethoden zurückgeführt werden, ist jedoch auch als Schlussfolgerung aus der Studie als bedeutender Unsicherheitsfaktor anzusehen.

Für eine gezielte Potenzialbestimmung im Vorfeld der Etablierung von Kraftwerken oder anderen Einrichtungen zur überbetrieblichen und landesweiten Verwertung bzw. vor der Etablierung eigener betrieblicher Verwertungslinien (z. B. Strohhheizung, etc.) und Vertragsabschlüssen zur Strohlieferung sind daher nachfolgend genannte Fragen zu beantworten.

Welche Berechnungsgrundlage wird gewählt (Ackerschlag, Betrieb, Region)?

In jedem Fall muss für die Bestimmung der Abfuhrpotenziale die Humusbilanz auf Schlagebene über eine Frucht- oder Nutzungsfolge berechnet werden. Durch eine Anwendung der Bilanzen auf Betriebsebene können Stoffströme nicht ausreichend nachvollzogen werden. Eine rechnerisch positive Humusbilanz auf Betriebsebene kann durch extreme Überschüsse auf wenigen Flächen hervorgerufen werden (vgl. Kap. 5).

Eine Prüfung von berechneten Humusbilanzen, ermittelt entsprechend dem o.a. Beispiel aus Eingangsdaten der statistischen Jahressbücher und anderer Quellen, ergab im Vergleich zu Berechnungen aus repräsentativen Dauertestflächen und Betriebshebungen für das Gebiet von Sachsen eine Überschätzung der Humusbilanzen zwischen 70–140 HÄQ/ha und Jahr. Aus diesem Grund sollten regionsübergreifende Daten nur als Übersichts-material betrachtet werden, aus denen keine zu detaillierten Rückschlüsse für einzelne Gebiete gezogen werden können. Es ist also zu bedenken, dass bei Verwendung von regionsübergreifenden Eingangsdaten die Ergebnisqualität abnehmen kann.

Welche Standorteigenschaften sind zu berücksichtigen und welche Humusbilanzmethode wird angewendet?

Die Wahl der Bilanzmethode ist ebenfalls von Bedeutung für die Abfuhrpotenziale, da die Ergebnisse bei der Berechnung sich deutlich voneinander unterscheiden können (siehe o.a. Beispiel). Die Ursachen hierfür können auf die unterschiedliche Berechnungsgenauigkeit der Methoden zurückgeführt werden (siehe Tab. 3). Auf Basis der Tabelle 11 wurden für 6 Standortgruppen in vereinfachter Form sowohl die Strohwirkungen auf die Versorgung mit organischer Substanz als auch die Strohabfuhrpotenziale auf Grundlage von drei Methoden zur Humusbilanzierung ermittelt (Tab. 15).

Entsprechend den Stroherträgen steigt die Versorgung mit organischer Substanz von STG 1 nach STG 6 mit allen Methoden deutlich an. Das Niveau liegt aber bei den Berechnungen mit der STAND-Methode deutlich niedriger, was auf Unterschieden in den verwendeten Reproduktionskoeffizienten für organische Materialien zurückgeführt werden kann (siehe weiter unten). Darüber hinaus ist die Strohwirkung auf den fruchtbaren schwereren Böden geringer als auf den leichteren Böden.

Auf Grund dieser Zusammenhänge bestehen deutliche Unterschiede bei den berechneten Strohabfuhrpotenzialen in Abhängigkeit vom Standort. Je stärker die Bedingungen von mittleren Bodenbonitäten abweichen, umso deutlicher treten diese Differenzen zutage. Je nach Ausgangsbedingungen und methodischem Ansatz können Ergebnisse von ein- und demselben Standort berechnet werden, die von unter Null (hierbei besteht noch ein Bedarf an organischer Substanz) bis zu annähernd 100% höheren Stroh-Abfuhrpotenzialen betragen können. Daher muss die Wahl der Methode zur Humusbilanzierung an dieser Stelle etwas ausführlicher behandelt werden.

Zusammenfassend geht aus diesen Berechnungen hervor: Je genauer die Berechnungen z. B. für einen Betrieb mit ganz bestimmten Standorteigenschaften ausgeführt werden sollen, umso wichtiger ist der Einsatz von Methoden mit hohen Genauigkeitswerten, um aussagekräftige und verlässliche Berechnun-

Tabelle 15: Ermittlung von Standortunterschieden zum Strohaufkommen durch Berechnung von Humusbilanzen und Abfuhrpotenzialen mit Hilfe von drei Methoden (Basis siehe Tab. 7 und Tab. 11)

Standortgruppe (STG):	STG 1	STG 2	STG 3	STG 4	STG 5	STG 6	Mittelwerte
Getreidearten, Korn-Strohverhältnis 0,8							
Kornertrag (t/ha):	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	
Strohertrag (t/ha):	3,2	4,0	4,8	5,6	6,4	7,2	
Strohwirkung (kg HÄQ/ha)							
STAND-Methode (67,9 kg HÄQ/t)	217	271	326	380	435	489	353
VDLUFÄ-Methode, untere Werte (100 kg HÄQ/t)	320	400	480	560	640	720	520
VDLUFÄ-Methode, mittlere Werte (100 kg HÄQ/t)	320	400	480	560	640	720	520
Abfuhrpotenzial (Werte über Null in der Humusbilanz) (t/ha Stroh)							
STAND-Methode	2,75	2,08	1,41	2,95	2,28	1,02	2,08
VDLUFÄ-Methode, untere Werte	0,40	1,20	2,00	2,80	3,60	4,40	2,40
VDLUFÄ-Methode, mittlere Werte	0,00 ¹⁾	0,00	0,80	1,60	2,40	3,20	1,33

¹⁾ In dieser Variante besteht ein Saldo von -80 kg HÄQ/ha, was umgerechnet einem Bedarf von 0,8 t/ha an Stroh entsprechen würde.

gen zu erhalten. Bisher erfüllen lediglich die STAND-Methode und das CCB-Verfahren diese Anforderungen. Diese Methoden können daher für diese Aufgabenstellungen empfohlen werden, auch wenn der Erhebungsaufwand im Einzelfall etwas höher anzusetzen ist (siehe Tab. 3).

Je größer die Bezugsebene der Berechnungen ist (z. B. Deutschland auf Grundlage der Landkreise), umso wichtiger ist es, möglichst einfache Methoden einzusetzen, die lediglich einen Erhebungsaufwand verlangen, der für die Region auch zur Verfügung steht. Geeignete Methoden sind darüber hinaus dadurch gekennzeichnet, dass sie im Vergleich zu den genaueren Methoden vergleichbare Durchschnittsergebnisse erreichen (siehe Tab. 15: Mittelwerte). Für diese Aufgabenstellungen erscheinen daher die unteren und mittleren Werte der Fruchtartenkoeffizienten der VDLUFA-Methode gut geeignet. Sie weisen zudem im Durchschnitt noch verhältnismäßig genaue Reproduktionswerte auf, wenn ausgeglichene Humussalden erreicht werden.

Die Humusbilanzmethoden sind im Prinzip so kalibriert, dass sich bei Erreichen eines ausgeglichenen Saldos (0 kg HÄQ/ha u. Jahr) im Durchschnitt ein standort- und bewirtschaftungstypischer Humusgehalt einstellt (Differenz $C_{org} \approx 0$ % TM). Die Erreichung dieses Ziels ist aber abhängig vom Genauigkeitsniveau der verwendeten Methode (siehe Tab. 3). Wie entsprechende Validierungsarbeiten mit Ergebnissen aus Dauerversuchen gezeigt haben, wird besonders bei der Nutzung der oberen Werte der VDLUFA-Methode oder des REPRO-dyn-Verfahrens bei einem ausgeglichenen Humussaldo bereits eine deutlich erweiterte Humusproduktion im Boden erreicht. Hierdurch verbleibt ein höherer Anteil an organischer Substanz auf der Fläche als zum Ausgleich der Humusproduktion erforderlich ist, wodurch es dann im Durchschnitt zu einem Anstieg der Humusgehalte kommen kann. Abfuhrpotenziale an Stroh werden daher mit diesen Methoden regelmäßig deutlich unterschätzt.

Diese Nachteile zeigen die genaueren Methoden nicht. Insbesondere bei Nutzung der unteren Reproduktionswerte der Fruchtarten der VDLUFA-Methode sowie der STAND- und CCB-Methoden führen ausgeglichene Humussalden im Durchschnitt der Berechnungen zu keiner Veränderung der Humusgehalte im Boden. Abfuhrpotenziale können dadurch erheblich genauer eingeschätzt werden. Ein ausgeglichener Saldo von 0 kg HÄQ/ha und Jahr kann daher als Orientierungswert zur Fixierung der oberen Grenze eines Abfuhrpotenzials angesetzt werden.

Eine andere Möglichkeit zur Fixierung des Potenzials besteht darin, entsprechend der Aufgabenstellung aus mehreren Bilanzberechnungen ein Ergebnis abzuleiten (siehe Kap. 8). Zunächst wird hierzu auf Grundlage der Standortgegebenheiten und der »guten fachlichen Praxis« eine durchschnittliche Bewirtschaftung (Fruchtfolge, Düngung, etc.) als Ausgangssituation festgelegt, die zu möglichst ausgeglichenen Humusbilanzen führt. Hierdurch wird eine untere Grenze der Versorgung mit organischer Substanz fixiert, die durch zukünftige Handlungsoptionen nicht unterschritten werden soll.

In einem zweiten Ansatz werden dann auf Grundlage der Ist-Situation oder in Form von Zukunftsszenarien weitere Humusbilanzberechnungen durchgeführt. In einem dritten Berech-

nungsgang werden dann die Bilanzen beider Ansätze miteinander verglichen, indem die Ausgangssituation von den Szenarienberechnungen abgezogen wird. Aus den erhaltenen positiven Differenzwerten kann dann das Abfuhrpotenzial für Stroh ermittelt werden.

Welcher Reproduktionswert für Stroh soll genutzt werden?

In der neuen VDLUFA-Methode zur Humusbilanzierung ist ein Humifizierungskoeffizient von 100 HÄQ/t Stroh angegeben (EBERTSEDER et al., 2014). In der Methodenbeschreibung aus dem Jahr 2004 wurde noch darauf hingewiesen, dass für abbauintensive Standorte ein niedrigerer Wert von 80 HÄQ/t Stroh genutzt werden kann (KÖRSCHENS et al., 2004). Aus anderen Versuchsauswertungen sind ebenfalls oft für verschiedene organische Dünger niedrigere Werte ermittelt worden.

Da die Reproduktionsleistung bei allen organischen Materialien hohen Schwankungen unterworfen ist, können abgesicherte Durchschnittswerte nur erlangt werden, wenn eine sehr große Anzahl an Versuchsdaten berücksichtigt wird. Bei einer Auswertung von 240 Dauerversuchen aus Mitteleuropa wurden mittlere Werte gefunden, die sogar für die meisten organischen Materialien z.T. deutlich unter denen liegen, die bei der VDLUFA-Methode angegeben werden (KOLBE, 2010).

Außerdem wurde eine von der Zufuhrhöhe abhängige Reproduktionsleistung ermittelt. Je höher die durchschnittliche Zufuhr ist, umso geringer ist die zu erwartende spezifische Humuswirkung anzusetzen. In Abhängigkeit von der durchschnittlichen Menge an Strohdüngung konnten Reproduktionskoeffizienten zwischen 40 kg und 80 kg HÄQ/t FM ermittelt werden (Tab. 16). Daher sollten für genaue Berechnungen keine höheren Werte als 80 kg HÄQ/t FM an Stroh entsprechend der alten VDLUFA-Methode zur Anwendung kommen.

Tabelle 16: Ableitung von Humifizierungskoeffizienten für Stroh (kg HÄQ/t FM) (Quelle: 245 Strohvarianten von 240 Dauerversuchen aus Mitteleuropa, KOLBE, LfULG, unveröffentlicht)

Durchschnittliche Zufuhrhöhe an Stroh (t FM/ha u. Jahr)		
≤ 2,5	2,5 – 5,0	≥ 5,0
68 – 78	56 – 58	39 – 53

Wie viel Stroh steht zur Verfügung und welcher Anteil kann technisch geborgen werden?

Die aufgewachsene Menge an Getreidestroh wird in der Regel mittels des Kornertrages und der fruchtartspezifischen Korn/Stroh-Verhältnisse bestimmt. Die geläufigen Korn/Stroh-Verhältnisse stammen aus den neunziger Jahren und werden zur Zeit in Forschungsprojekten in Hinblick auf den Standort- und Bewirtschaftungseinfluss überprüft. Gleichzeitig ist davon auszugehen, dass mit derzeitiger Druschtechnik das Stroh stark zerkleinert wird, so dass ein Teil nicht aufgenommen werden kann und auf dem Acker verbleibt.

Stoppelhöhe

Nach Messungen in Thüringen und Bayern auf 14 Ackerschlägen ($n = 684$) in der landwirtschaftlichen Praxis wurde eine mittlere Stoppelhöhe bei den Getreidearten von 17 cm (± 5 cm, mit erheblicher Streuung in Hanglagen) ermittelt. Bei einer Stoppelhöhe von 15–20 cm verbleiben somit bei Winterweizen 21–28 % des gesamten Strohertrages als Stoppel auf dem Acker (Tab. 17). Die Veränderung der Stoppelhöhe um 1 cm ändert den Strohertrag um ca. 0,5–1,0 dt/ha.

Tabelle 17: Anteil Stoppel am Gesamt-Strohertrag (= 100 %) je 5 cm Stoppellänge (Quelle: WEISER, TLL)

Pflanzenart	Stoppelanteil (%)	
	(Mittelwert)	(Schwankungsbreite)
Winterroggen	4,7	4,5–5,0
Winterweizen	6,9	6,8–7,0
Wintertriticale	8,2	7,8–8,5
Wintergerste	11,0	9,8–12,5
Sommergerste	10,2	10,0–10,5

Auf Versuchsstationen in Sachsen wurden zum Vergleich ebenfalls von den Getreidearten Messungen der Stoppelhöhen vorgenommen ($n = 215$). Hierbei wurde eine durchschnittliche Stoppelhöhe von 10 cm (± 2 cm) ermittelt. Bei Nutzung gewöhnlicher Versuchstechnik an Stelle des praxisüblichen Mähdeschers entsteht demnach eine um ungefähr 7 cm verringerte Stoppelhöhe. Dieser Unterschied kann von Bedeutung sein, da die Ermittlung der Korn/Stroh-Verhältnisse der Getreidearten in der Regel aus Versuchsergebnissen stammen, bei denen übliche Versuchstechnik bei der Ernte zur Anwendung kommt. Stoppellängen von mehr als 10 cm sollten daher bei den Berechnungen in Abzug gebracht werden, weil sie in dem Ausmaß bei der Ermittlung der Korn/Stroh-Verhältnisse nicht berücksichtigt worden sind.

Korn/Stroh-Verhältnisse

In den meisten Fällen liegen die anfallenden Strohmenngen nicht vor, so dass sie geschätzt werden müssen. Die abgefahrenen Mengen können durch Zählung der Anzahl und wiegen einiger Ladungen an Ladewagen oder einiger Strohbällen ermittelt werden. Eine weit verbreitete Art der Ermittlung der Strohmenngen kann über die Korn/Stroh-Verhältnisse der Fruchtarten vorgenommen werden. Diese Verhältniszahlen werden aus Ergebnissen spezieller regional weit gestreuter Feldversuche ermittelt, in denen die Korn- und Stroherträge (in der Regel ohne Spreu und Stoppel, Stoppel mit ca. 10 cm Schnitthöhe werden zu den Ernte- und Wurzelresten gezählt) nach folgender Gleichung 13 berechnet werden (Beispiel W.-Weizen):

$$\frac{\text{Ertrag NP Stroh (t/ha 86 \% TM)} / \text{Ertrag HP Korn (t/ha 86 \% TM)}}{\text{Korn/Stroh-Verhältnis (Korn = 1)}} = 6,5 / 8,0 = 0,81$$

NP = Nebenprodukt; HP = Hauptprodukt

Die Korn/Stroh-Verhältnisse sind von der Fruchtart abhängig, sie schwanken in weiten Grenzen und haben sich im Laufe der Zeit durch den Züchtungsfortschritt und den Einsatz von Wachstumsreglern und anderen Pflanzenschutzmitteln verändert (Abb. 17). Bei allen Getreidearten ist im Vergleich zum Kornertrag (= 1) das Strohaufkommen deutlich reduziert worden. In Abhängigkeit von der Sorte, den Anbau- und Witterungsverhältnissen ist die Streuung erheblich, sie kann unabhängig von der Fruchtart mit durchschnittlich ungefähr $\pm 0,5$ ausgewiesen werden. Durchschnittswerte, wie sie heute in Anbausystemen unterschiedlicher Intensität üblich sind, werden in Tabelle 18 genannt.

Stroh-Erntemengen

Durch Einsatz heute üblicher Mähdruschtechnik in der Praxis wird das Korn vom Stroh und der Spreu getrennt. Die Spreu kann hierbei z. B. bei Weizen um 1,5 t/ha (= ca. 15–20 % des Gesamt-Strohanfalls) betragen. Nach Schweizer Untersuchungen wurden für W.-Gerste ein Spreuanteil vom Kornertrag von ca. 8 %, bei W.-Weizen von 14 % und bei W.-Triticale von 16 % ermittelt (MARTI et al. 2013). Bereits ohne Einsatz der Häckseltechnik entsteht beim Druschvorgang zudem ein Anteil an Kurzstroh, der mit gewöhnlicher Strohsammeltechnik ebenfalls nicht abgeerntet werden kann. In einem praxisnahen Mähdruschversuch mit W.-Weizen- und W.-Triticale wurde ermittelt, dass die nicht bergbaren Strohanteile an Kurzstroh, Spreu und anderen Werbungsverlusten z.T. über 50 % des Gesamtstrohanfalls ausmachen können. Nach Abzug durchschnittlicher Spreuanteile können die in Tabelle 19 angegebenen Strohmenngen ausgewiesen werden.

Nach diesen einjährigen Untersuchungen ist der bergbare Strohanteil u. a. abhängig von der angebauten Sorte (nicht dargestellt), von dem TM-Gehalt des Strohs (je trockener umso höher ist der nicht erntbare Anteil: Erntetermin früh) und vom Einsatz an Pflanzenschutzmitteln (ein reduzierter PSM-Einsatz erhöht die Strohbrüchigkeit und verringert die abgefahrte Strohmenge, insbesondere bei höheren Fahrgeschwindigkeiten des Mähdeschers).

Im Durchschnitt können von der vorhandenen Strohmenge lediglich 55 % (42–71 %) abgeerntet werden. Andere Untersuchungen haben eine ähnlich hohe Streubreite ermittelt, die Durchschnittswerte liegen aber etwas höher. Nach den Untersuchungsergebnissen aus Thüringen ist damit zu rechnen, dass nach Einsatz üblicher Mähdruschtechnik in etwa zwei Drittel des Strohanfalls durch die Bergetechnik erfasst werden kann (ZELLER et al., 2012), der Rest verbleibt auf den Flächen und verbessert die Versorgungslage mit organischer Substanz. Ein höherer Strohanfall kann nur durch Anwendung spezieller Drusch- und Bergetechnik erreicht werden.

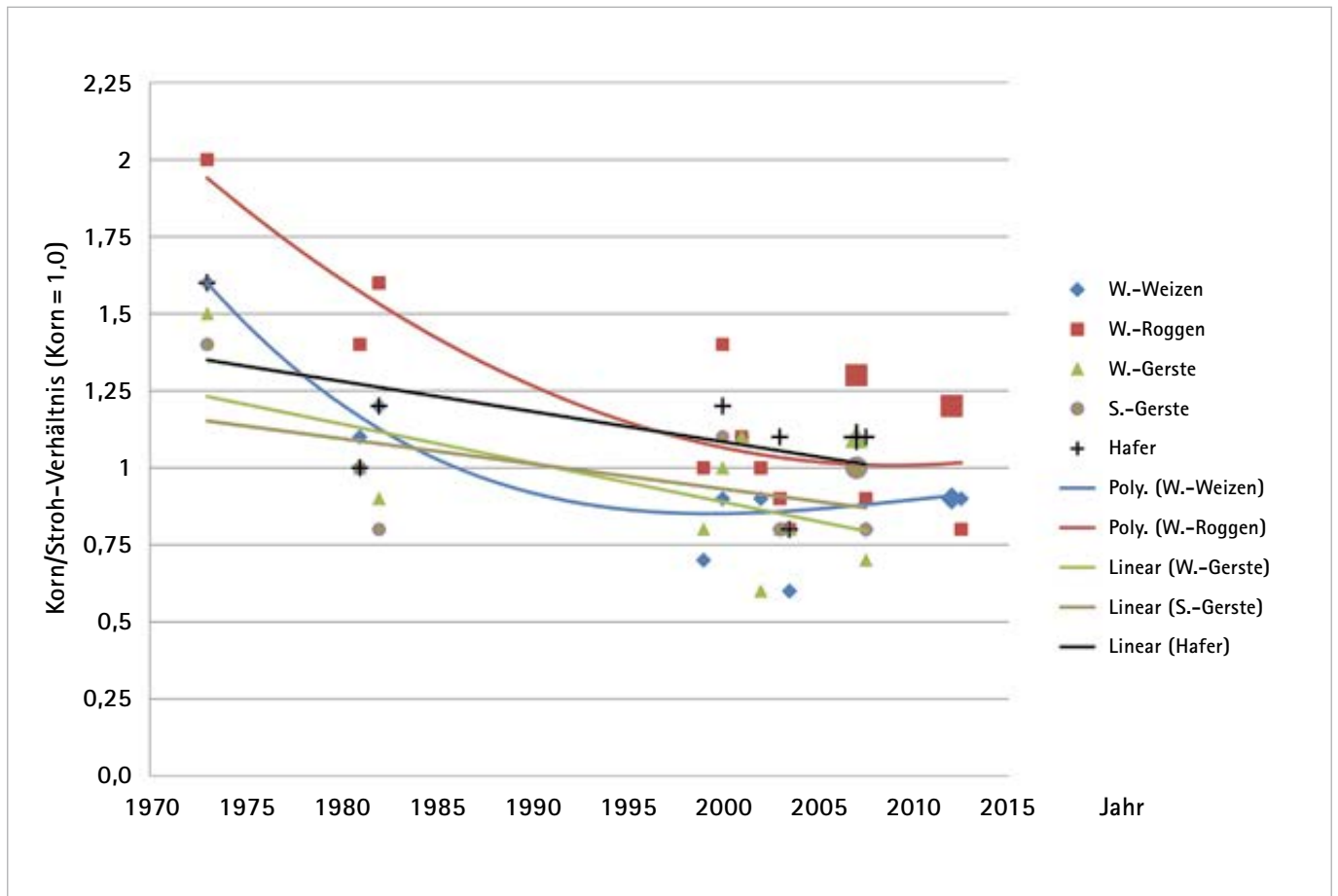


Abbildung 17: Entwicklung der Korn/Stroh-Verhältnisse seit 1970 (Quellen 1970–2003: zit. nach FRITSCHKE et al., 2004; 2007–2012: DÜVVO, 2007; KÖHLER & KOLBE, 2007; ZIMMER et al., 2013; Zeichengröße: kleine Zeichen = konventioneller Landbau, große Zeichen = ökologischer Landbau)

Tabelle 18: Richtwerte für das Verhältnis von Hauptprodukt zu Nebenprodukt (Korn/Stroh- bzw. Wurzel/Laub-Verhältnis) im konventionellen (Kon) und ökologischen (Öko) Landbau (Quelle: KÖHLER & KOLBE, 2007)

Fruchtart	Kon	Öko	Fruchtart	Kon	Öko	Fruchtart	Kon	Öko
Braugerste	0,7	1,0	Masserübe	0,4	0,4	Winterraps, Winterrübsen	1,7	2,0
Dinkel	1,0	1,1	Öllein	1,5	1,5	Winterroggen	0,9	1,3
Durum	0,8	1,0	So.-Futtergerste	0,8	1,0	Wintertriticale	0,9	1,2
Gehaltsrübe	0,4	0,4	Sommerraps	1,7	2,0	Winterweizen	0,8	1,1
Hafer	1,1	1,1	Sonnenblume	2,0	2,0	Zuckerrübe	0,7	0,7
Körnermais	1,0	0,8	Wintergerste	0,7	1,1			

Beispiel: Winterweizen (Kon), 6,0 t/ha Kornertrag (86% TM), Korn/Stroh-Verhältnis 0,8; $6,0 \text{ t} \times 0,8 = 4,8 \text{ t/ha Stroh (86\% TM)}$

Tabelle 19: Abgeernteter Strohertrag und verbliebene Erntereste an Kurzstroh und anderen Werbeverlusten bei W.-Weizen und Triticale nach gewöhnlichem Mähdruschverfahren (CLAAS Lexion 570 Hybridmähdrusch, 6 m Schneidwerk; Quelle: SÜNDER et al., 2010)

Fraktion	Erntetermin ¹⁾	Minimum	Maximum	Mittelwert
Stroh abgefahren (t/ha FM)	Früh	3,1	5,9	4,0
	Spät	4,2	6,7	5,1
	Mittelwert	3,7	6,3	4,5
Kurzstroh u. a. Werbungsverluste (ohne Spreu) (t/ha FM)	Früh	4,3	5,1	4,8
	Spät	2,2	2,7	2,6
	Mittelwert	3,2	3,8	3,7
Summe Stroh (t/ha FM)	Früh	7,4	11,0	8,8
	Spät	6,4	9,4	7,7
	Mittelwert	6,9	10,1	8,2
Anteil Stroh abgefahren (%; Summe Stroh = 100 %)	Früh	42	54	46
	Spät	66	71	66
	Mittelwert	54	62	55

¹⁾ Erntetermin früh = 06.08., trockene Witterung; spät = 15.08, nach geringem Niederschlag

10 Ausgleich stark einseitiger Humusbilanzen

Beziehungen zwischen Humussaldo und Fruchtartenertrag

In Anlehnung an entsprechende Versuchsergebnisse über die Wirkung einer Grunddüngung in Abhängigkeit von der Bodennährstoffversorgung können auch die Ertragswirkungen der angebauten Fruchtarten und von zusätzlichen Fruchtfolge- und Düngungsmaßnahmen mit organischer Substanz den Ergebnissen der Humusbilanzierung gegenübergestellt werden (Abb. 18). Bei spiegelbildlicher Darstellung ist gut zu erkennen, dass die Wahrscheinlichkeit von Ertragsausfällen vom Versorgungsniveau an organischer Substanz abhängt. Entsprechend dem Gesetz vom abnehmenden Ertragszuwachs führen in Folge eines steigenden Versorgungsniveaus mit organischer Substanz zusätzliche Maßnahmen zur Erhöhung des Versorgungsgrades zu immer kleiner werdenden Ertragseffekten (Abb. 18).

Im Bereich einer ausgeglichenen Humusbilanz wird ein optimales Ertragsniveau mit hoher Wahrscheinlichkeit sichergestellt. Bei hohen Fehlbeträgen an organischer Substanz (≤ -200 kg

HÄQ/ha = Versorgungsstufe A) nehmen die Ertragsausfälle deutlich zu, so dass durch zusätzliche Maßnahmen, die eine Verbesserung des Versorgungsniveaus mit organischer Substanz bewirken (organische Düngung, günstige Fruchtfolge-Zusammensetzung), die Erträge der Fruchtarten auch um 50–150 % ansteigen können. Liegt bereits ein hohes Versorgungsniveau vor ($\geq +300$ kg HÄQ/ha = Versorgungsstufe E), so führen zusätzliche Maßnahmen zu keinem Ertragsanstieg und es wird ein maximales Ertragsniveau erreicht (Abb. 18).

Untersuchungen zum Versorgungsniveau mit organischer Substanz

Im Bereich der Humusversorgung kann als Maßzahl der Versorgungsgrad mit organischer Substanz herangezogen werden, der mit dem Erstellen und der Bewertung von Humusbilanzen kontrolliert werden kann. Aktuelle Untersuchungen unter Nutzung von Daten aus statistischen Jahrbüchern, Dauertestflächen und

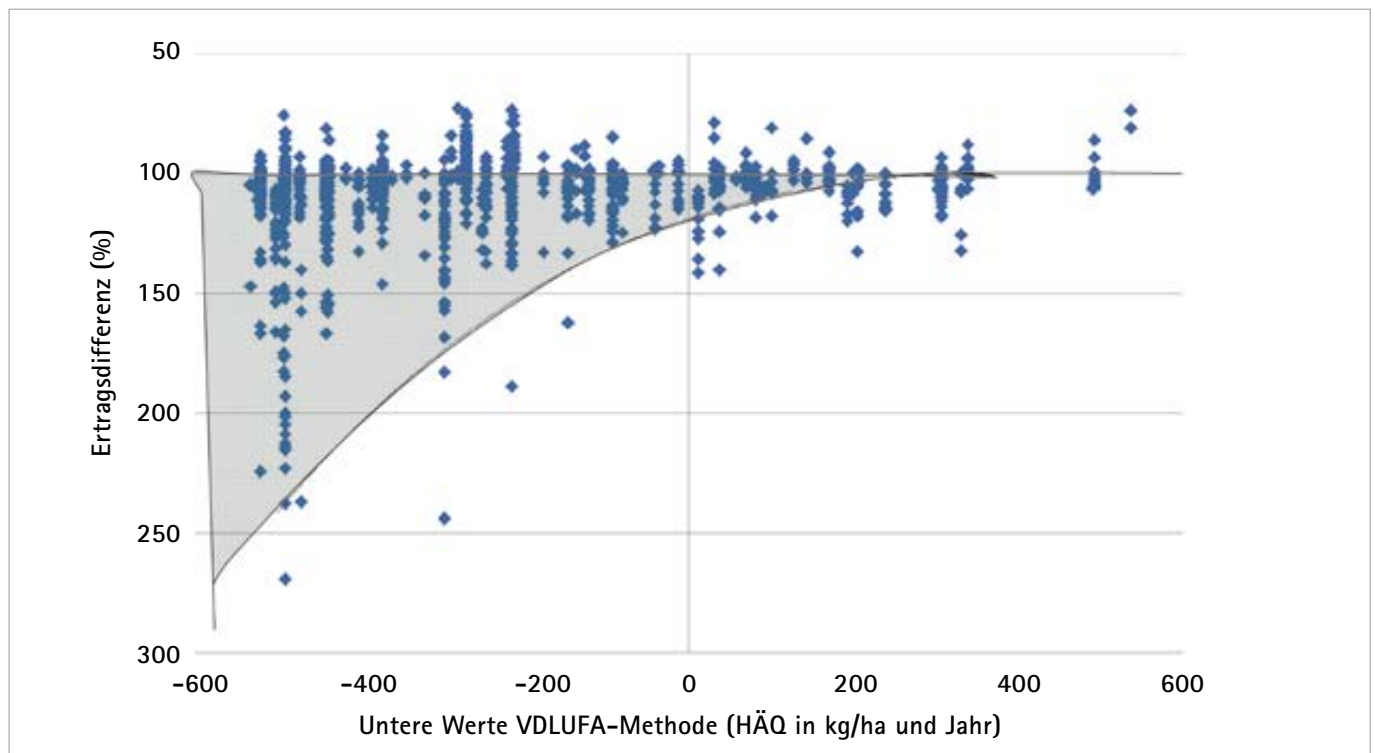


Abbildung 18: Einfluss der Versorgungshöhe mit organischer Substanz (Humusbilanz in HÄQ) auf die Ertragssicherheit der Fruchtarten nach zusätzlichen Bewirtschaftungsmaßnahmen (Fruchtfolge, organische Düngung) (Quelle: Über 1.000 Ertragsvergleiche ermittelt aus Dauerversuchen nach KOLBE, 2012; abnehmender Ertragszuwachs der Fruchtarten durch spiegelbildliche Ertragsdifferenzen dargestellt, 100 % = Ertragsmaximum)

landwirtschaftlichen Betrieben haben gezeigt, dass der Versorgungsgrad der Betriebe und ganzer Regionen mit organischer Substanz deutliche Unterschiede aufweist (Tab. 20). Die Ergebnisse sind zudem von der Datenquelle, von den vorherrschenden Betriebssystemen und insbesondere von der vorhandenen und berücksichtigten Tierhaltung abhängig.

Die Hälfte bis Dreiviertel der untersuchten Flächen und Gebiete sind optimal bis gut mit organischer Substanz versorgt (Versorgungsgruppen C–D). In Regionen und Betriebssystemen mit geringerer Tierhaltung, wie z. B. in Sachsen, werden höhere Flächenanteile mit einer Unterversorgung und vergleichsweise niedrigere Anteile mit einer Überversorgung an organischer Substanz gefunden als in Regionen, die durch eine hohe Tierhaltung gekennzeichnet sind. In diesen Regionen sind unterversorgte Flächenanteile um 15 % üblich (Tab. 20).

Durch den teilweise erheblichen Zukauf an Futtermitteln als Ursache für einen hohen Anfall an organischen Düngemitteln aus der Tierhaltung, können mit organischer Substanz sehr hoch versorgte Flächen und Betriebe entstehen, die durch eine extrem schiefe Verteilung der Ergebnisse der Humusbilanzierung gekennzeichnet sind. Landwirtschaftliche Betriebe mit Luxusversorgungsanteilen zwischen 85–95 % sind heute nach diesen Untersuchungen keine Seltenheit mehr (Tab. 20).

Im Rahmen zunehmender Differenzierung der Landbewirtschaftung kann es daher zu immer einseitigeren Formen der Ausgestaltung der pflanzlichen und tierischen Produktionsrichtungen kommen, die zu unausgeglichene Bilanzen der landwirtschaftlichen Betriebe mit organischer Substanz und auch mit anderen Nährstoffen führen können. Es treten sowohl Zustände permanenter Unterversorgung als auch eine Überversorgung mit diesen Stoffen auf, die auf lange Sicht sowohl die Bodenfruchtbarkeit als auch die Wettbewerbsfähigkeit der Betriebe gefährden und zu Problemen im Umweltschutz ganzer Regionen führen können.

Je nach Region und Betriebssystem ist der Fokus der Humusbilanzierung also sowohl auf die Behebung von einem Mangel als auch von starker Überversorgung zu richten. Ziel dieser Bemühungen ist es, dass mittelfristig ein optimales Niveau der Versorgungsstufe C mit organischer Substanz angestrebt und auf Dauer gehalten wird.

Unterversorgung

Nachfolgend werden wichtige Ursachen und Kennzeichen sowie Folgen einer unzureichenden Versorgung mit organischer Substanz aufgeführt.

Kennzeichen einer Unterversorgung mit organischer Substanz:

- Kann an den aktuellen Humusgehalten des Bodens in der Regel nicht abgelesen werden (siehe Kap. 3).
- Verstärktes Auftreten in Marktfruchtbetrieben mit einseitigen Fruchtfolgen durch hohen Humuszehrer-Anbau (Hackfrüchte, Feldgemüse, Silomais, Energiefruchtfolgen).
- Aberntung bzw. Verkauf aller Koppelprodukte z. B. zur Energiegewinnung (Silomais, Ganzpflanzensilage (GPS), Zuckerrüben mit Blattabfuhr, Getreide mit Strohabfuhr).
- Keine bzw. permanent zu geringe Zufuhr organischer Düngemittel und Rückführung von Gärresten (z. B. Biogasgülle).
- Standorte mit erhöhtem Humusumsatz und -abbau (hohe Umgebungstemperaturen, schwerere Böden mit engen C/N-Verhältnissen, entwässerte Moorstandorte).
- Örtlich ausweisbare Flächenbereiche mit hohem Gefährdungspotenzial (Wasser-, Winderosion, Überflutung, Schlagkuppen, vernachlässigte organische Düngung auf hoffernten Flächen, Folgen von Meliorationsmaßnahmen wie z. B. Tiefpflügen, starke Kalkung, Entwässerung, Drainage, Landnutzungsänderungen durch Umbruch von Grünland, Aufgabe der Tierhaltung, etc.).

Folgen der Unterversorgung sind oft nicht unmittelbar sichtbar bzw. geben sich erst nach langer Zeit zu erkennen durch:

- Abnahme der umsetzbaren organischen Substanz und Abnahme der C_{org} -Gehalte des Bodens der betroffenen Flächen auf lange Sicht (Jahrzehnte).

Tabelle 20: Relative Verteilung von Ergebnissen zur Humusbilanzierung auf die VDLUFA-Versorgungsgruppen (in %), ermittelt aus verschiedenen Untersuchungen auf Basis der unteren Werte der VDLUFA-Methode

Datenbasis, Quelle	Humusversorgungsgruppe ¹⁾					Unterversorgung (A + B)	Überversorgung (D + E)
	A	B	C	D	E		
Landkreise Deutschland (n = 364) ZELLER et al. (2012)	0	0,3	4	46	50	0,3	96
Betriebe (n = 385) BREITSCHUH & GERNAND (2010)	1	1	11	45	42	2	87
Betriebe (n = 227) HÜLSBERGEN zit. n. VOGT-KAUTE (2011)	1	1	28	42	29	2	71
Sachsen, Dauertestflächen (n = 760) SEIBT (2007)	4	11	46	26	13	15	39

¹⁾ Humusversorgungsgruppen im konventionellen Landbau (siehe Tab. 10)

- Abnehmende Krümel- bzw. Aggregatstabilität und geringe Tragfähigkeit des Bodens (z. B. beim Überfahren).
- Sowohl geringe Wasserinfiltration und Wasserkapazität (-haltefähigkeit) des Bodens.
- Neigung zu Verschlammung und Erosion.
- Geringes Bodenleben (Regenwürmer, mikrobielle Biomasse, »toter Boden«).
- Geringe potenzielle Mineralisation (N, P, S) und abnehmende Nährstoffeffizienzen.
- Geringe Pufferkapazität für Nährstoffe, geringe Kationenaustauschkapazität (KAK).
- Abnehmende Ertragsfähigkeit (siehe Abb. 18).

In der Summe beruhen die Ursachen und Kennzeichen einer zu niedrigen Versorgung mit organischer Substanz in einer Abnahme der umsetzbaren organischen Substanz bzw. der Gehalte an Humusstoffen des Bodens, die zu einer ungünstigen Veränderung von vielen Eigenschaften der Bodenfruchtbarkeit führt (siehe auch Tab. 1).

Beispiele

In der Tabelle 21 wurden Berechnungen zur Humusbilanzierung von drei weit verbreiteten Anbausystemen mit Hilfe der STAND-Methode erstellt. Auch in dieser Gegenüberstellung sind von links nach rechts bis zum Standort 6 (STG 6) die Böden entsprechend steigender Bonität und deutlich ansteigender Ertragsfähigkeit ausgewiesen worden (Basis siehe Tab. 7). Beim ersten Beispiel handelt es sich um einen viehlosen Betrieb mit Anbau von Körnerfrüchten (100%iger Getreideanbau mit verschiedenen Arten und Abfuhr des gesamten Strohaufkommens).

Das zweite Beispiel (Tab. 21) repräsentiert einen Marktfruchtbetrieb mit ausgedehntem Hackfruchtanbau von 50 % der Fruchtfolge. Es können auch andere Hackfrüchte, wie z. B. Zuckerrüben oder Fruchtarten des Feldgemüseanbaus mit vergleichbaren Humifizierungskoeffizienten zum Anbau kommen. In diesem Betrieb stehen organische Düngemittel nicht zur Verfügung. Der dritte Betrieb setzt auf Fruchtarten zur Energieerzeugung (Tab. 21). In den Anbausequenzen werden Konzepte mit hohem Umfang an Fruchtarten realisiert, die zur Energieerzeugung Verwendung finden und somit vollständig vom Feld abgeerntet werden. Teilweise findet eine Gärsubstratgewinnung statt, wodurch die Biogasgülle wieder als Düngemittel auf den Flächen ausgebracht werden können. Bei der Anbaukombination aus 50 % Silomais, 25 % Zuckerrüben und 25 % Getreide-Ganzpflanzensilage (GPS) werden alle Koppelprodukte vom Feld abgeerntet und es erfolgt keine Rückführung in Form von Gärsubstraten oder ähnlichen Düngemitteln.

In ihren extremen Ausformungen können in allen drei Systemen in Abhängigkeit vom Standort deutlich defizitäre Humusbilanzen der Versorgungsstufen B und A auftreten. Bei Fortführung von diesen Anbausystemen wird es auf lange Sicht zu einer deutlich ausgeprägten Abnahme der Humusgehalte und der Bodenfruchtbarkeit auf allen hier dargestellt Standorten kommen. Negative Auswirkungen sind hierdurch auch auf die Bodenstruktur, die Nährstoffbereitstellung und die Kationen-Austauschfähigkeit der Böden zu erwarten.

Verbesserungsstrategien

Liegen defizitäre Humusbilanzen der VDLUFA-Versorgungsgruppen B und A vor, sollten unter Beachtung von Standortunterschieden nachfolgend genannte Verbesserungsstrategien ins Auge gefasst werden.

Beachtung von Standortunterschieden

Auf Standorten mit niedrigem Humusumsatz (Sandböden mit weiten C/N-Verhältnissen, Schwarzerden, Bergstandorte mit

Tabelle 21: Humusbilanzen (HÄQ in kg/ha u. Jahr) inklusive Versorgungsgruppen (A – C) von Fruchtfolgebeispielen und Betriebssystemen unterschiedlicher Standorte mit stark defizitärem Versorgungsniveau an organischer Substanz (Quelle: KOLBE, 2013a)

Standortgruppe (STG):	STG 1	STG 2	STG 3	STG 4	STG 5	STG 6
Marktfruchtbetrieb mit Anbau von Körnerfrüchten						
Betriebssystem mit: 100 % Getreide und Strohabfuhr	-30 C	-130 B	-230 A	-180 B	-280 A	-420 A
Marktfruchtbetrieb mit Schwerpunkt Hackfruchtanbau						
Fruchtfolge: 25 % Kartoffeln 25 % Z.-Rübe mit Blattverbleib 50 % Getreide mit Strohabfuhr	-242 A	-341 A	-440 A	-387 A	-484 A	-618 A
Energiefruchtfolge mit Silomais						
Anbauverfahren mit: 50 % Silomais 25 % Hackfrucht und Blattabfuhr 25 % Getreide-GPS	-290 A	-390 A	-490 A	-440 A	-540 A	-680 A

niedrigen Temperaturen, Tonböden) ist der Abbau von organischer Substanz am geringsten ausgeprägt. Deshalb ist auf diesen Standorten ein geringerer Aufwand an Ausgleichsmaßnahmen erforderlich, als in Gebieten mit höheren Durchschnittstemperaturen und Böden mit engen C/N-Verhältnissen (z.B. STG 6, schluffige Lehme; siehe Tab. 21).

Nebenprodukt-Management

In getreidebetonten, aber auch in hackfrucht-betonten viehlosen Anbausystemen fallen erhebliche Mengen an Nebenprodukten in Form von Stroh und anderen Koppelprodukten an. Von den humusmehrenden Komponenten der Humusbilanzen beruhen hierbei oft über 50–90 % auf dem anfallenden Stroh, insbesondere der klassischen Getreidearten. Der humusmehrende Wert von verschiedenen Nebenprodukten ist in Abhängigkeit vom Ertragsniveau des Standortes folgendermaßen anzusetzen:

- Getreidestroh 3,2 – 7,2 t/ha: 217 – 489 kg HÄQ/ha u. Jahr
- Rapsstroh 4,3 – 8,5 t/ha: 292 – 577 kg HÄQ/ha u. Jahr
- Körnermais-Stroh 7,5 – 11,0 t/ha:
niedriger Wert (41,3 kg HÄQ/t) 310 – 454 kg HÄQ/ha u. Jahr
hoher Wert (83,4 kg HÄQ/t) 626 – 917 kg HÄQ/ha u. Jahr
- Zuckerrüben-Blatt 35,0 – 52,5 t/ha:
niedriger Wert (1,0 kg HÄQ/t) 35 – 53 kg HÄQ/ha u. Jahr
mittlerer Wert (3,2 kg HÄQ/t) 112 – 168 kg HÄQ/ha u. Jahr
- Zwischenfrucht-, Untersaat- und Klee gras-Aufwüchse
10 – 30 t/ha:
mittlerer Wert 10 % TM
(3,2 kg HÄQ/t) 32 – 96 kg HÄQ/ha u. Jahr
hoher Wert 20 % TM
(11,0 kg HÄQ/t) 110 – 330 kg HÄQ/ha u. Jahr.

Als Faustzahlen für eine Abfuhrbegrenzung gilt es, nicht mehr als 50 % des Strohanfalls abzufahren (auf umsatzstarken Standorten 25 %, auf umsatzträgen Standorten 75 % des Aufkommens).

Integration von humusmehrenden Zwischen- und Hauptfrüchten in die Anbausequenz

In Abhängigkeit vom Standort können folgende humusmehrende Beträge durch Zwischen- und Hauptfrüchte angerechnet werden:

- Stoppelfrüchte:
(inkl. 15 t/ha Gründüngung) -10 – 380 kg HÄQ/ha u. Jahr
- Winterzwischenfrüchte:
(inkl. 20 t/ha Gründüngung) 40 – 434 kg HÄQ/ha u. Jahr
- Untersaaten:
(inkl. 15 t/ha Gründüngung) 108 – 498 kg HÄQ/ha u. Jahr

- Körnerleguminosen inkl. Stroh:
(2,0 – 5,0 t/ha Korn) 20 – 410 kg HÄQ/ha u. Jahr
- Futterleguminosen, Ackergras:
Ansaatzjahr 260 – 650 kg HÄQ/ha u. Jahr
Hauptnutzungsjahr 460 – 850 kg HÄQ/ha u. Jahr.

Eine weitere, sehr effektive Möglichkeit zur Aufbesserung defizitärer Humusbilanzen besteht in der Integration einer Zweitfrucht in Form der Zwischenfrucht, da die bestehenden Fruchtfolgen hierzu nicht verändert oder angepasst werden müssen. So können durch den Anbau von Zwischenfrüchten z. B. in Form der Untersaat in Energiefruchtfolgen mit hohen Maisanteilen ungünstige Humusbilanzen soweit aufgebessert werden, dass ausgeglichene Salden auf Dauer gewährleistet werden.

Stark mit organischer Substanz unterversorgte Fruchtfolgen beruhen oft auf dem Anbau weniger Fruchtarten, die zudem aus dem Spektrum stark humuszehrender Arten stammen. Hierbei können ausgeglichene Humussalden oft nur noch erreicht werden, wenn die z. T. sehr verarmten und einseitigen Anbausequenzen durch Fruchtarten aufgelockert und ergänzt werden, die selber bereits durch eine deutlich positive Humuswirkung gekennzeichnet sind (Humusmehrer). Es sollte darauf geachtet werden, dass die Anbausequenzen möglichst auf jedem Acker Schlag ein Minimum von 3 Fruchtarten nicht unterschreiten und eine Art dem Spektrum der Humusmehrer zuzuordnen ist.

Integration organischer Düngemittel

Von der verfügbaren Palette an angebotenen organischen Düngern sind diejenigen am besten geeignet, die bei Berücksichtigung der Gesamtkosten (inkl. der verhältnismäßig geringen Transportkosten) neben dem Nährstoffwert durch eine möglichst hohe Humuswirksamkeit gekennzeichnet sind. Hierzu tragen insbesondere nachfolgende feste organische Düngemittel bei:

- Geflügelkot (je nach TM-Gehalt) ca. 12 – 38 kg HÄQ/t FM
- Frischmist, Gärrückstand fest ca. 20 – 45 kg HÄQ/t FM
- Frischkomposte ca. 30 – 65 kg HÄQ/t FM
- Stroh ca. 40 – 100 kg HÄQ/t FM
- Fertigkomposte, Rindenkomposte ca. 40 – 95 kg HÄQ/t FM.

Die flüssigen organischen Düngemittel weisen dagegen im Verhältnis zur transportierten Substratmenge deutlich geringere Humuswirkungen auf:

- Rinder- u. Schweinegülle, Gärrückstände
(je nach TM-Gehalt) ca. 3 – 12 kg HÄQ/t FM.

Auf Grund der günstigen Humuswirkung reicht es in der Regel entsprechend den in Tab. 21 angegebenen defizitären Beispielen aus, in zwei bis drei Fruchtfolgerotationen mit einer organischen Düngung nach folgendem Muster zu verfahren, um einen ausgeglichenen Humussaldo zu erhalten: 1×30 t/ha feste organische Düngemittel = 600 – 2.000 kg HÄQ/ha. Oft ist es auch möglich, einen Teil der im Betrieb durchzuführenden mineralischen Düngungsmaßnahmen mit organischen Düngemitteln abzudecken.

Übersorgung

Wichtige Kennzeichen und Folgen einer Übersorgung mit organischer Substanz bestehen aus folgenden Elementen:

Ursachen und Kennzeichen:

- Kann in der Regel an den aktuellen Humusgehalten der betreffenden Ackerschläge nicht erkannt bzw. abgelesen werden.
- Die durchschnittlichen Fruchtfolgen und Anbausequenzen enthalten hohe Anteile mit humusmehrenden Bestandteilen (organische Dünger, Humusmehrer-Fruchtarten).
- Hoher Anfall organischer Dünger aus intensiver, zunehmend nicht flächengebundener Tierhaltung.
- Getreideanbau ohne nennenswerte Strohabfuhr verbunden mit intensiver Tierhaltung auf Güllebasis.
- Standorte mit geringem Humusumsatz und relativ hohen Humusgehalten (z. B. Bergstandorte).
- Standorte mit niedrigen Temperaturen, hohen Niederschlägen, weiten C/N-Verhältnissen im Boden.
- Hohe Zufuhr an organischer Substanz über einen langen Zeitraum.
- Hofnahe Flächen bei Vernachlässigung einer gleichmäßigen Verteilung organischer Düngemittel auf alle Betriebsflächen.

Folgen:

- Auf lange Sicht können sowohl positive als auch negative Wirkungen eintreten.
- Zunahme der C_{org} -Gehalte und Verbesserung von wichtigen Bereichen der Bodenfruchtbarkeit (Aggregatstabilität, Wasserinfiltration, Tragfähigkeit, Pufferkapazität, KAK, Ertragsanstieg).

- Bei langer Andauer einer erhöhten Zufuhr an organischer Substanz steigt die Umsetzung und Mineralisation der organischen Substanz stark an, das Ausmaß erscheint oft nicht mehr beherrschbar.
- Es tritt eine deutliche Abnahme der Ressourceneffizienz der organischen Primärsubstanzen ein.
- Die erhöhte Bereitstellung an Haupt- und Spurenelementen kann den Nährstoffbedarf für die Ertragsbildung und Nährstoffabfuhr über die Ernten bei weitem übertreffen.
- Anreicherung von Nährstoffen im Boden, die nicht zur Auswaschung neigen (z. B. Phosphor, einige Mikronährstoffe), teilweise auch Anreicherung von Schadstoffen (z. B. Schwermetalle).
- Auf lange Sicht Zunahme eines Gefährdungspotenzials (Nährstoffbilanzen, hohe Nährstoff- und Schadstoffkonzentrationen mit potenziell toxischen Wirkungen).
- Zunahme von Nährstoffverlusten durch Auswaschung, Ausgasung, zunehmende negative Auswirkungen auf angrenzende Umweltmedien und -kompartimente (Grundwasser, Oberflächengewässer, Luftqualität, Treibhausgasemissionen, natürliche und naturnahe Ökosysteme).

Beispiele

Der Versorgungsgrad mit organischer Substanz kann besonders leicht auf Betrieben zunehmen, die in eine Veredlungswirtschaft investiert haben. In Tabelle 22 kann dies an drei Fruchtfolgen mit steigender Schweineproduktion von 1,5 GV/ha bis auf ungefähr 3,6 GV/ha (unabhängig von bestehenden gesetzlichen Beschränkungen) veranschaulicht werden (Basis siehe Tab. 7). Oft führen diese Betriebe zusätzlich eine intensive Getreideproduktion durch, wobei das Korn als Futter im eigenen Betrieb verwertet wird. Dagegen besteht keine Verwendungsmöglichkeit für das Stroh, da sie meistens Flüssigmistsysteme betreiben und die anfallende Gülle ebenfalls im eigenen Betrieb verwenden. Bei mittleren Viehbesatzstärken von 1,5 GV/ha (Tab. 22: 1. Anbauabfolge) werden durchweg hohe positive Humussalden auf allen Standorten erreicht, die der Versorgungsgruppe D zugeordnet werden. In diesen Systemen werden jedes Jahr bis zu 50 % der Flächen mit Gülle gedüngt. Eine bedarfsgerechte Düngung kann noch weitgehend aufrechterhalten werden. Auf Dauer können günstige Auswirkungen auf die Bodenfruchtbarkeit erwartet werden. Auch die erosionsverringende Wirkung der Strohaufgaben ist zu bedenken. Bei weiter ansteigender Güllendüngung wird das Aufkommen an organischer Substanz auf den Betrieben derart erhöht, dass in den Humusbilanzen fast durchweg E-Versorgungsgrade erreicht werden (Tab. 22: 2. u. 3. Anbauabfolge). Diese intensiven Schweinemastbetriebe sind dadurch gekennzeichnet, dass sie die anfallende organische Substanz aus dem Strohaufkommen und der Güllewirtschaft nicht mehr sinnvoll im eigenen Betrieb verwerten können.

Tabelle 22: Humusbilanzen (HÄQ in kg/ha u. Jahr) inklusive Versorgungsgruppen (D–E) von Fruchtfolgebeispielen mit Getreideanbau und Schweinehaltung auf unterschiedlichen Standorten mit starker Überversorgung an organischer Substanz (Quelle: KOLBE, 2013a)

Standortgruppe (STG):	STG 1	STG 2	STG 3	STG 4	STG 5	STG 6
Anbauabfolge mit einem Tierbesatz von 1,5 GV/ha						
50 % Getreide mit Strohverbleib u. Gülledüngung	292	214	169	277	227	103
25 % K.-Mais mit Strohverbleib	D	D	D	D	D	D
25 % Getreide mit Strohverbleib, W.-Zwischenfrucht u. Gründüngung						
Anbauabfolge mit einem Tierbesatz von 2,5 GV/ha						
75 % Getreide mit Strohverbleib u. Gülledüngung	361	291	263	380	353	232
25 % Getreide mit Strohverbleib, W.-Zwischenfrucht u. Gründüngung	E	D	D	E	E	D
Anbauabfolge mit einem Tierbesatz von bis zu 3,6 GV/ha						
100 % Getreide mit Strohverbleib u. Gülledüngung	491	396	358	487	450	294
2 × W.-Zwischenfrucht u. Gründüngung	E	E	E	E	E	D

Dem Problem von zu hohen Humussalden kommt erst in letzter Zeit eine höhere Aufmerksamkeit zu, nachdem nicht nur aus Ergebnissen von Dauerversuchen, sondern auch von Dauertestflächen der Praxis relativ enge positive Beziehungen zwischen den Humus- und Nährstoffsalden des Ackerbaus abgeleitet werden konnten (KOLBE, 2012). Dies hat insbesondere dann eine Bedeutung, wenn in ein bis zwei Jahrzehnten die Anreicherungsphase an Humusstoffen und damit auch an Nährstoffen im Humus des Bodens beendet ist. Unter Beibehaltung sehr hoher Humussalden steigen dann mit der Zeit die Umsetzung des Humus und damit auch die Freisetzung von Nährstoffen deutlich an (siehe Kap. 1). Diese Nährstoffmengen können leicht das zur Ertragsbildung nötige Maß übersteigen und erhöhen durch Anreicherung im Boden oder Verlagerung und Auswaschung das Potenzial an Nährstoffverlusten. Auch werden in diesen Nutzungssystemen zusehends Probleme bei der Einhaltung gesetzlicher Vorgaben z. B. aus der Düngeverordnung auftreten. Auch ein Zuviel an organischer Bodensubstanz kann daher schädlich sein.

Auf Basis der langjährigen Fruchtfolge mit 3,6 GV/ha wurde mit Hilfe des Modells CCB (siehe Kap. 4) die zu erwartende jährliche Mineralisation an Stickstoff berechnet, die nicht nur von der aktuellen Bewirtschaftung und Düngung sondern aus den bis zu 30 Jahre zurückliegenden Bewirtschaftungsmaßnahmen stammen können (Abb.19). Von Rotation zu Rotation schaukelt sich ein immer höheres Potenzial an umsetzungsfähiger organischer Substanz auf, bis sich nach ca. 20–30 Jahren ein Gleichgewicht zwischen Zufuhr und Mineralisation an Stickstoff auf hoher Basis einstellt. Aus dem Beispiel geht hervor, dass dieses Anbausystem mit der Zeit eine jährliche Mineralisation von über 300 kg N/ha und damit ein Vielfaches des durchschnittlichen N-Entzuges aufweisen kann.

Dies kann passieren, obwohl die Düngebedarfsermittlung weitgehend nach geltenden Verfahren abgewickelt wird (N_{\min} -Methode, Anrechnung des NH_4 -N bzw. Anrechnung der organischen Düngemittel entsprechend Mineraldüngungsäquivalenten,

MDÄ). Diese Systeme funktionieren recht gut, wenn organische Düngemittel aktuell aus dem Applikationsjahr (Abb.19: ca. 45 kg N/ha) und aus dem Vorjahr an Nachlieferung (ca. 24 kg N/ha) anzurechnen sind. Wie aus dem Beispiel jedoch zu ersehen ist, müssen die Stickstoffmengen aus der Nachlieferung in einem weit höheren Ausmaß angerechnet werden.

Daher erlangen Verfahren, durch die diese aus vielen Jahren stammende Nachlieferung bzw. in denen der Stickstoff auf Gesamt-N-Basis angerechnet wird, zur Verbesserung der Düngebedarfsermittlung in Zukunft eine höhere Bedeutung. In Bezug auf die Humusversorgung sollten im Durchschnitt der Fruchtfolgen keine Humussalden auf Dauer akzeptiert werden, die über der Versorgungsgruppe D liegen, da hierdurch dann auch erhöhte Stickstoffverluste, abnehmende N-Effizienzen und weitere ungünstige Umweltwirkungen verhindert werden können.

Verbesserungsstrategien

Günstige Kombinationen zwischen humusmehrenden und -zehrenden Komponenten anstreben

In den Humusbilanzen sind günstige Kombinationen durch ein relativ ausgeglichenes Verhältnis zwischen den Humuszehrerinnen auf der einen Seite und den humusmehrenden Komponenten auf der anderen Seite gekennzeichnet. Immer dann, wenn der Anteil an Humuszehrerinnen in den Bilanzen ungefähr 2/3 der Gesamtwerte übersteigt, werden ungünstige Einstufungen der Versorgungsgruppen B (–A) ermittelt. Auf der anderen Seite wird in Folge eines steigenden Versorgungsgrades mit organischer Substanz die Gruppe D erreicht, wenn die Humuszehrer 1/3 des Gesamt-Versorgungsbereichs unterschreiten (siehe Kap. 7).

N-Bindung durch Stroh ist nur begrenzt nutzbar

In den Betrieben dient das Stroh auch dazu, den verfügbaren Stickstoff aus der Güllezufuhr kurzfristig zu binden. Es ist hierbei jedoch zu bedenken, dass bei insgesamt zu hoher Zufuhr auf

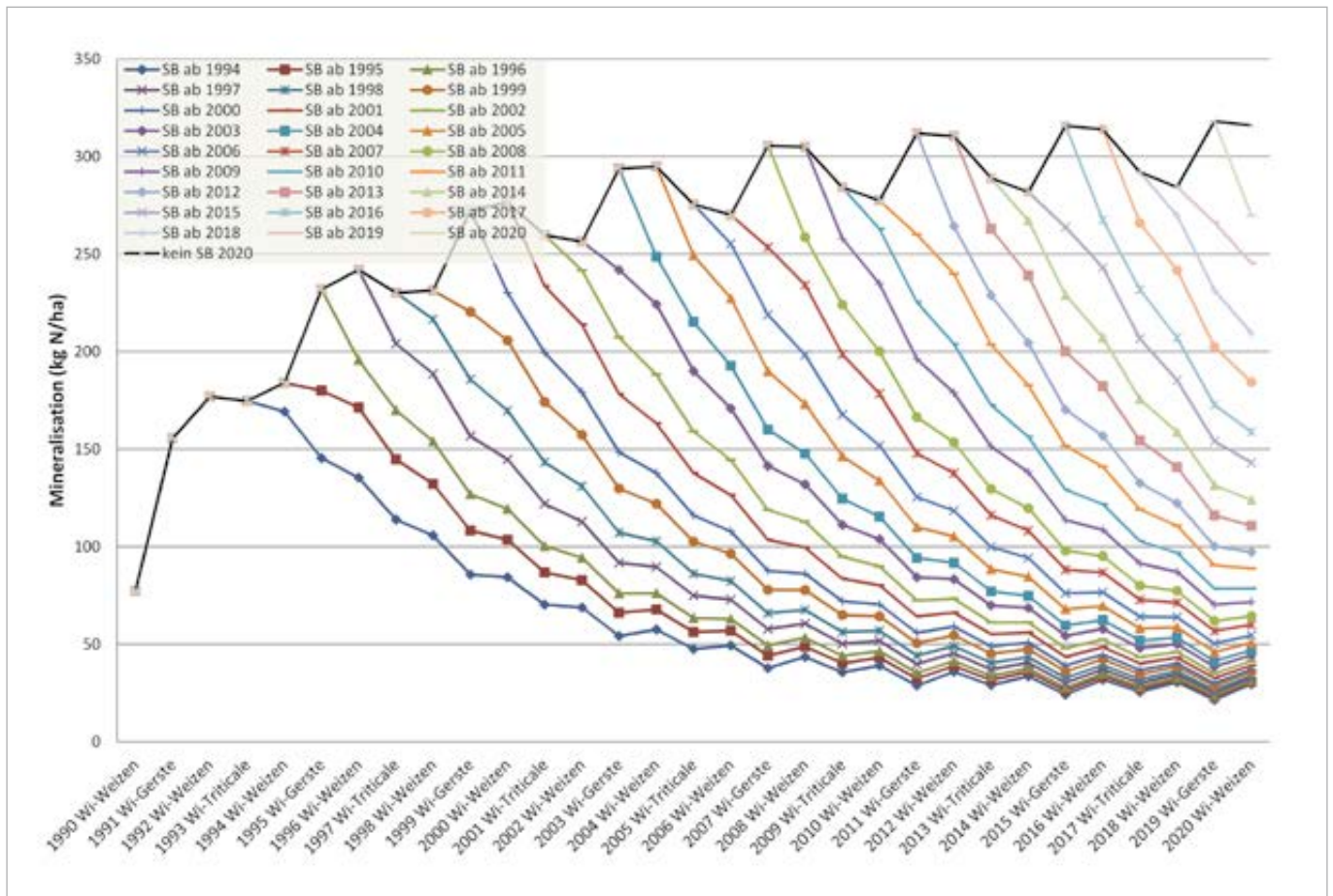


Abbildung 19: Einfluss einer Fruchtfolge mit hoher organischer Düngung mit Schweinegülle entsprechend ca. 3,6 GV/ha auf Standorten mit sandigem Lehm (Tab. 22: STG 5) auf die aktuelle und jährlich nachwirkende Stickstoff-Mineralisation durch Simulation von jeweils um 1 Jahr verzögerten Beginn einer Schwarzbrache (SB) berechnet mit dem Modell CCB (Quelle: KolBE, LFULG)

lange Sicht gesehen diese N-Festlegung nicht erhalten bleibt und es sogar zu einer verstärkten Freisetzung an Stickstoff kommen kann. Aus weiteren Berechnungen mit dem Modell CCB konnte ermittelt werden, dass in dem o.a. Beispiel (Abb. 19) durch eine simulierte Strohabfuhr es nur in den ersten 10–15 Jahren zu einer z.T. deutlich verstärkten N-Mineralisation durch die unveränderte Güllezufuhr kommt, während in der nachfolgenden Zeitperiode keine Unterschiede in dem Mineralisationsaufkommen zwischen den Gölledüngungssystemen mit und ohne Strohabfuhr bestehen. Auf lange Sicht führt zusätzliche Strohdüngung zu einem Anstieg der Humusgehalte. Die N-Freisetzung durch die Mineralisation ist aber weitgehend gleich hoch (Stroh = C-reiches u. N-armes organisches Material).

Außerbetriebliche Strohverwertung

Durch die außerbetriebliche Strohverwertung kann in den o.a. Beispielen (siehe Tab. 22) die Versorgungslage um 217–489 kg HÄQ/ha entlastet werden, was die Bilanzen auf vielen Standorten in der Weise verbessern kann, dass die Versorgungsgruppe E unterschritten wird. In Systemen mit extrem hohem Versorgungsniveau mit organischer Substanz kann die außerbetriebliche Verwertung des Strohs entscheidend zur Entlastung des Humussaldos beitragen. Eine Entlastung der Überversorgung mit Stickstoff gelingt hierdurch jedoch kaum.

Günstige Standortwahl

Nach diesen Ergebnissen kann eine intensive Schweineproduktion auf den umsetzungsstarken Standorten viel leichter etabliert werden, als auf den anderen Standorten. Diese Regionen sind deshalb besonders prädestiniert, weil die Humuszehrer (und das Stroh bei Abfuhr) eine relativ höhere Bedeutung aufweisen. Gleichzeitig sorgt das hohe Ertragspotenzial dieser Böden für eine sinnvolle Nutzung der anfallenden Mengen an organischen Düngern (Gülle) (siehe Tab. 22: STG 6).

Tierhaltung auf optimale Bestandsgrößen begrenzen

In viehhaltenden Betrieben ist es in der Regel einfacher, einen günstigen Humusspiegel aufrecht zu halten. Eine Tierhaltung zwischen 0,7–2,0 GV/ha kann für die meisten Standorte als optimal angesehen werden. Bei zu hohem Viehbesatz kommt es dagegen leicht zu einer Überversorgung mit organischer Substanz.

Anwendung verbesserter Verfahren zur Düngungsbemessung

Entsprechend dem Nährstoffanfall aus organischen Düngemitteln ist gegebenenfalls auch auf eine mineralische Düngung zu verzichten, um eine Überversorgung mit bestimmten Nährstoffen auf Dauer zu verhindern. In diesen Betrieben ist zudem die

mineralische NPK-Düngung weitgehend als Ausgleichsdüngung zu bemessen. Es sollten Verfahren zur Anwendung kommen, bei denen die Stickstoffbemessung auf Gesamt-N-Basis und zudem die N-Nachlieferung aus der jährlichen Mineralisation aus den zurückliegenden Fruchtfolgerotationen möglichst vollständig berücksichtigt werden kann.

Gezielte Änderung der Fruchtfolgen

Auch auf Flächen mit hoher Nährstoffzufuhr bzw. mit hohem Versorgungsgrad an Grundnährstoffen (Klassen D u. E) und an Stickstoff muss die Zufuhr an organischen Düngemitteln reduziert werden. Dies trifft auch dann zu, wenn entsprechend dem Ergebnis der Humusbilanzierung eigentlich noch ein Bedarf an organischer Substanz vorhanden ist. In diesen Fällen sollten als Fruchtarten die Humusmehrer verstärkt zum Anbau kommen (Ackergras, Zwischenfrüchte), weil hierdurch eine Erhöhung der organischen Substanz stattfindet, ohne dass eine Zufuhr an Nährstoffen erfolgt. Auch eine Stärkung der Getreidearten zu Lasten der Hackfrüchte und Mais in der Fruchtfolge erfüllt diese Aufgabe. Steht Stickstoff nicht im Überfluss zur Verfügung, so kann der Humusspiegel auch durch Anbau von Futter- und Körnerleguminosen aufgebessert werden.

Außerbetriebliche Verwertung nährstoffreicher organischer Düngemittel

Bei einem deutlichen Überhang an nährstoffreichen organischen Düngemitteln sollten Wege einer außerbetrieblichen Verwertung geprüft werden. Dies kann z. B. durch Tausch mit nachgefragten anderen Produkten im Kreis der Nachbarbetriebe organisiert werden. Zur Nutzung im großen Umfang sind aber auch Verwertungslinien durch Trocknung und Mischung zu Düngemitteln und anderen Produkten mit spezieller Zusammensetzung und Verwertung in der technischen Prüfung.

11 Besonderheiten des Ökologischen Landbaus

Der Ökologische Landbau ist ein Bewirtschaftungssystem, in dem die Anbaugrundsätze im Pflanzenbau und die Tierhaltungsformen sich stärker an den natürlichen Grundlagen orientieren und im Rahmen einer Prozesskontrolle laufend überprüft werden (ANON., 2007). Auf den Gebrauch leicht löslicher Mineraldüngemittel und synthetischer Pflanzenschutzmittel wird weitgehend verzichtet, demgegenüber stehen die Schonung der Bodenfruchtbarkeit und Stärkung des natürlichen Kreislaufgeschehens mehr im Mittelpunkt des Handelns.

Auf Grund der äußerst positiven Wirkung des Humus auf die Bodenfruchtbarkeit des Standortes wird im Ökolandbau ein besonderer Wert auf die Versorgung der Böden mit organischer Substanz gelegt. Das Ertragspotenzial ist bei dieser Anbauform mehr oder weniger direkt von der jährlich verfügbaren umsetzbaren organischen Substanz abhängig. Es besteht eine deutlichere Abhängigkeit der Ertragsbildung vom Mineralisierungsumfang an organischer Substanz als im konventionellen Anbau (siehe Tab.1 u. Abb.18).

Entsprechend dem geringeren Intensivierungsniveau wird im Ökolandbau zwar allgemein ein niedrigeres Ertragsniveau der Fruchtarten erreicht. Zu den Zielmerkmalen gehört jedoch ebenfalls die Erreichung und Sicherung eines optimalen Ertragsniveaus. Daher sind die Inhalte der meisten in dieser Broschüre behandelten Themen in der Regel für beide Anbausysteme in gleicher Weise gültig oder anwendbar. Zur Bemessung des Versorgungsgrades sind daher auch Verfahren zur Humusbilanzierung und zur Berechnung des Humusumsatzes geeignete Werk-

zeuge zum Nährstoffmanagement. Das trifft auch für die Auswahl der Bilanzierungsmethoden für Humus zu (siehe Tab. 3). Eine Besonderheit liegt in der Handhabung des VDLUFA-Bewertungssystems. Da im Ökolandbau insbesondere auf die Zufuhr mineralischer N-Düngemittel verzichtet wird, kann ein höheres Aufdüngungsniveau mit organischer Substanz angestrebt und aus Gründen des Umweltschutzes akzeptiert werden als im konventionellen Landbau. Daher liegen die Begrenzungsstufen für die Versorgungsgruppen C–E auf entsprechend höherem Niveau (siehe Tab.10). Konventionelle Betriebe und andere extensive Anbausysteme, in denen gänzlich auf mineralische N-Düngemittel verzichtet wird, können daher ihre Humusbilanzierung auch nach diesen höheren Grenzen für die Versorgungsgruppen bewerten.

Untersuchungen zum Versorgungsniveau mit organischer Substanz

Für die in der Praxis existierenden Betriebssysteme des Ökolandbaus sind in den letzten 10 Jahren einige Untersuchungen über das Versorgungsniveau mit organischer Substanz bekannt geworden (Tab. 23). Es ist zu erkennen, dass die überwiegenden Anteile an Testflächen und Betrieben eine optimale bis hohe Versorgung mit organischer Substanz aufweisen (Gruppen C u. D). In den meisten Untersuchungen werden zudem nur verhältnismäßig geringe Anteile einer Unterversorgung oder einer deutlichen Überversorgung vorgefunden (Versorgungsgruppe A u. B. bzw. E).

Tabelle 23: Relative Verteilung von Ergebnissen zur Humusbilanzierung auf die VDLUFA-Versorgungsgruppen (in %), ermittelt aus verschiedenen Untersuchungen auf Basis der unteren Werte der VDLUFA- bzw. der STAND-Methode im ökologischen Landbau

Datenbasis, Quelle	Humusversorgungsgruppe ¹⁾					Unterversorgung (A + B)	Überversorgung (D + E)
	A	B	C	D	E		
Sachsen, Dauertestflächen (n = 28) SEIBT (2007)	7	14	57	11	11	21	22
Sachsen, Betriebsflächen (n = 811) SCHMIDTKE et al. (in Vorbereitung)	2	7	49	25	18	9	43
Hessen, Betriebe (n = 15) nach KOLBE (2013 c), verändert	0	6	35	47	12	6	59
Deutschland, Betriebsauswertungen (n = 49) BREITSCHUH & GERNAND (2010), verändert	0	2	39	49	10	2	59

¹⁾ Humusversorgungsgruppen im Ökolandbau (siehe Tab.10)

Trotzdem ist auf diese Anteile extremer Versorgungsgrade mit organischer Substanz hinzuweisen, die aber längst nicht die Ausmaße wie im konventionellen Landbau erreichen (vgl. Kap. 10). Aus diesen Ergebnissen kann eine gewisse regulierende Wirkung durch das Anbausystem erkannt werden, was insbesondere auf einen hohen Grad flächengebundener Tierhaltung und/oder auf eine systematischere Gestaltung der Fruchtfolge hinweist. Im Ökolandbau besteht jedoch immer dann ein bedeutender Handlungsbedarf, wenn eine Unterversorgung festgestellt wird, weil hiervon auf lange Sicht die Bodenfruchtbarkeit durch deutlich negative Ertragsreaktionen in Mitleidenschaft gezogen wird, wovon besonders Marktfruchtbetriebe betroffen sein können.

Einsatz der Humusbilanzierung zur Fruchtfolgegestaltung

Der Anbau von Leguminosen (Kleearten, Luzerne) alleine oder in Kombination vor allem mit den Gräserarten stellt im Ökolandbau ein weit verbreitetes Fruchtfolgeglied dar. Da die Leguminosen zur Luft-N-Bindung befähigt sind, tragen sie zu einer Netto-Zuführung an Stickstoff in den Betriebskreislauf bei. Darüber hinaus sorgen die hohen Ernte- und Wurzelreste insbesondere der Futterpflanzen sowie die durch deren oft mehrjährigen Anbau bewirkte Bodenruhe für eine erhebliche Aufbesserung der Humusbilanzen eines Betriebes. Auf der anderen Seite trägt der Ackerfutteranteil in ausgeprägten Marktfruchtbetrieben nicht direkt zum Betriebseinkommen bei. Daher gibt es in den (viehlosen) Betrieben auch immer Bestrebungen, diesen Anteil möglichst klein zu halten. Die Festlegung eines optimalen Anbauumfanges an diesen Fruchtarten ist daher eine wichtige Aufgabe der Fruchtfolgegestaltung.

In den nachfolgend aufgeführten Beispielen der Tabelle 24 sind Fruchtarten mit stark unterschiedlich hohen Anteilen an Bodenfruchtbarkeit fördernden und abbauenden Elementen kombiniert worden (vgl. Abb. 11). Aus den Ergebnissen ist zu ersehen, dass in weitgehend viehlosen Anbausystemen der optimale Anteil an Leguminosen stark abhängig ist vom natürlichen Ertragspotenzial des Standortes. Erst bei ca. 25 – 30 % Körnerleguminosen bzw. Futterleguminosen (in Kombination mit 25 % Hackfrüchten und 50 % Getreide) kann das untere Ende der Leguminosenanteile in den gewöhnlichen Fruchtfolgen mit

niedrigerem Ertragspotenzial postuliert werden. Auf den meisten Standorten kommt es dagegen bei dieser Anbaukombination noch zu keiner zufriedenstellenden Humusversorgung. Auf den fruchtbaren mittleren bis schweren Böden werden sogar noch z.T. deutlich negative Humusbilanzen berechnet (STG 5 u. 6). Unter der Beibehaltung des Anbauumfanges an Hackfrüchten (Kartoffeln) von 20 % trägt erst die Belassung des gesamten Strohaufkommens aus der Getreideproduktion dazu bei, dass auch auf diesen Böden weitgehend positive Salden erreicht werden (Tab. 24).

Das obere Ende einer sinnvollen Integration von Leguminosen und Gemengen mit Gräsern in der Fruchtfolge wird aus dem zweiten Beispiel sichtbar (Tab. 24). Bei Kombinationen aus 50 % Futterleguminosen, 20 % Hackfrüchten und 30 % Getreide inkl. einem geringen Zwischenfruchtanteil werden auf den meisten Standorten positive Humusbilanzen erreicht. Günstige Kombinationen an Fruchtfolgegliedern sind durch ein relativ ausgeglichenes Verhältnis zwischen den Humuszehrern auf der einen Seite und den humusmehrenden Komponenten auf der anderen Seite gekennzeichnet. Immer dann, wenn der Anteil an Humuszehrern ungefähr 60 % übersteigt, ist ein deutlich ungünstiges Versorgungsniveau mit organischer Substanz festzustellen. Auf der anderen Seite wird ein hohes Niveau erreicht, wenn die Humuszehrer ungefähr 20 % des Gesamtversorgungsniveaus unterschreiten.

Aus den stark unterschiedlichen Wirkungen zwischen Humusmehrern und -zehrern wird deutlich, dass objektive Ergebnisse in der Humusbilanzierung nur erreicht werden, wenn es gelingt, die jeweils vorherrschenden Fruchtfolgen auf den Ackerschlägen und Betrieben so zu erfassen, damit genau eine oder zwei vollständige Fruchtfolgerotationen bilanziert werden. Die Verrechnung nicht repräsentativer unvollständiger Folgen kann zu deutlich verzerrten und damit falschen Ergebnissen führen. Das Hilfsmittel der Humusbilanzierung ist im ökologischen Landbau gut geeignet, um den Rahmen einer ordnungsgemäßen Bewirtschaftung abzustecken. Für eine genaue fruchtart- und standortspezifische Düngungsbemessung und Kontrolle der Bodenfruchtbarkeit sind jedoch weitere Methoden des Nährstoffmanagements zu verwenden (KOLBE & SCHUSTER, 2011).

Tabelle 24: Humusbilanzen (kg HÄQ/ha u. Jahr) inklusive Versorgungsgruppen (A–D) von viehlosen Fruchtfolgebeispielen mit unterschiedlichen Leguminosen-Anteilen verschiedener Standorte im ökologischen Landbau (Quelle: KOLBE, 2013 b)

Standortgruppe (STG):	STG 1	STG 2	STG 3	STG 4	STG 5	STG 6
Untere Orientierungsgrenze an Leguminosen-Anteilen in der Fruchtfolge						
20 % Klee gras, Abfuhr des Aufwuchses	90	12	-70	-18	-100	-211
10 % Körnerleguminosen	C	C	B	B	B	A
20 % Getreide mit Strohverbleib						
30 % Getreide mit Strohabfuhr						
20 % Hackfrüchte						
Obere Grenze an Leguminosen-Anteilen in der Fruchtfolge						
50 % Klee gras, Abfuhr des Aufwuchses	338	248	154	209	115	-14
15 % Getreide mit Strohverbleib	D	C	C	C	C	B
15 % Getreide mit Strohabfuhr						
20 % Hackfrüchte						

12 Zukunftsperspektiven

Anhebung der Humusgehalte und Einsatz von Biokohle

Auf Grund der günstigen Wirkungen des Humus auf viele Eigenschaften der Bodenfruchtbarkeit wären Verfahren zur Anhebung der Humusgehalte von großer Bedeutung. So gibt es immer wieder Bemühungen durch hohen Einsatz von organischen Materialien mit deutlicher Humuswirkung, z. B. durch Einsatz hoher Mengen an Komposten, eine substanzielle Verbesserung der Humusgehalte des Bodens zu erreichen. Wie in dieser Broschüre verdeutlicht wurde, haben diese Verfahren nur geringe Aussichten auf Erfolg. Auch durch den Einsatz von hohen Mengen dieser organischen Materialien ist lediglich eine verhaltene Anhebung um einige Zehntel Prozentpunkte an Humus möglich. Da diese Materialien einem fortwährenden Umsatz mit letztendlich vollständigem Abbau unterliegen, müssen die hohen Zufuhren stetig aufrechterhalten werden. In Folge des Abbaus wird aber nicht nur Kohlendioxid frei, sondern es erfolgt – auch beim Einsatz eines nährstoffarmen Materials – mit der Zeit eine hohe Rate an Nährstofffreisetzung, die die durchschnittlichen mit den Ernten abgefahrenen Nährstoffmengen übersteigen und somit die Nachhaltigkeit des Systems langfristig überfordern können. Eine nachhaltige Anhebung der Humusgehalte gelingt daher in der Regel nur, wenn der Abbau der zugeführten organischen Materialien weit über das Maß der Humifizierungskoeffizienten der Komposte hinaus verlangsamt bzw. ganz zum Stillstand gebracht werden kann. In der Diskussion stehen hier Verfahren, den Anteil des Dauerhumus zu erhöhen (vgl. Abb.1). So würde es je nach Standort in beschränktem Maße gelingen, z. B. durch Anhebung des Tongehaltes des Bodens, den inerten Humusgehalt zu erhöhen. Eine Möglichkeit besteht darin, durch Vertiefung der Ackerkrume den Kontakt des Untergrund-Tongehaltes mit der organischen Substanz zu erhöhen. Auch über eine quasi »Vergrabung« oder Versiegelung von Humusmaterialien in den Untergrund des Ackerlandes wird nachgedacht. Hierbei wird der Sauerstoffkontakt der Mikroorganismen herabgesetzt, so dass es zu einer deutlichen Verringerung der Abbaurates des Humus kommen kann. Auch eine Anhebung des Grundwasserspiegels, wie es z. B. bei den Wiedervernässungs-Strategien zum Schutz von Mooren praktiziert wird, hätte die gleiche Wirkung auf die Umsatzrate der Humusstoffe.

Im Rahmen archäologischer Arbeiten im Amazonasbecken von Südamerika hat man tiefgründige Schwarzerden mit hohen Gehalten an organischer Substanz aufgefunden. Diese sog. Terra-

Preta-Böden sind anthropogenen Ursprungs und bestehen aus einem Gemisch aus Holzkohle, Asche, tierischen Abfällen und Exkrementen. Unter den klimatischen Verhältnissen Mitteleuropas laufen zur Zeit einige Versuche zur Prüfung von verschiedenen Substraten mit substanziellen Anteilen an Holzkohlen, die nach heutigem Wissen maßgeblich für die dauerhafte Sicherung der hohen Gehalte an organischer Substanz in den tropischen Böden verantwortlich sind. Für die über lange Zeit andauernde hohe Ertragsfähigkeit dieser Böden scheint der Kohleanteil ein entscheidender Faktor darzustellen, der durch seine Stabilität und günstige physikalisch-chemische Eigenschaften zu einer hohen Wasser- und Luftkapazität, Speicherung und Pufferung von Nährstoffen sowie zu einer günstigen Besiedlung mit Bodenlebewesen führt (SOHI et al., 2010; MOKRY et al., 2013; HAUBOLD-ROSAR et al., 2014).

Zur Nutzung von verschiedenen organischen (Rest-)Materialien werden z.Zt. zwei Verkohlungsverfahren getestet:

- **Pyrolyse:** Organische Materialien mit hohen TM-Gehalten (ab 50 %TM) werden bei Temperaturen von 400 – 800 °C mehrere Stunden zu Biokohlen umgewandelt, bei denen die Struktur der Ausgangsmaterialien weitgehend erhalten bleiben und deren Eigenschaften für die Nutzung als Biokohle als günstig bezeichnet werden (jeweils hohe Abbau-Stabilität, Porosität, spezifische Oberfläche, Hygienisierungsgrad). Als Produkte können hierbei 50 % der eingesetzten Biomassen als energetisch nutzbare Synthesegase und als Pyrolyse-Öle, sowie 50 % als Biokohle genutzt werden.
- **Hydrothermale Karbonisierung (HTC):** Bei diesem Nassverfahren unter 6 Stunden Einwirkung von Temperaturen um 200 °C und einem Druck von ca. 20 bar erfolgt ein vollständiger struktureller Umbau der Materialien, deren Eigenschaften nach bisherigen Erkenntnissen für die Nutzung als weniger vorteilhaft angesehen werden (Ausbeute annähernd 100 % HTC-Kohle, aber mit geringerer Abbau-Stabilität, eher ungünstigeren physikalisch-chemischen und z. T. biotoxischen Eigenschaften).

Nur bei einer hohen Abbauresistenz und Stabilität der in den Boden eingebrachten Biokohlen kann davon ausgegangen werden, dass die Humusgehalte dann auch über lange Zeit (Jahr-

hunderte) keinem nennenswerten Abbau unterliegen. Der Humifizierungskoeffizient würde dann bei nahezu 100 kg HÄQ je 1 dt C_{org} liegen (zum Vergleich: Fertigkompost = 50 kg HÄQ/dt C_{org}, EBERTSEDER et al., 2014). Allerdings, man beachte den Unterschied: Bei der Holzkohle ist dann nur eine einmalige Zufuhr in entsprechender Höhe erforderlich, während beim Kompost die Anreicherung nur bei stetiger, wiederholter Zufuhr gegeben ist! Daher ist der nach Kompostanwendung entstandene Humus der Fraktion des Nährhumus zuzuordnen, während der Biokohle-Humus der stabilen Fraktion des Dauerhumus entspricht (vgl. Abb. 1). Biokohlen wären dann auch besonders für eine dauerhafte Kohlenstoffspeicherung (C-Sequestrierung) im Boden durch einen Entzug an Kohlendioxid (CO₂) aus der Atmosphäre zur Begegnung des Klimawandels geeignet (siehe nächstes Kapitel). Zur Herstellung von Biokohlen geeignete organische Materialien und deren Herstellungsverfahren sowie zur Bereitung Terra-Preta-gereigneter Mischungskomponenten und deren Wirkungen auf Böden und Pflanzen sind noch viele offene Fragen zu beantworten. Es besteht daher noch ein erheblicher Forschungsbedarf, bevor praktische Handlungsempfehlungen zum Einsatz von Biokohlen zur meliorativen Bodenverbesserung unter Beachtung betriebswirtschaftlicher Gesichtspunkte gegeben werden können.

Klimawandel

In Folge der Industrialisierung werden zur Energieerzeugung große Mengen fossiler Kohlenstoffquellen in die Atmosphäre als Kohlendioxid (CO₂) eingeleitet. Durch die spezifische Treibhausgaswirkung des CO₂ und anderer Spurengase ist es mit der Zeit zu einem anthropogen verursachten weltweiten Klimawandel mit zunehmendem Anstieg der mittleren Umgebungstemperaturen gekommen.

Der Kohlenstoff der Atmosphäre steht mit anderen bedeutenden Kohlenstoffspeichern über den weltweiten Kohlenstoffkreislauf in Verbindung. So ist die Kohlenstoffmenge im Humus der Böden mit ca. 1.580 Gt C weltweit doppelt so groß wie in der Atmosphäre (790 Gt C) und dreimal so groß wie in der Vegetation. Darüber hinaus wird bis zu 80 % der weltweit aktiv am Kohlenstoffumsatz beteiligten Kohlenstoffmenge in den Böden in Form von Humus gespeichert. Daher kann dem Boden sowohl als Kohlenstoff-Senke als auch als -Quelle eine Bedeutung in Hinblick auf den Klimawandel zukommen:

1. Kohlenstoff-Senke und C-Sequestrierungs-Potenzial:

Durch Landnutzungsänderungen und Handlungsalternativen können (unter Teilnahme am CO₂-Emissionshandel) bestimmte Mengen an Kohlenstoff dauerhaft aus der Atmosphäre entzogen und im Boden gebunden werden (z. B. Umwandlung von Ackerland in Grünland oder Wald, Vernässung von Mooren, Biokohle-Zuführung). Das Potenzial für eine zusätzliche C-Sequestrierung ist auf lange Zeiträume anzusetzen und unter gewöhnlichen Betriebsverhältnissen jedoch begrenzt. Durch Waldrodung oder Grünlandumbruch können dagegen in relativ kurzen Zeitperioden erhebliche Mengen an Kohlenstoff auch wieder verloren gehen (siehe Abb. 6).

2. Kohlenstoff-Quelle: Durch spezifischen Einfluss des Klimawandels können die Vorräte an Humus im Boden durch Freisetzung von CO₂ abnehmen:

- Anstieg der Temperaturen (besonders in Berg- und Permafrostregionen)
- Abnahme der Niederschlagshöhe und Bodenfeuchte
- Regionale Zunahme der Niederschläge (z. B. auf Schwarzerden)
- Regionale Zunahme von Starkregenereignissen mit erhöhter Erosionsgefährdung
- Regionale Zunahme von Trockenphasen
- Über eine verringerte Ertragsbildung und Abnahme der EWR-Mengen der Fruchtarten (besonders in südlichen Regionen).

In den letzten Jahren sind einige Studien erstellt worden, um einerseits den Einfluss des Klimawandels auf die Veränderung der Reserven an organischer Bodensubstanz abzuschätzen und andererseits die Möglichkeiten einer aktiven C-Sequestrierung durch Maßnahmen der Landbewirtschaftung aufzuzeigen (u. a. ANON, 2008; KOLBE, 2009; ANON., 2011; GUGGENBERGER et al., 2013; WIESMEIER, 2014; WALDMANN & WEINZIERL, 2014). Als Ergebnis wurde immer wieder auf Möglichkeiten der Landbewirtschaftung (insbesondere Landnutzungsänderungen etc.) verwiesen. Nach kritischer Prüfung sind aber die Erfolgsaussichten einer substanziellen C-Sequestrierung insbesondere unter ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten eher als gering einzuschätzen. Das liegt im Wesentlichen daran, dass die im gewöhnlichen Maßstab applizierbare organische Substanz vollständig dem Abbau unterliegt. Ein Sequestrierungs-Potenzial kann daher nur durch eine Applikation an organischer Substanz mit hoher Abbauresistenz, am besten z. B. in Form der Biokohlen erfolgen. Die Folgen des Klimawandels auf die Landnutzung können jedoch durch aktive Maßnahmen abgemildert werden. So ist die Einhaltung einer optimalen Versorgungslage mit organischer Substanz gut geeignet, negative Auswirkungen auf Eigenschaften der Bodenfruchtbarkeit abzupuffern (u. a. verbesserter Wasserhaushalt der Böden durch erhöhte Wasserleitfähigkeit und Wasserhaltefähigkeit, Erosionsschutz durch günstige Wirkung auf die Krümelstabilität und Stabilisierung des Bodengefüges). Erfahrungen bei der Auswertung von Dauerversuchen haben gezeigt, dass der Einfluss von klimatischen Veränderungen nur sehr schwer oder gar nicht auf direktem Wege experimentell nachgewiesen werden kann. Zwar zeichnen sich bestimmte kurzfristige Wetteränderungen, z. B. hohe Temperaturen ausgewählter Jahre, deutlich durch vergleichsweise niedrige C_{org}-Gehalte in den Dauerversuchen ab. In der Regel ändern sich im Laufe der Zeit nicht nur die angebauten Sorten mit ihrem Ertragspotenzial, sondern es werden im Laufe von Jahrzehnten der Versuchsdurchführung viele dieser Inputgrößen entsprechend dem technischen Fortschritt bewusst oder unbewusst einer Veränderung unterzogen (Sorte, PSM, mineralische u. organische Düngung inkl. Substratqualität, Bodenbearbeitung, etc.).

Dadurch können wichtige Inputdaten, z. B. an organischer Substanz über den Anbau der Fruchtarten und der Düngung, nicht konstant gehalten werden, so dass es dann schwierig ist, die Ursachen von gefundenen Veränderungen eindeutig auf Merkmale des Klimawandels zurückzuführen. Weiterhin können in Bezug auf das Klima in der Regel keine Standardvarianten (ohne Klimawandel, oder mit Varianten bestimmter Abweichung) angelegt werden, wie es sonst üblich ist, um z. B. die Wirkung einer steigenden organischen Düngung oder anderer Einflussgrößen in Dauerversuchen systematisch untersuchen zu können. Um dennoch den Einfluss klimatischer Veränderungen prüfen zu können, besteht eine Möglichkeit darin, zunächst einen oder mehrere entsprechend geeignete Dauerversuche mit hoher Datenqualität in Bezug auf den Humushaushalt und anderer Merkmale wichtiger Landwirtschaftsverfahren auszusuchen. In einem zweiten Schritt erfolgt dann eine Anpassung und Eichung von entsprechend geeigneten Prozessmodellen an die Daten der Versuche. Danach können verschiedene Klima-Szenarien auf die C_{org} -Gehalte und andere wichtige Merkmale des Bodens und auch der Pflanzen simuliert und die Differenzen zwischen gemessenen Daten aus den Versuchen und den berechneten Klimaszenarien veranschaulicht werden (siehe HERBST, 2010; KOLBE, 2009).

Anwendung von Methoden zur Berechnung der Nährstoffmineralisation aus dem Humusumsatz

In Abhängigkeit von der Qualität der zugeführten organischen Materialien und dem Umsetzungsprozess stellen sich im durchschnittlichen Humus bestimmte Nährstoffverhältnisse ein (Tab. 25). Andere Nährstoffe, wie z. B. das Kalium, werden zwar nicht in den Humus eingelagert. Diese Nährstoffe werden nach Applikation organischer Düngemittel, wie z. B. Fest- und Flüssigmiste, sehr schnell frei oder stehen im Rahmen der Mineralisation der organischen Substanz direkt zur Verfügung (s. Kap. 1). Von den insgesamt zugeführten Düngemitteln stammen heute in Deutschland mit fast 70 % an Phosphor und 86 % an Kalium hohe Anteile an Nährstoffen aus organischen Quellen (ALBERT, 2010).

Aufgrund der komplexen Abläufe bei dem Umsatz und der Mineralisation der organischen Substanz werden die jährlichen Beiträge dieser Nährstoffe zur Düngungsbemessung bisher nur mit mehr oder weniger groben Pauschalsätzen berücksichtigt. Folgende ungenau einzuschätzende Einflussgrößen der Mineralisation spielen hierbei eine von Jahr zu Jahr unterschiedlich große Rolle:

- Standort, Inklination (Neigungswinkel der Bodenoberfläche) und Exposition (Himmelsrichtung der Neigung)
- Witterungseinfluss (Temperatur, Niederschlag bzw. Wassergehalt des Bodens)
- Aktuelle Zufuhrhöhe und Qualität der organischen Düngemittel
- Zuführen an organischen Düngemitteln aus den vorausgehenden Jahren
- Art und Intensität der Bodenbearbeitung
- Einfluss der angebauten Fruchtarten inkl. Nebenproduktmanagement.

Die vielfältigen Bemühungen, eine Verbesserung der Düngedarfsermittlung insbesondere für den Nährstoff Stickstoff lediglich mit Hilfe aktueller Ergebnisse der Bodenuntersuchung bzw. durch eine genauere Berücksichtigung der aktuellen Witterung des Anbaujahres ableiten zu wollen, scheinen langsam angereizt zu sein, da sich kaum noch Fortschritte eingestellt haben. Bisherige Auswertungen insbesondere von Dauerversuchen haben hierzu gezeigt, dass einige der Hauptfehlerquellen bei der Düngedarfsermittlung nicht nur bei diesen Gesichtspunkten des aktuellen Anbaujahres zu suchen sind, sondern in einer ungenügenden schlaggenauen Berücksichtigung von Aktivitäten der Düngung, Fruchtfolge, Ernte und der Witterung in der Vergangenheit des konkreten Schlages (siehe Beispiele in Abb. 19).

Tabelle 25: Durchschnittliche relative Nährstoffgehalte von Humus auf Ackerland sowie Stallmist und Gülle im Vergleich zum Gehalt an Kohlenstoff (C = 100 %) (Quelle: Zusammenstellung von KOLBE, LFULG)

Nährstoff	Humus	Stallmist	Gülle
Stickstoff (N)	10	7,2	13
Phosphor (P)	1,4	2,9	3,1
Kalium (K)	-	6,7	7,5
Schwefel (S)	1,1	1,0	1,1

Deutliche Verbesserungen bei der Bedarfsermittlung und in der Erhöhung der Nährstoffeffizienz können daher unter Nutzung geläufiger langjähriger Schlagkarteiaufzeichnungen z. B. durch den Einsatz vereinfachter Prozessmodelle, wie dem CCB, erwartet werden (vgl. Kap. 4, KOLBE et al., 2013), bei denen die genannten kurzfristigen und langfristig wirkenden Einflussgrößen des Humusumsatzes und der Nährstoffmineralisation berücksichtigt werden. Durch Einsatz dieser Verfahren kann es gelingen, folgende Aspekte der Stickstoffzufuhr bzw. des Einsatzes anderer Nährstoffe im landwirtschaftlichen Betrieb zu optimieren:

- Verbesserung der aktuellen Düngebedarfsermittlung durch genaue Berücksichtigung der Nährstoffmineralisation auf Standort- und Schlagebene
- Jährliche Ermittlung und Verbesserung der langfristig vorhandenen Nährstoffeffizienzen unter Berücksichtigung der Schlag- und Bodenbilanzen des Standortes
- Aufdeckung und Schließung weiterer betrieblicher Schwachstellen des Nährstoffmanagements und stetige Anpassung der Düngebedarfsermittlung

13 Quellen

- ALBERT, E. (2010): Alternativen zur mineralischen Phosphor- und Kaliumdüngung unter besonderer Berücksichtigung von Sekundärrohstoffdüngern. In: Phosphor- und Kaliumdüngung – brauchen wir neue Düngekonzepte? Bundesarbeitskreis Düngung (BAD), Frankfurt, 63 – 78.
- ANDERS, G. (2015): Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, Güstrow (schriftl. Mitteilung).
- ANONYM (2007): Verordnung (EG) Nr. 834/2007 des Rates über die ökologische/biologische Produktion und Kennzeichnung von ökologischen/biologischen Erzeugnissen und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 2092/91. Amtsblatt der Europäischen Union L189 vom 20.07.2007, 1–23.
- ANONYM (2008): Untersuchung des Einflusses des Klimawandels auf die CO₂-Freisetzung aus Böden ausgewählter hessischer Dauerbeobachtungsflächen. Abschlussbericht, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG), Wiesbaden.
- ANONYM (2011): Klimawandel und Boden. Auswirkungen der globalen Erwärmung auf den Boden als Pflanzenstandort. Broschüre, Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf.
- BBdSchG (1998): Bundes-Bodenschutzgesetz vom 17. März 1998. BGBl. I S. 502. Zuletzt geändert durch Art. 3 G v. 9.12.2004 I 3214.
- BODENKUNDLICHE KARTIERANLEITUNG (2005): Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten, Hannover.
- BGK (2013): Nutzwert- und Vorsorgeindex. Bewertung organischer Dünge- und Bodenverbesserungsmittel nach Nutzwert- und Vorsorgeindex. Bundesgütegemeinschaft Kompost, Köln.
- BREITSCHUH, TH. & U. GERNAND (2010): Humusbilanzierung in landwirtschaftlichen Betrieben. In: ENGELS, C. et al.: Humusbilanzierung landwirtschaftlicher Böden – Einflussfaktoren und deren Auswirkungen. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben. VDLUFA, Speyer, 280 – 313.
- CAPRIEL, P. (2010): Standorttypische Humusgehalte von Ackerböden in Bayern. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft 5. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising.
- DirektZahlVerpflV (2004): Direktzahlungen-Verpflichtungen-Verordnung vom 4. November 2004 (BGBl. I S. 2778), die zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 15. Dezember (eBAnz 2011 AT144 V1) geändert worden ist.
- DÜVO (2007): Verordnung über die Anwendung von Düngestoffen, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsstoffen nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung – DüV). Bundesgesetzblatt 2007 Teil I Nr. 7.
- DÜWEL, O. & J. UTERMANN (2008): Humusversorgung der (Ober-)Böden in Deutschland – Status Quo. In: Hüttl, R. et al.: Zum Stand der Humusversorgung von Böden in Deutschland: Cottbuser Schriften zur Ökosystemgenese und Landschaftsentwicklung, Band 7; Brandenburgische Technische Universität, Cottbus.
- EBERTSEDER, T. et al. (2014): Humusbilanzierung. Eine Methode zur Analyse und Bewertung der Humusversorgung von Ackerland. Standpunkt. VDLUFA, Speyer.
- FÖRSTER, F. (2014): Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Nossen (schriftl. Mitteilung).
- FRANKO, U. et al. (2011): Multi-site validation of a soil organic matter model for arable fields based on generally available input data. GEODERMA 166, 119 – 134.
- FRIJSCHKE, U. R. et al. (2004): Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse. Öko-Institut, Freiburg.
- GUGGENBERGER, G. et al., (2013): Einfluss des Klimawandels auf die ökologischen Funktionen des Bodens durch Humusabbau – Entwicklung eines Instruments zur Früherkennung von Humusveränderungen in typischen Böden Baden-Württemberg. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe.

- HANFF, H. et al. (2008): Vor dem Verkauf scharf kalkulieren. Bauernzeitung 49, Nr. 33, 18 – 19.
- HAUBOLD-ROSAR, M. et al. (2014): Chancen und Risiken des Einsatzes von Biokohle und anderer »veränderter« Biomasse als Bodenhilfsstoffe oder für die C-Sequestrierung in Böden. Forschungskennzahl (UFOPLAN) 371271222. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- HERBST, M. (2010): Pilotstudie zur Kohlenstoffmodellierung der Dauerversuchsfläche Bonn/Dikopshof. Modellierung der landwirtschaftlich genutzten Dauerversuchsflächen in NRW. Zwischenbericht Arbeitspaket I, Institut für Bio- und Geowissenschaften 3, Jülich, 1–13.
- HEYN, J. (2013): Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen, Kassel (schriftl. Mitteilung).
- HÜLSBERGEN, K.-J. (2003): Entwicklung und Anwendung eines Bilanzmodells zur Bewertung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Systeme. Shaker, Halle.
- JACOBS, G. (2013): Landwirtschaftskammer NRW. LWK, Münster (schriftl. Mitteilung).
- KEHRES, B. (2013): Nutzwert- und Vorsorgeindex. Humuswirtschaft & Kompost aktuell, Nr. 5, 10 – 13.
- KÖHLER, B. & H. KOLBE (2007): Nährstoffgehalte der Fruchtarten im Ökologischen Landbau. In: Berichte aus dem Öko-Pflanzenbau. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Heft 9, 1–21.
- KOLBE, H. (2007): 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.
- KOLBE, H. (2008): Einfache Verfahren zur Berechnung der Humusbilanz für konventionelle und ökologische Anbaubedingungen. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Fachbereich Pflanzliche Erzeugung, Leipzig. <http://orgprints.org/13626/>
- 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. In: Klimawandel und C-Sequestrierung. 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. J. Plant Nutr. Soil Sci. 173, 678 – 691.
- KOLBE, H. (2012): Zusammenführende Untersuchungen zur Genauigkeit und Anwendung von Methoden der Humusbilanzierung im konventionellen und ökologischen Landbau. In: Bilanzierungsmethoden und Versorgungsniveau für Humus. Schriftenreihe des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Heft 19, 1 – 85.
- KOLBE, H. (2013 a): Anwendungsbeispiele zur standortangepassten Humusbilanzierung im konventionellen Ackerbau. Informationen für Praxis, Beratung und Schulung. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.
- KOLBE, H. (2013 b): Anwendungsbeispiele zur standortangepassten Humusbilanzierung im ökologischen Landbau. Informationen für Praxis, Beratung und Schulung. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.
- KOLBE, H. (2013 c): VDLUFA-Standpunkt Humusbilanzierung: Ökologischer Landbau. <http://orgprints.org/24848>
- KOLBE, H. & M. SCHUSTER (2011): Bodenfruchtbarkeit im Öko-Betrieb. Untersuchungsmethoden. Broschüre. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.
- KOLBE, H. et al. (2013): Verfahren zur Abschätzung von Humusreproduktion und N-Umsatz im ökologischen und konventionellen Ackerbau. In: Humusreproduktion und N-Umsatz, Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Heft 1, 1 – 119.
- KÖRSCHENS, M. (2010): Der organische Kohlenstoff im Boden (C_{org}) – Bedeutung, Bestimmung, Bewertung. Archives Agronomy Soil Sci. 56, 375 – 392.
- KÖRSCHENS, M. & M. SPITZL (1978): Methodische Untersuchungen zur Bestimmung des C_t - und N_t -Gehaltes im Boden. Arch. Acker-Pflanzenbau Bodenkde. 22, 705 – 711.
- KÖRSCHENS, M & E. SCHULZ (1999): Die organische Bodensubstanz, Dynamik-Reproduktion – ökonomisch und ökologisch begründete Richtwerte. UFZ-Bericht 13. UFZ, Halle.
- KÖRSCHENS, M. et al. (2004): Humusbilanzierung. Methode zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland. Standpunkt. VDLUFA, Bonn.
- KURZER, H.-J. (2013): Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Nossen (schriftl. Mitteilung).
- LBGR (2015): Auswertung des Fachinformationssystems Bodengeologie des Landes Brandenburg nach den Bodengruppen zur Düngung und den Gehalten an organischem Kohlenstoff bzw. der organischen Bodensubstanz (Glühverlust) auf Grundlage der Bodenübersichtskarte 1:3.000.000. Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe des Landes Brandenburg, Cottbus (schriftl. Mitteilung).

- LEITHOLD, G. et al. (1997): Humusbilanz – Methoden und Anwendung als Agrar-Umweltindikator. Initiativen zum Umweltschutz 5, Zeller Verlag, Osnabrück, 43 – 54.
- LfL (2011): Humus. Leben aus dem Boden. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising-Weihenstephan.
- LTZ (2015): Untersuchungsergebnisse von Praxisflächen aus den Jahren 1993 – 2006. Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg Baden-Württemberg, Karlsruhe (schriftl. Mitteilung).
- MARTI, F. et al. (2013): Sammlung von Spreu und Kurzstroh. Täglicher Agrartechniktag, Schweiz. www.agroscope.admin.ch/veranstaltungen/00532/index.html
- MOKRY, M. et al. (2013): Einsatz von »Biokohle« in der Landwirtschaft. Landinfo Nr. 4, 49 – 56.
- PAUL, E. A. & F. E. CLARK (1989): Soil microbiology and biochemistry. Academic Press, San Diego, USA.
- REINHOLD, G. (2014): Standpunkt zur Vergärung von Stroh in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena.
- ROGASIK, J. (2005): Humusbilanz und Maßnahmen für optimale Humusgehalte. In: Humus: Stoff zwischen Leben und Tod. Vortrag. FAL, Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Braunschweig.
- SAUERBECK, D. (1985): Funktion, Güte und Belastbarkeit des Bodens aus agrikulturchemischer Sicht. Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart.
- SCHMIDT, W. I. et al. (2011): Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, 478, 49 – 56.
- SCHMIDTKE, K. et al. (in Vorbereitung): Nährstoff- und Humusbilanz sowie Nährstoffversorgung im Boden von langjährig ökologisch bewirtschafteten Acker- und Grünlandflächen im Freistaat Sachsen. Schriftenreihe des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.
- 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://orprints.org/13152/>
- SIMPSON, A. J. et al. (2002): Molecular structure and associations of humic substances in the terrestrial environment. *Naturwissenschaften* 89, 84 – 88.
- SOHI, S. P. et al. (2010): A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy* 105, 47 – 82.
- StBA (2015): Daten zur Energiepreisentwicklung. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- SÜNDER, A. et al. (2010): Strohnutzung: Zwei Drittel bleiben auf dem Feld. *Praxisnah* Nr. 4, 2 – 4.
- VDLUFA (2012): Methode 4.1.3.1: Bestimmung von organischem Kohlenstoff durch Verbrennung und Gasanalyse. In: Die Untersuchung von Böden. Methodenbuch Band I, VDLUFA. www.vdlufa.de/Methodenbuch/index.php/de/8-mb-i
- VOGT-KAUTE, W. (2011): Humusaufbau durch Leguminosenanbau. Vortrag, Naturland. www.aktiongrundwasserschutz.de/download/gws_091030_3_humusaufbau_vwk.pdf
- WALDMANN, F. & W. WEINZIERL (2014): Organische Kohlenstoffvorräte der Böden Baden-Württembergs in Abhängigkeit von Bodentyp, Bodenart, Klima und Landnutzung. Forschungsbericht KLIMOPASS. Landesamt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Karlsruhe.
- WEISER, C. et al. (2014): Integrated assessment of sustainable cereal straw potential and different straw-based energy applications in Germany. *Applied Energy* 114, 749 – 762.
- WIESMEIER, M. (2014): Der Humuskörper bayerischer Böden im Klimawandel – Auswirkungen und Potenziale. Abschlussbericht zum Projekt. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), Augsburg.
- ZELLER, V. et al. (2012): Basisinformationen für eine nachhaltige Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen zur Bioenergiebereitstellung. DBFZ Report Nr. 13, Deutsches Biomasseforschungszentrum, Leipzig.
- ZIMMER, J. (2003): Humusreproduktion in Brandenburg – Empfehlungen zur Guten fachlichen Praxis unter Brandenburger Standortbedingungen. Vortrag, BLAK-Seminar »Aktuelle Informationen zum Pflanzenbau in Brandenburg«, Neuseddin.
- ZIMMER, J. et al. (2011): Humuswirtschaft in Brandenburg – Wohin geht die Reise? Vortrag, FGL-Spezial 2011 »Boden, Humuswirtschaft und effektive Substratverwertung«, Berkenbrück.
- ZIMMER, J. et al. (2013): Aktuelle Korn-Stroh-Verhältnisse von Wintergetreide im integrierten und ökologischen Landbau im Land Brandenburg. In: Jahresbericht 2012, Landwirtschaft und Gartenbau, Landesamt für Ländliche Entwicklung, Landwirtschaft und Flurneuordnung, Frankfurt/Oder, 43 – 46.

**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

Redaktion:

Abteilung Landwirtschaft, Referat Pflanzenbau
Dr. Hartmut Kolbe
Telefon: + 49 35242 631-7203
Telefax: + 49 35242 631-7299
E-Mail: hartmut.kolbe@smul.sachsen.de

Autoren:

Dr. Hartmut Kolbe
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), Nossen
Jörg Zimmer

Landesamt für ländliche Entwicklung, Landwirtschaft und Flurneuordnung
Brandenburg (LELF), Teltow OT Ruhlsdorf

Unter Mitwirkung von:

Dr. Robert Beck, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) · Dr. Jörn Breuer,
Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg Baden-Württemberg (LTZ) ·
Dr. Jürgen Reinhold, Potsdam · Dr. Gert Barthelmes, Landesamt für ländliche Entwicklung,
Landwirtschaft und Flurneuordnung Brandenburg (LELF) · Dr. Albrecht Bauriegel, Landes-
amt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg (LBGR) · Christian Weiser, Thürin-
ger Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) · Dr. Ines Bull, Landesforschungsanstalt für
Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern (LFA) · Dr. Gunter Ebel, Leibniz-
Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim Brandenburg (ATB) · Holger Hanff, Landesamt
für ländliche Entwicklung, Landwirtschaft und Flurneuordnung Brandenburg (LELF)

Fotos:

Titelseite: M. Grunert

Gestaltung und Satz:

Sandstein Kommunikation GmbH

Druck:

Saxoprint GmbH

Redaktionsschluss:

10.08.2015

Auflage:

750 Exemplare

Papier:

gedruckt auf 100% Recycling-Papier

Bezug:

Diese Druckschrift kann
kostenfrei bezogen werden bei:
Zentraler Broschürenversand
der Sächsischen Staatsregierung
Hammerweg 30, 01127 Dresden
Telefon: + 49 351 2103-672
Telefax: + 49 351 2103-681
E-Mail: publikationen@sachsen.de
www.publikationen.sachsen.de

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 Infor-
mationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipoliti-
scher Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur
Verwendung bei der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehen-
den 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 Unter-
richtung ihrer Mitglieder zu verwenden.