

**Humusbilanzierung
als praxisgerechtes Tool
für Landwirte zur Unterstützung
einer CO₂-speichernden
Landwirtschaft**

Bio Forschung Austria



Humusbilanzierung als praxisgerechtes Tool für Landwirte zur Unterstützung einer CO₂-speichernden Landwirtschaft

Humus balances as a practical tool for farmers to support carbon sequestration in agriculture

Endbericht zum Projekt StartClim 2009.D

Projektleitung: Dr. Wilfried Hartl

Projektbearbeiterin: Dr. Eva Erhart

Bio Forschung Austria
Rinnböckstr. 15
1110 Wien
office@bioforschung.at
www.bioforschung.at

Wien, im Oktober 2010

StartClim2009.D

Teilprojekt von StartClim2009

Projektleitung von StartClim2009:

Universität für Bodenkultur, Department für Wasser – Atmosphäre – Umwelt

Institut für Meteorologie, Peter Jordan-Straße 82, 1190 Wien

URL: <http://www.austroclim.at/startclim/>

StartClim2009 wurde aus Mitteln des BMLFUW, des BMWF, des BMWFJ und der ÖBf gefördert.

Diese Publikation sollte folgendermaßen zitiert werden:

Erhart, E., Hartl, W. (2010): Humusbilanzierung als praxisgerechtes Tool für Landwirte zur Unterstützung einer CO₂-speichernden Landwirtschaft. Endbericht von StartClim2009.D in StartClim2009: Anpassung an den Klimawandel: Beiträge zur Erstellung einer Anpassungsstrategie für Österreich, Auftraggeber: BMLFUW, BMWF, BMWFJ, ÖBF

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	4
Abstract	5
D-1 Einleitung	6
D-2 Methodik	7
D-2.1 Überblick	7
D-2.2 Humusbilanzierungsmethoden	7
D-2.3 Referenzdaten	9
<i>D-2.3.1 Exaktversuch ‚STIKO‘</i>	<i>9</i>
<i>D-2.3.2 Begrünungsversuche im Weinviertel</i>	<i>10</i>
D-3 Ergebnisse	11
D-3.1 Vergleich der Ergebnisse verschiedener Humusbilanzmethoden mit im Boden gemessenen Humusgehalten anhand des Exaktversuchs ‚STIKO‘	11
D-3.2 Diskussion der Ergebnisse der verschiedenen Humusbilanzmethoden mit interessierten Weinviertler Bauern und Auswahl der am besten geeigneten Methode	15
D-3.3 Proberechnungen mit praxisgerechter Datenintensität und Empfindlichkeitsberechnungen	16
D-3.4 Erprobung der ausgewählten Methode an Daten von Praxisbetrieben	17
D-4 Diskussion	20
Literaturverzeichnis	21
Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	23

Kurzfassung

Dem Humusgehalt des Bodens kommt im Zusammenhang mit dem Klimawandel eine herausragende Rolle zu. Bei steigendem Bodenhumusgehalt wird Kohlenstoff mittelfristig im Boden gebunden und damit von der Atmosphäre ferngehalten. Ein Boden mit hohem Humusgehalt kann mehr Wasser speichern und damit die Kulturpflanzen unter trockenen Bedingungen besser versorgen, aber auch Starkregen besser infiltrieren, und Erosion vermindern. Eine Verbesserung des Humusgehaltes des Bodens hat auch eine Erhöhung der Kationenaustauschkapazität und damit der Nährstoffspeicherung zur Folge.

Die (Bio-)Bauern wurden in den vergangenen Jahren für den Wert des Bodenhumus sensibilisiert. Anhand von Humusbilanzen können Bauern sehen, welche Auswirkungen ihre Fruchtfolge und Bewirtschaftung auf den Humusgehalt ihres Ackerbodens haben. Die derzeit eingesetzte einfache Berechnungsmethode berücksichtigt jedoch regionale Fruchtfolge- und Ertragsverhältnisse sowie auch bestimmte Bewirtschaftungsfaktoren wie z.B. Begrünungen nicht ausreichend.

Das Ziel des Projektes war es, eine Humusbilanzmethode zu finden, die rasch und mit für Bauern vertretbarem Aufwand an Input-Daten zu berechnen ist, und die Humusentwicklung auf landwirtschaftlichen Betrieben des Weinviertels hinreichend genau abbildet. Damit soll den Bauern ein Werkzeug in die Hand gegeben werden, mit dessen Hilfe eine CO₂-speichernde Landwirtschaft für sie planbar und umsetzbar wird.

Anhand des langjährigen Exaktversuches ‚STIKO‘ der Bio Forschung Austria (BFA) wurden fünf Humusbilanzierungsmethoden mit den gemessenen Humus-C-Gehalten im Boden der kompostgedüngten Varianten nach zwölfjähriger Bewirtschaftung verglichen. Der Vergleich der Ergebnisse ergab zum Teil recht große Unterschiede in der Prognosegenauigkeit. Während die HE-Methode (REPRO), die Methode der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (Bayer. LfL) und die Methode Kolbe mit Abweichungen von -8, +12 und -13 % vom gemessenen Wert die Entwicklung des C-Gehaltes des Bodens recht zutreffend einschätzten, überschätzten die VDLUFA- und die ROS-Methode mit Abweichungen von +69 und +94 % vom gemessenen Wert die bei der gegebenen Bewirtschaftung resultierenden C-Gehalte deutlich.

Nach Diskussion mit Bauern fiel die Wahl unter Berücksichtigung der in der Praxis vorhandenen Daten und des zeitlichen und finanziellen Aufwandes auf die Methode Kolbe. Die Erprobung der ausgewählten Methode an Daten von Praxisbetrieben verlief positiv. Diese Methode wird daher zukünftig in den regelmäßig stattfindenden Workshops von BFA mit Bauern aus anderen Regionen verwendet werden.

Ein Vergleich der mit Humusaufbau in landwirtschaftlichen Böden erzielbaren C-Speicherung mit den Kohlendioxidemissionen in Österreich und den Reduktionsverpflichtungen Österreichs zeigt, dass diese einen nennenswerten Beitrag zur Verringerung der Treibhausgasemissionen leisten kann, der auch rasch erzielbar wäre, da die Techniken bekannt sind. Zur Kompensation der gesamten Kohlendioxidemissionen aus fossilen Brennstoffen reicht der in der Praxis erzielbare Humusaufbau bei weitem nicht aus. In jedem Fall aber verbessert der gespeicherte Kohlenstoff die Bodenfunktionen, wie das Wasserspeichervermögen, und ist deshalb – insbesondere für die Klimawandelanpassung – sehr positiv zu bewerten.

Abstract

Soil organic matter is of critical importance for both mitigating global warming and for adaptation to climate changes. With increasing soil humus content, carbon is sequestered in the soil and kept away from the atmosphere in the medium term. A soil with a high humus content holds more water and supplies crop plants longer under dry conditions. It infiltrates more water in heavy rain, and so reduces erosion. Improving soil humus content also increases cation exchange capacity and nutrient storage.

In the last years, (organic) farmers were sensitized for the value of soil humus. With the help of humus balances, farmers can find out how their management measures affect soil organic matter content. Yet, the simple humus balance method used at the moment does not sufficiently factor in regional conditions and certain management measures, such as cover crops.

The objective of this project was to find a humus balance method which can be calculated quickly using input data that can be collected easily by the farmers, and which indicates the humus development on farms in the Weinviertel with acceptable accuracy. The selected humus balance method will provide the farmers with a tool which allows them to better understand C sequestration in agriculture, and, what is more, which allows them to plan and put it into practice.

Five humus balance methods were assessed using data from the long-term field experiment ‚STIKO‘ of Bio Forschung Austria (BFA). The results of the different humus balances were compared with data of soil humus content of the compost-fertilized treatments measured after 12 experimental years. The accuracy of forecast of the five humus balance methods differed widely. While the HE-method (REPRO), the method of the Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft and the Kolbe-method showed deviations of -8, +12 and -13 % of the measured values, and predicted the development of soil C contents fairly accurately, the VDLUFA-method and the ROS-method had deviations of +69 and +94 % of the measured values and thus clearly overestimated the soil C content resulting from the given management.

After discussion with farmers and with regard to the data available and the costs for humus balancing, the Kolbe method was chosen. Subsequent tests of the Kolbe method using data of practical farms were successful. Therefore, this method will be used in future in BFA's regular workshops for farmers.

A comparison of the amount of carbon sequestration that could be attained by humus accumulation in agricultural soils with Austria's CO₂ emissions and our Kyoto commitments shows that C sequestration in agricultural soils may make an appreciable contribution to the reduction of greenhouse gas emissions. This contribution could come into effect quickly, as the techniques to be used are well-known. For the compensation of the total CO₂ emissions from fossile fuels, however, the humus accumulation achievable in practice will not suffice. In any case, the sequestered carbon will improve soil functions such as water holding capacity, which is valuable particularly in view of the adaptation to climate change.

D-1 Einleitung

Dem Humusgehalt des Bodens kommt als Beitrag zur Minderung des Treibhauseffekts und bei der Anpassung an veränderte Klimabedingungen eine herausragende Rolle zu. Bei gleichbleibendem bzw. steigendem Bodenhumusgehalt wird Kohlenstoff mittelfristig im Boden gebunden und damit von der Atmosphäre ferngehalten. Ein Boden mit standortangepaßt hohem Humusgehalt kann mehr Wasser speichern (HUDSON, 1994) und damit die Kulturpflanzen unter trockenen Bedingungen besser versorgen (PIMENTEL et al., 2005), aber auch Starkregen besser infiltrieren (SHEPHERD et al., 2002), sodaß der Niederschlag im Boden gespeichert werden kann und nicht oberflächlich abfließt und Erosion verursacht (SCHNUG UND HANEKLAUS, 2002). Eine Verbesserung des Humusgehaltes des Bodens hat auch eine Erhöhung der Kationenaustauschkapazität zur Folge (SCHACHTSCHABEL et al., 1998), und die bessere Nährstoffspeicherung erhöht auch die Effizienz der eingebrachten Düngemittel. Es ist also wichtig, daß Landwirte auf die Bedeutung des Bodenhumus aufmerksam gemacht werden, und daß sie ein zuverlässiges Werkzeug erhalten, mit dessen Hilfe sie feststellen können, wie sich ihre Bewirtschaftung auf den Bodenhumusgehalt auswirkt.

Die Bodenpraktiker-Ausbildung, die von Bio Forschung Austria (BFA) gemeinsam mit Distelverein und Bio Austria entwickelt wurde und die im Weinviertel schon zum 3. Mal durchgeführt wird, sensibilisiert (Bio-)Bauern für den Wert des Bodenhumus. Anhand von Humusbilanzen können Bauern sehen, welche Auswirkungen ihre Fruchtfolge und Bewirtschaftung auf den Humusgehalt ihres Ackerbodens haben. Die derzeit von BFA für die Berechnung der Humusbilanzen in diesem Rahmen angewendete einfache Methode berücksichtigt jedoch regionale Fruchtfolge- und Ertragsverhältnisse sowie auch bestimmte Bewirtschaftungsfaktoren wie z.B. Begrünungen nicht ausreichend.

Das Ziel des vorliegenden Projektes war es, eine Humusbilanzmethode zu finden, die einerseits relativ rasch und mit für die Bauern vertretbarem Aufwand an Input-Daten zu berechnen ist, andererseits aber unter Weinviertler Verhältnissen die Humusentwicklung auf den landwirtschaftlichen Betrieben hinreichend genau abbildet. Dazu sollen anhand des umfangreichen Datenmaterials aus dem langjährigen Exaktversuch ‚STIKO‘ der BFA mehrere Humusbilanzmethoden verglichen werden, um herauszufinden, welche dieser Methoden – eventuell nach Adaptierung – für die landwirtschaftliche Praxis, besonders im Biolandbau, zum Zweck von C-Sequestrierung und Humusaufbau am besten geeignet ist.

Die Ergebnisse dieses Vergleiches sollen in einem Workshop mit der Weinviertler Bauerngruppe diskutiert werden. Dabei soll mit den Bauern auch abgestimmt werden, welche Bewirtschaftungs- und Erntedaten sie in welcher Detailliertheit und Genauigkeit für die Humusbilanzierung zur Verfügung stellen können. Auf dieser Basis soll die am besten geeignete Methode ausgewählt werden. Anschließend sollen die Humusbilanzen der Feldversuche probeweise mit dieser Datenintensität gerechnet, sowie die Empfindlichkeit der Humusbilanzen auf verschiedene Fehlerquellen getestet und die Ergebnisse wiederum ausgewertet werden. Die ausgewählte Humusbilanzmethode soll sodann in einem Workshop mit der Weinviertler Bauerngruppe anhand der Daten ihrer Praxisbetriebe erprobt und evaluiert werden.

Diese Methode soll zukünftig auch in den regelmäßig stattfindenden Workshops von BFA mit Bauern aus anderen Regionen verwendet werden, um den Bauern ein Werkzeug in die Hand zu geben, mit dessen Hilfe eine CO₂-speichernde Landwirtschaft für sie begreifbar, aber vor allem auch planbar und umsetzbar wird.

D-2 Methodik

D-2.1 Überblick

Um eine Humusbilanzmethode zu finden, die den beschriebenen Erfordernissen entspricht, war die Durchführung folgender Arbeitsschritte erforderlich:

- Literaturrecherche zu möglichen Humusbilanzierungsmethoden
- Berechnung der Humusbilanz des langjährigen Exaktversuches ‚STIKO‘ mit fünf verschiedenen Humusbilanzierungsmethoden und Vergleich der Bilanzierungsergebnisse mit den im Boden gemessenen Humus-C-Gehalten.
- Erhebung unter interessierten Bauern, welche Bewirtschaftungs- und Erntedaten sie in welcher Detailliertheit und Genauigkeit für die Humusbilanzierung zur Verfügung stellen können.
- Diskussion der Ergebnisse der verschiedenen Humusbilanzmethoden für den Versuch ‚STIKO‘ mit interessierten Bauern.
- Auswahl der am besten geeigneten Humusbilanzmethode unter Berücksichtigung dieser Ergebnisse, sowie der seitens der Landwirtschaftsbetriebe vorhandenen Daten und des zumutbaren zeitlichen und finanziellen Aufwandes für die Humusbilanzierung.
- Test der Empfindlichkeit der Humusbilanz auf verschiedene Fehlerquellen, die bei den Praxisdaten auftreten können, Proberechnung des Exaktversuches ‚STIKO‘ mit praxismäßer Datenintensität.
- Erprobung der ausgewählten Methode anhand von Daten von Praxisbetrieben interessierter Landwirte.

D-2.2 Humusbilanzierungsmethoden

Die Humusbilanzierung ist eine Methode zur Beurteilung der Humusversorgung von Ackerland. Dabei wird rein rechnerisch auf der Basis von langjährigen Versuchsergebnissen aus den Bewirtschaftungsdaten des betreffenden Betriebes bzw. Schläges die Humusversorgung errechnet.

Die direkte Messung des Humusvorrates anhand des Kohlenstoff- (C_{org}) Gehaltes des Bodens erweist sich nämlich aufgrund seiner großen und stark schwankenden Umsetzungsdynamik als problematisch (LEITHOLD et al., 1997). Veränderungen im Humushaushalt erfolgen langsam. Sie werden lange von den normalen Schwankungen der Umsetzungsdynamik, sowie auf Praxisschlägen auch von der Variabilität durch die Probenahme auf großen Flächen überlagert.

Das Prinzip der Humusbilanzierung beruht darauf, den Humusbedarf einer Fruchtfolge (durch humuszehrende Kulturen) der Humuszufuhr (durch organische Düngung, Begrünungen etc.) gegenüberzustellen.



Abb. D- 1: Prinzip der Humusbilanzierung.

Die angebauten Pflanzen beeinflussen einerseits über ihr Wurzelsystem (Wurzelmasse, Rhizodeposition) und andererseits durch ihre spezifischen Anforderungen an die Bodenbearbeitung (Intensität, Bodenruhe) den Netto-Zuwachs oder –Verlust an Humus im Boden. Aus Menge und Qualität der zugeführten Ernterückstände und organischen Dünger läßt sich deren unterschiedliche Fähigkeit zur Humusreproduktion ermitteln. Der Humussaldo errechnet sich demnach aus der Humuszufuhr durch die organischen Dünger (Ernterückstände, Stallmist, Gülle, Kompost etc.) auf der einen und der anbauspezifischen Veränderung des Humusvorrates (Humusbedarf) auf der anderen Seite (VDLUFA, 2004).

Seit den 1970er Jahren wurden verschiedene Humusbilanzierungsmethoden entwickelt. Die folgenden Humusbilanzierungsmethoden wurden in diesem Projekt angewendet:

Die **ROS-** (**R**eproduktionswirksame **o**rganische **S**ubstanz) Methode (AUTORENKOLLEKTIV, 1977) war eine der ersten Humusbilanzierungsmethoden. Sie beruht auf langjährigen Feldversuchen mit mineralischer und organischer Düngung in der ehemaligen DDR. Bei unterschiedlicher Bewirtschaftung stellen sich im Laufe der Zeit jeweils charakteristische und anschließend praktisch konstante Gehalte an Humus im Boden ein. Der bei den jeweils günstigsten Versuchsvarianten (bestimmt nach Ertragssicherheit, hoher N-Effizienz und ausgewogenen N-Salden) erforderliche Humusbedarf wird demnach auch als die optimale Humusmenge, die durch organische Düngung bereit gestellt werden sollte, angesehen (VDLUFA, 2004). Aus den Daten dieser Feldversuche wurden der Humusbedarf der verschiedenen Fruchtarten und die Humusreproduktionsleistung ermittelt, die als Faktoren in die Bilanzierung einfließen.

Die ROS-Methode differenziert nach vier verschiedenen Standortgruppen. Der Koeffizientensatz umfaßt nur die wichtigsten Fruchtarten. Die Bilanzierung mit dieser Methode kann händisch oder mit Hilfe eines Tabellenkalkulationsprogrammes durchgeführt werden.

Die **HE-** (**H**umuseinheiten-) Methode (LEITHOLD et al., 1997) leitet ihre Humusbedarfskoeffizienten ebenso von Dauerfeldversuchen, aber unter etwas anderen Standort- und Versuchsbedingungen ab. Über fruchtartenspezifische Stickstoffbilanzen wurden ertragsbezogene Koeffizienten ermittelt. Als wesentliche Einflußfaktoren auf den Humusbedarf gehen also das anzustrebende Ertragsniveau und der Mineral-N-Aufwand in die Ableitung ein (LEITHOLD et al., 1997). Die HE-Methode wurde auch für unterschiedliche Intensitätsniveaus (für integrierten und ökologischen Landbau) differenziert.

Die HE-Methode wurde von HÜLSBERGEN (2003) zum computergestützten Bilanzierungsmodell REPRO weiterentwickelt. REPRO ist modular aufgebaut und kann an unterschiedlichste Standort- und Bewirtschaftungsbedingungen angepaßt werden. Es werden die Produktionsverfahren detailliert abgebildet und der Betriebsmitteleinsatz vollständig erfaßt (<http://141.48.85.4/repro.Modell.htm>).

REPRO verlangt detaillierte Angaben zu Standort und Boden, Fruchtarten, Saatgut, Düngung, Düngungsterminen, sowie Ertrags- und Qualitätskennzahlen. Zur Berechnung benötigt

man eine kostenpflichtige Beratung seitens des Instituts für nachhaltige Landwirtschaft in Halle/Saale, das das Programm REPRO betreut und weiterentwickelt.

Vom **VDLUFA** (Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten) wurde eine Humusbilanzierungsmethode veröffentlicht, in die Elemente der beiden obengenannten Methoden eingeflossen sind (VDLUFA, 2004). Für den Humusbedarf gibt es dabei ‚obere‘ und ‚untere‘ Richtwerte. Die ‚unteren‘, auf denen auch die Humusbilanzierung in der BRD im Rahmen von Cross Compliance beruht, stellen Minimalanforderungen dar und sind bei optimaler mineralischer N-Düngung anzuwenden. Daher wurden für die Berechnungen im Folgenden die ‚oberen‘ Richtwerte verwendet.

Die VDLUFA-Methode differenziert nicht nach verschiedenen Böden. Der Koeffizientensatz umfaßt zahlreiche Fruchtarten. Die Bilanzierung mit dieser Methode kann händisch oder mit Hilfe eines Tabellenkalkulationsprogrammes durchgeführt werden.

Die Humusbilanzmethode der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (**Bayer. LfL**) verwendet ebenfalls die ‚oberen‘ Werte nach VDLUFA für die anbauspezifischen Veränderungen (CAPRIEL UND RIPPEL, 2007; www.lfl.bayern.de/iab/bodenschutz/12458/). Manche Faktoren, u.a. der für die Humusreproduktionsleistung von Stroh, wurden jedoch an bayerische Bedingungen angepaßt.

Die Methode der Bayerischen LfL differenziert nicht nach verschiedenen Böden. Der Koeffizientensatz umfaßt zahlreiche Fruchtarten. Die Bilanzierung mit dieser Methode kann händisch oder mit Hilfe eines Tabellenkalkulationsprogrammes (kostenloser Download aus dem Internet, www.lfl.bayern.de/iab/bodenschutz/12458/) durchgeführt werden.

Die von **Kolbe** (2007) vorgestellte Methode ist das Ergebnis von Optimierungsarbeiten an der VDLUFA-Methode auf Basis von 39 konventionellen und ökologischen Dauerfeldversuchen, die alle wesentlichen Standortbedingungen Deutschlands abdecken.

Die Kolbe-Methode differenziert zwischen sechs verschiedenen Standortgruppen. Der Koeffizientensatz umfaßt die wichtigsten Fruchtarten. Die Humusreproduktionsleistung von Stroh und organischen Düngern wird bei ansteigender Menge nicht linear mit dem gleichen Faktor, sondern bei höheren Mengen mit einem niedrigeren Faktor bewertet. Die Bilanzierung mit dieser Methode kann händisch oder mit Hilfe eines Tabellenkalkulationsprogrammes durchgeführt werden.

D-2.3 Referenzdaten

D-2.3.1 Exaktversuch ‚STIKO‘

Der Feldversuch ‚STIKO‘ wurde im Herbst 1992 in der Oberen Lobau bei Wien angelegt, um die Auswirkungen der Düngung mit Biotonne-Kompost auf den Ertrag landwirtschaftlicher Nutzpflanzen und auf die Umwelt zu untersuchen. Die Versuchsanlage umfaßt 3 Varianten mit Kompostdüngung (BK1, BK2, BK3), 3 Varianten mit mineralischer Düngung (N1, N2, N3), 5 Varianten mit kombinierter Düngung (N1BK1, N1BK2, N1BK3, N2BK1, N3BK1) und eine ungedüngte Nullvariante (O), in sechs Wiederholungen als lateinisches Rechteck angelegt. Die Parzellengröße beträgt 6,3 x 10 m. Die Aufbringungsmengen des Biotonnekompostes betragen 9, 16 und 24 t/ha/Jahr im Durchschnitt von 12 Versuchsjahren. Die mineralisch gedüngten Varianten erhielten jährlich durchschnittlich 26, 41 und 57 kg N/ha plus 51 kg/ha P₂O₅ und 85 kg/ha K₂O. Die kombiniert gedüngten Varianten erhielten keinen mineralischen Phosphor- oder Kalidünger.

Die drei Varianten mit Kompostdüngung wurden als Modell für eine humusmehrende Bewirtschaftungsweise für die Vergleiche herangezogen.

Mit Ausnahme der Düngung wurde der Versuch nach den Richtlinien des Biologischen Landbaus (EU-VO 2092/91) mit praxisüblichem Gerät bewirtschaftet. Die lokaltypische Fruchtfolge besteht zu 75 % aus Getreide (Winterweizen, Winterroggen, Hafer, Sommergerste, Dinkel) und zu 25 % aus Kartoffeln, ohne Untersaaten oder Begrünungen. Das Getreidestroh verblieb mit einer Ausnahme in allen Jahren auf dem Feld.

Die verwendeten Komposte stammten von der Kompostierungsanlage der Stadt Wien. Das Rohmaterial bestand aus getrennt gesammelten organischen Haushaltsabfällen und Strauchschnitt im Verhältnis 2:3. Der Kompost wurde in einem offenen Mietenverfahren mit regelmäßigem Umsetzen mit Umsetzgerät und Radlader erzeugt. Die verwendeten Komposte hatten im Mittel 38 % organische Substanz, 1,43 % N_{ges}, 0,62 % P₂O_{5ges}, 1,09 % K₂O_{ges}, pH 7,3, elektr. Leitfähigkeit 1,7 mS/cm und ein C/N-Verhältnis von 22.

Der Boden am Versuchsstandort ist ein kalkhaltiger Grauer Auboden, ein schluffiger Lehm mit einem pH von 7,4. Die mittlere Jahrestemperatur beträgt 10,5 °C, die durchschnittliche Jahresniederschlagssumme 540 mm.

Von diesem Versuch liegen langjährige detaillierte Ergebnisse über Ertrag, Strohanfall, Stickstoffzug (nicht in allen Jahren), Nitrat-N-Gehalt des Bodens (zu drei Terminen jährlich) sowie verschiedener anderer Parameter vor (ERHART et al., 2005; HARTL UND ERHART, 2005; ERHART et al., 2007).

Der Kohlenstoffgehalt des Bodens wurde kurz nach Versuchsbeginn in der ungedüngten Nullvariante, sowie im März 2003 und im August 2004 in allen Varianten, jeweils in 0-30 cm Bodentiefe, gemessen. Alle Messungen erfolgten durch Verbrennung in einem CNS-Analysator (NELSON UND SOMMERS, 1982). Carbonat, mittels der manometrischen Methode von Van Slyke (modifiziert, NELSON, 1982) bestimmt, wurde vom Gesamtkohlenstoff subtrahiert, um den organischen (Humus-)Kohlenstoffgehalt zu erhalten.

Die Trockenrohichte des Bodens wurde nach DIN ISO 11272 (2001) bestimmt.

D-2.3.2 Begrünungsversuche im Weinviertel

BFA führt seit 2004 in Zusammenarbeit mit dem Maschinenring Weinland, engagierten Landwirten und Bio Austria Begrünungsversuche an verschiedenen Orten im Weinviertel durch.

Es handelt sich durchwegs um Großparzellenversuche, in denen 2-3 verschiedene Begrünungsmischungen zu verschiedenen Anbauterminen, mit verschiedener Vorbodenbearbeitung (keine, Grubber, Pflug), mit verschiedenen Anbautechniken bzw. – maschinen und in unterschiedlichen Saatgutmengen angebaut wurden.

Es wurde jeweils der Feldaufgang der einzelnen Arten, sowie zu Vegetationsende die oberirdische Biomasse der Begrünungen, getrennt in Leguminosen, Nichtleguminosen und Unkräuter, anhand einer m²-Ernte erhoben. Von diesen Pflanzen und vom Boden wurden Analysen zur Bestimmung des Stickstoffgehaltes durchgeführt.

Ausgewählte Ergebnisse aus diesen Versuchen wurden – da für die Begrünungen seitens der Landwirte typischerweise keine Daten für das Gewicht des Aufwuchses vorhanden sind – als Vergleichsdaten für die Schätzung der Biomasse der Begrünungen verwendet.

D-3 Ergebnisse

D-3.1 Vergleich der Ergebnisse verschiedener Humusbilanzmethoden mit im Boden gemessenen Humusgehalten anhand des Exaktversuchs ‚STIKO‘

In der ungedüngten Nullvariante des Versuches ‚STIKO‘ nahm der Humusgehalt des Bodens während der Versuchsdauer deutlich ab, obwohl das Stroh fast immer am Feld belassen wurde. Während in der ungedüngten Nullvariante der Humusgehalt von 3,4 % auf 3,2 % abfiel, stieg er in den Kompostvarianten auf Werte zwischen 3,5 % und 3,7 % (März 2003) bzw. zwischen 3,6 % und 4,0 % im August 2004 an.

Vor der Messung im Frühjahr 2003 hatten die Kompostvarianten zuletzt im Herbst 2000 Kompost erhalten. Die höheren Werte im August 2004 gehen auf die neuerliche Kompostdüngung im Herbst 2003 zurück. Die Schwankungen der Werte in der ungedüngten Nullvariante zwischen Frühjahr 2003 und Sommer 2004 weisen auf die Umsetzungsdynamik des Humus-C hin, die von der jahreszeitlichen Witterung und der Bewirtschaftung beeinflusst wird.

Mineralische Düngung reichte aus, um den ursprünglichen Humusgehalt zu halten. Im Boden der Kompostvarianten wurden zwischen 1900 und 6500 kg/ha (Messung 2003, Abb. D-2) bzw. zwischen 4400 und 13000 kg/ha (Messung 2004, Abb. D-3) organischer Kohlenstoff zusätzlich gespeichert.

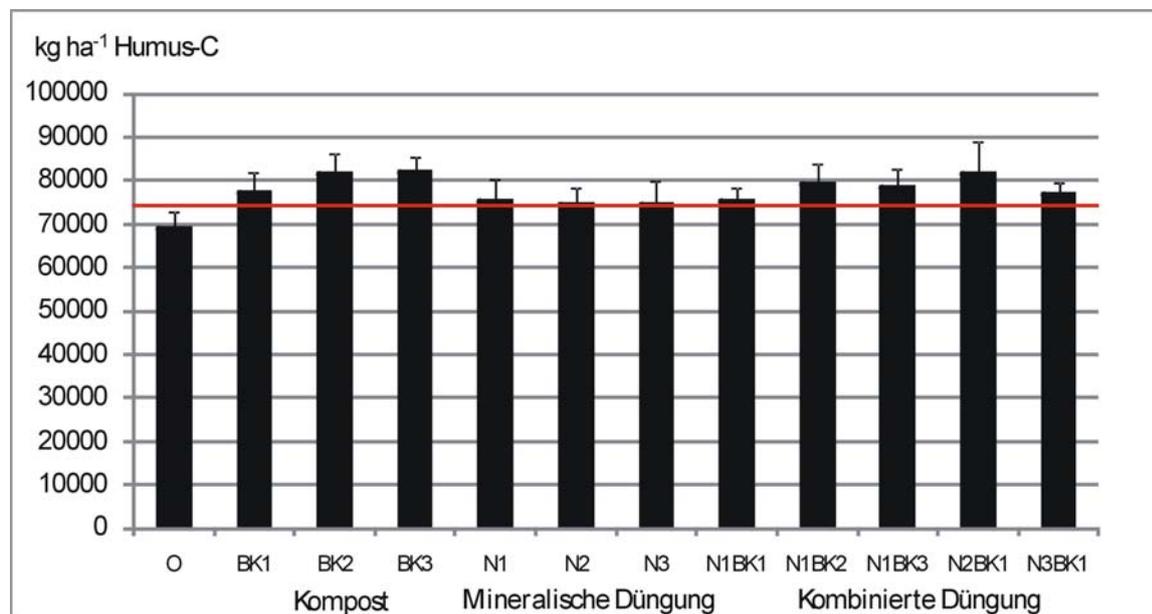


Abb. D- 2: Versuch ‚STIKO‘ - gemessener Humus-C-Gehalt im Boden (kg ha⁻¹) zu Versuchsbeginn 1992 (rote Linie) und nach 11 Versuchsjahren im März 2003 (Säulen).

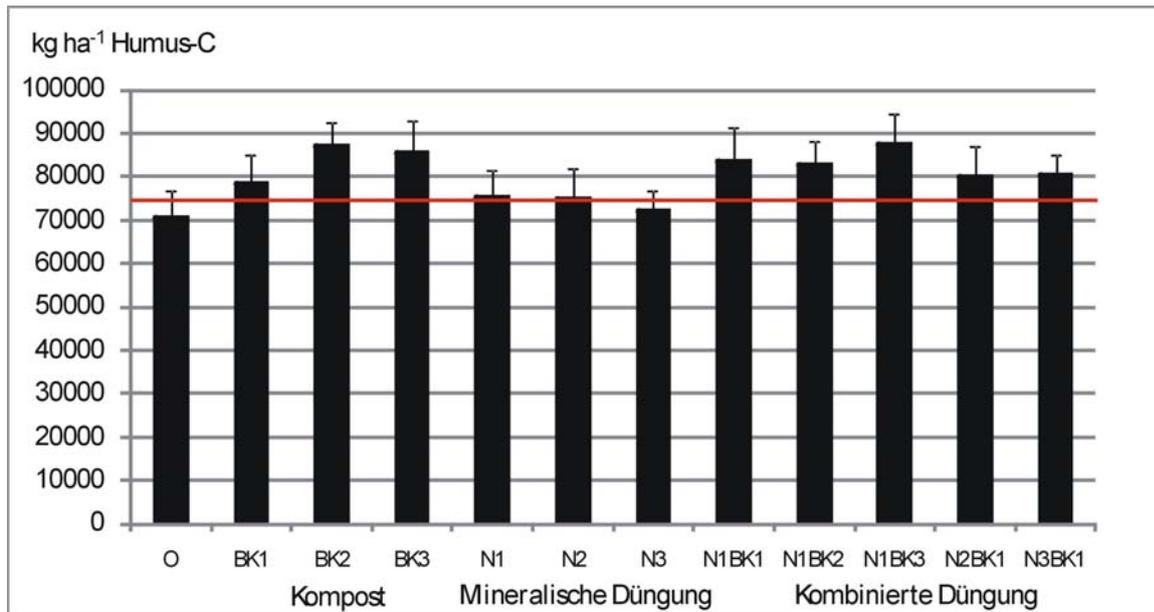


Abb. D- 3: Versuch ‚STIKO‘ - gemessener Humus-C-Gehalt im Boden (kg ha⁻¹) zu Versuchsbeginn 1992 (rote Linie) und nach 12 Versuchsjahren im August 2004 (Säulen).

Nach erfolgter Humusbilanzberechnung wurde die Differenz zwischen den Humus-C-Gehalten der kompostgedüngten Varianten zu Versuchsbeginn und nach 11 bzw. 12 Versuchsjahren mit den Humusbilanzsalden nach 11 bzw. 12 Jahren verglichen.

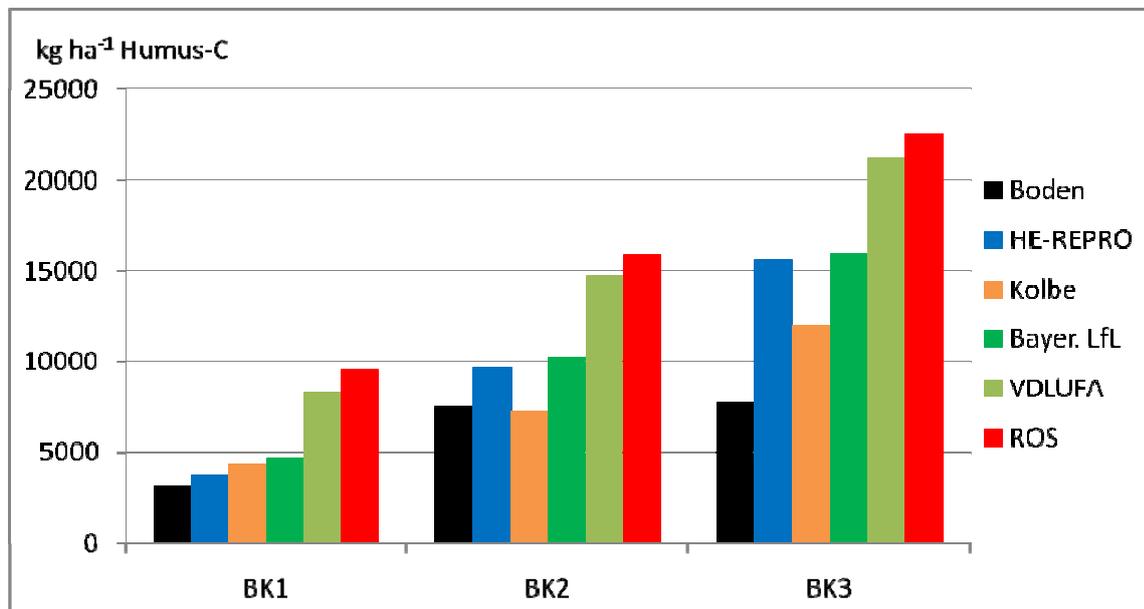


Abb. D- 4: Vergleich der Differenz an Humus-C (kg ha⁻¹) zwischen Versuchsbeginn und März 2003 mit den mittels verschiedener Humusbilanzmethoden für diesen Zeitraum errechneten Humusbilanzsalden (kg C ha⁻¹).

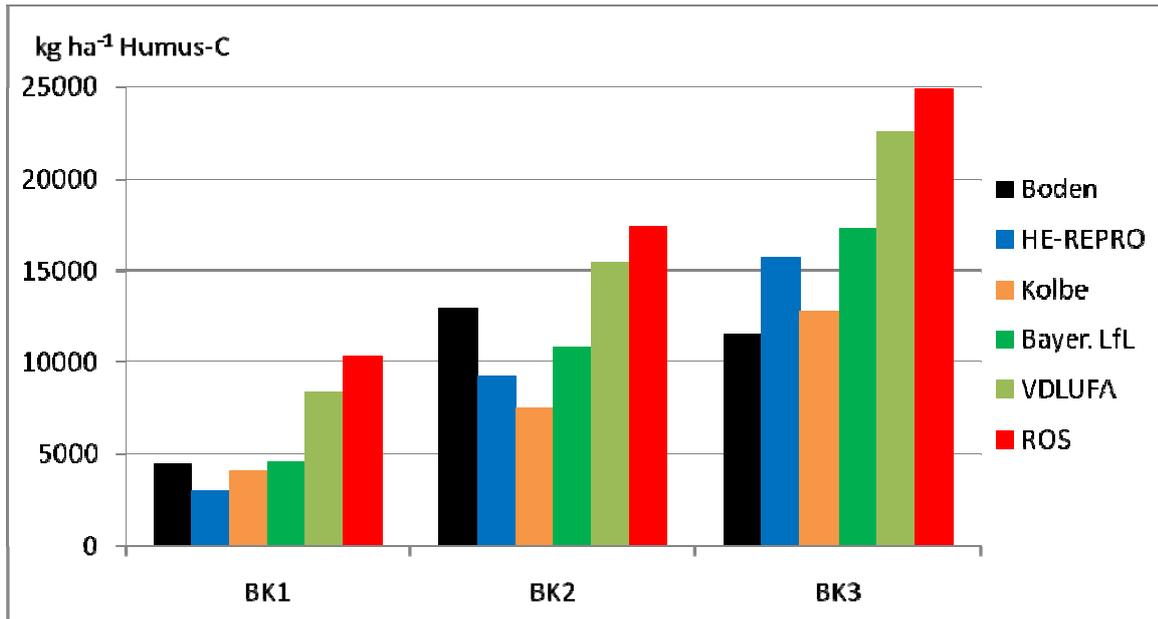


Abb. D- 5: Vergleich der Differenz an Humus-C (kg ha⁻¹) zwischen Versuchsbeginn und August 2004 mit den mittels verschiedener Humusbilanzmethoden für diesen Zeitraum errechneten Humusbilanzsalden (kg C ha⁻¹).

Bei der Berechnung mit 11 Versuchsjahren überschätzen alle Humusbilanzmethoden die im Boden verbleibenden Humus-C-Gehalte deutlich. Dies könnte damit zusammenhängen, daß die Kompostdüngung zu Versuchsbeginn mit höheren Mengen erfolgte und später zurückgefahren wurde (letzte Kompostgabe vor März 2003 erfolgte im Herbst 2000). Bei der Berechnung mit 12 Versuchsjahren – nach einer neuerlichen Kompostdüngung – ist die Schätzung durch die Humusbilanzen deutlich besser. Abb. 5 und 6 zeigen die prozentuelle Abweichung der Humusbilanzsalden von den gemessenen Werten.

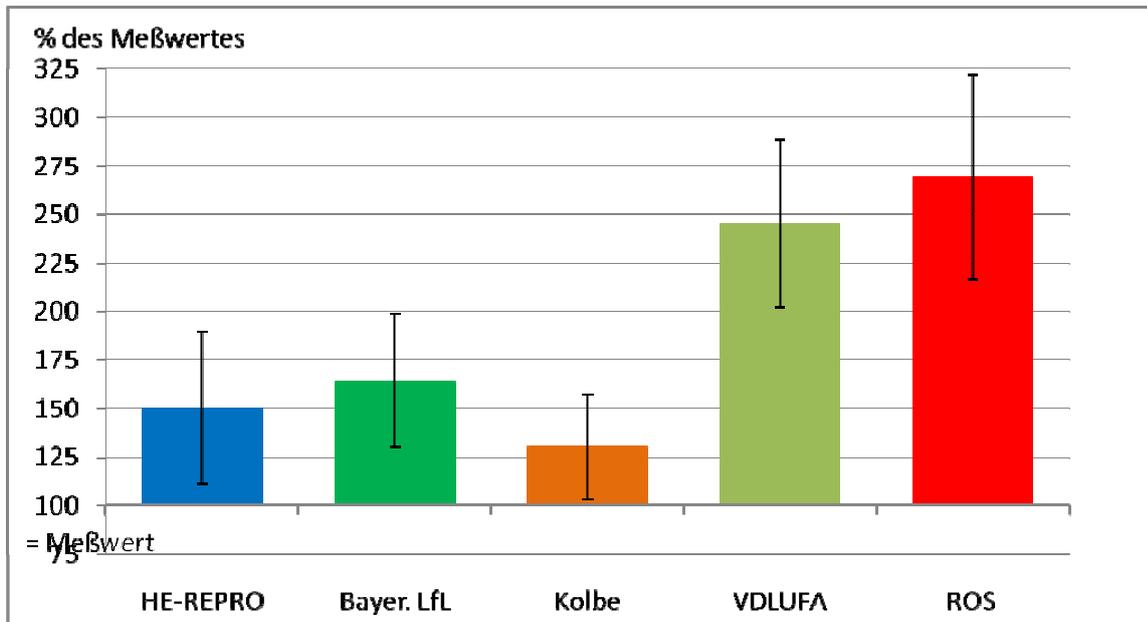


Abb. D- 6: Abweichung der mittels fünf Humusbilanzmethoden für den Versuch ‚STIKO‘ errechneten Salden von Humus-C nach 11 Bewirtschaftungsjahren (2003) von den im Boden der kompostgedüngten Varianten gemessenen C-Werten.

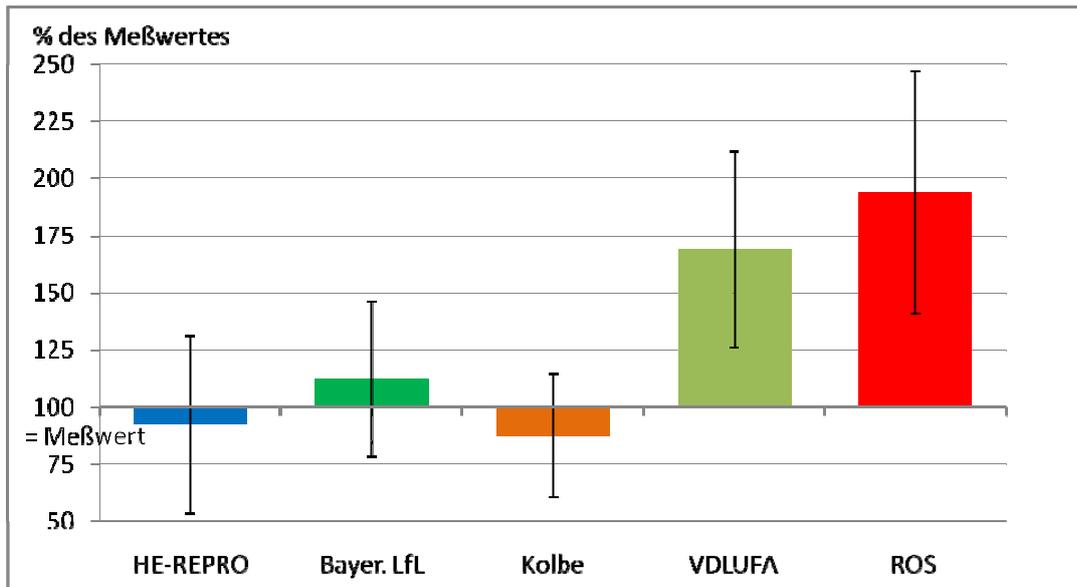


Abb. D- 7: Abweichung der mittels fünf Humusbilanzmethoden für den Versuch ‚STIKO‘ errechneten Salden von Humus-C nach 12 Bewirtschaftungsjahren (2004) von den im Boden der kompostgedüngten Varianten gemessenen C-Werten.

Der Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Humusbilanzierungsmethoden mit den nach 11 bzw. 12 Versuchsjahren gemessenen Veränderungen im C-Gehalt des Bodens der kompostgedüngten Varianten ergab zum Teil recht große Unterschiede in der Prognosegenauigkeit.

Während die HE-Methode (REPRO), die Methode der Bayerischen LfL und die Methode Kolbe bei Berechnung für 12 Versuchsjahre mit Abweichungen von -8, +12 und -13 % vom gemessenen Wert die Entwicklung des C-Gehaltes des Bodens recht zutreffend einschätzten, überschätzten die VDLUFA- und die ROS-Methode mit Abweichungen von +69 und +94 % vom gemessenen Wert die bei der gegebenen Bewirtschaftung resultierenden C-Gehalte deutlich.

Bei Berechnung für 11 Versuchsjahre schätzten die Kolbe-Methode, die HE-Methode (REPRO) und die Methode der Bayerischen LfL mit Abweichungen von +30, +50 und +64 % den resultierenden C-Gehalt des Bodens ebenfalls besser ein als die VDLUFA- und die ROS-Methode mit Abweichungen von +145 bzw. +169 % vom gemessenen Wert.

Somit erwiesen sich die HE-Methode (REPRO), die Methode Kolbe und die Methode der Bayerischen LfL als brauchbar zur Einschätzung des Humusaufbaus mittels organischer Düngung.

D-3.2 Diskussion der Ergebnisse der verschiedenen Humusbilanzmethoden mit interessierten Weinviertler Bauern und Auswahl der am besten geeigneten Methode

In der Folge wurden die Ergebnisse des Vergleichs der verschiedenen Humusbilanzierungsmethoden mit den nach 11 bzw. 12 Versuchsjahren gemessenen Veränderungen im C-Gehalt des Bodens mit interessierten Weinviertler Bauern diskutiert.

Weiters wurde erhoben, welche Bewirtschaftungs- und Erntedaten die Landwirte in welcher Detailliertheit und Genauigkeit für die Humusbilanzierung zur Verfügung stellen können:

- die Fruchtfolge: ist praktisch immer bekannt. Oft nicht protokolliert werden das genaue Anbau- und Erntedatum und die Saatgutmenge.
- der Ertrag: ist praktisch immer bekannt, Genauigkeit und Wassergehaltsangaben sind nicht immer gegeben.
- die Strohmenge: wird fast nie gemessen, kann meist nur geschätzt im langjährigen Schnitt angegeben werden. Hier sind größere Ungenauigkeiten gegeben.
- die organische Düngung: Menge ist relativ genau bekannt, oft aber nur m³-Angaben, kein Wassergehalt bekannt, keine Dichte. Untersuchungsergebnisse für Stallmist und Eigenkompost sind äußerst selten vorhanden, für zugekauften Kompost schon.
- die Zwischenfrüchte: meist ist nur die Saatgutmischung bekannt, nicht der Feldaufgang und die tatsächliche Artenzusammensetzung am Feld. Angaben zur Biomasse der Zwischenfrüchte gibt es praktisch nie, allenfalls Einschätzungen (üppig oder mager). Hier sind größere Ungenauigkeiten gegeben.

Die HE-Methode (REPRO) wurde trotz ihrer guten Ergebnisse wegen des erwarteten Zeitaufwandes zur Bereitstellung der detaillierten Inputdaten und wegen der Kosten für den REPRO-Berater von den Bauern nicht gewählt.

Für die Kolbe-Methode im Vergleich zur Methode der bayerischen LfL sprach, daß die Kolbe-Methode eine Differenzierung nach 6 verschiedenen Bodentypen bzw. Standortgruppen erlaubt und daß sie durch eine Abstufung der Reproduktionswirksamkeit der organischen Dünger (geringere relative Wirksamkeit bei höherer Aufbringungsmenge) eine bessere Anpassung bei der organischen Düngung verspricht. Darauf weist auch die geringere Abweichung bei der Berechnung mit 11 Versuchsjahren hin (siehe Abb. 5). Der Rechenaufwand und der Aufwand zur Bereitstellung der Inputdaten sind bei beiden Methoden in etwa gleich hoch.

Daher fiel die Wahl unter Berücksichtigung der seitens der Landwirtschaftsbetriebe vorhandenen Daten und des zumutbaren zeitlichen und finanziellen Aufwandes für die Humusbilanzierung auf die Methode Kolbe.

D-3.3 Proberechnungen mit praxisgerechter Datenintensität und Empfindlichkeitsberechnungen

Aus der Erhebung der seitens der Landwirtschaftsbetriebe vorhandenen Inputdaten für die Humusbilanz ergab sich, daß die größten Ungenauigkeiten bzw. Fehler bei der Strohmenge und bei den Begrünungen liegen. Daher wurden einfache Empfindlichkeitsrechnungen durchgeführt, um zu ermitteln, wie stark sich ein Schätzfehler des Landwirts bei diesen beiden Parametern auf das Ergebnis der Humusbilanz auswirken würde.

Tab. D- 1: Einfache Empfindlichkeitsberechnung für die Strohmenge: die richtige Strohmenge sei 7 t ha⁻¹, der Schätzfehler sei max. ±1 t

Strohmenge (t ha ⁻¹)	Reproduktionskoeffizient (kg C / t FM)	Resultierende Menge reproduktionswirksamer C (kg ha ⁻¹)	Fehler (kg C ha ⁻¹)
6	68	408	+121
6,5	41	267	-20
7	41	287	
7,5	41	308	+21
8	41	328	+41

Es ergibt sich ein Fehler von bis zu 121 kg C ha⁻¹ bei einer Fehleinschätzung der Strohmenge um bis zu einer Tonne. Hier wirkt sich der höhere Reproduktionskoeffizient bei geringerer Strohmenge stark aus.

Tab. D- 2: Einfache Empfindlichkeitsberechnung für die Gründungs-Biomasse: die richtige Menge sei 10 t ha⁻¹, die Fehlschätzung sei max. die Hälfte bzw. das Doppelte

Gründungs-Biomasse (FG) (t ha ⁻¹)	Reproduktionskoeffizient (kg C / t FM)	Resultierende Menge reproduktionswirksamer C (kg ha ⁻¹)	Fehler (kg C ha ⁻¹)
5	5,5	28	-4
7,5	5,5	41	+9
10	3,2	32	
15	3,2	48	+16
20	1,0	20	-12

Durch die geringere Reproduktionswirksamkeit der Begrünungsbiomasse ist der resultierende Fehler bei der Fehleinschätzung der Begrünungsbiomasse in einem in der Praxis wahrscheinlichen Bereich mit unter 20 kg C ha⁻¹ wesentlich geringer.

Eine Ausschaltung solcher Schätzungenauigkeiten wäre durch die stichprobenartige Gewichtsbestimmung von Stroh bzw. Begrünungsbiomasse möglich.

Die erzielte Begrünungsbiomasse ist von zahlreichen Faktoren abhängig: v.a. Saatgutmischung, Anbautechnik, Anbauzeitpunkt, Jahreswitterung. Zur besseren Einschätzung ist eine Sammlung von in Versuchen erzielten Begrünungsbiomassen samt den dazugehörigen Daten der genannten Einflußfaktoren nötig. Für die Berechnungen der Praxisschläge wurde die Biomasse der Begrünungen unter Zuhilfenahme von vorhandenen Vergleichsdaten aus mehrjährigen Begrünungsversuchen der BFA geschätzt.

D-3.4 Erprobung der ausgewählten Methode an Daten von Praxisbetrieben

Schließlich wurde die ausgewählte Methode Kolbe an Daten von Praxisbetrieben erprobt. Hier seien exemplarisch drei Schläge mit ihrer Humusbilanzberechnung über jeweils 11 Jahre vorgestellt:

Schlag 1:

Boden: Tschernosem (Standortgruppe 1)

Fruchtfolge: Sommergerste
 Luzerne
 Luzerne
 Durumweizen
 Winterweizen
 Kartoffel
 Winterweizen
 Sommergerste
 Zwiebel
 Winterweizen
 Kartoffel

Begrünungen: dreimal (Phacelia-Platterbse-Sommerwicke, Phacelia-Senf, Senf)

Organische Düngung: Mistkompost 60 t ha⁻¹; das Stroh wurde abgeführt.

Tab. D- 3: Ergebnis der Humusbilanzierung mit Methode Kolbe für den Praxis Schlag 1 (11 Jahre).

Fruchtartspezifische Veränderung des Humusvorrates (,Humusbedarf') (kg C ha ⁻¹)	+1550
Humuszufuhr (kg C ha ⁻¹)	+3741
Humussaldo (kg C ha ⁻¹)	+5291

Die Bewirtschaftung von Schlag 1 beinhaltet zahlreiche humusmehrende Maßnahmen und Kulturen: Bodenruhe durch zweieinhalbjährige Luzerne, dreimal Begrünung, sowie Kompostgabe von in Summe 60 t ha⁻¹.

Daher ist auch der Humussaldo mit +481 kg Humus-C pro Hektar und Jahr ganz deutlich positiv.

Schlag 2:

Boden: Kolluvium, lehmiger Schluff (Standortgruppe 6)

Fruchtfolge: Dinkel
 Zwiebel
 Winterweizen
 Kartoffel
 Winterweizen
 Luzerne
 Luzerne

Luzerne
 Winterweizen
 Kartoffel
 Winterweizen

Begrünungen: einmal (Phacelia-Platterbse-Sommerwicke)

Organische Düngung: keine, das Stroh wurde abgeführt.

Tab. D- 4: Ergebnis der Humusbilanzierung mit Methode Kolbe für den Praxisschlag 2 (11 Jahre).

Fruchtartsspezifische Veränderung des Humusvorrates (,Humusbedarf') (kg C ha ⁻¹)	-3380
Humuszufuhr (kg C ha ⁻¹)	+43
Humussaldo (kg C ha ⁻¹)	-3337

Trotz Bodenruhe durch dreieinhalbjährige Luzerne und einmaliger Begrünung übersteigt auf diesem Boden der Humusbedarf die Humuszufuhr bei weitem.

Der Humussaldo ist mit -303 kg Humus-C pro Hektar und Jahr ganz deutlich negativ.

Schlag 3:

Boden: Braunlehm (Standortgruppe 6)

Fruchtfolge: Durumweizen
 Erbse
 Winterweizen
 Luzerne
 Luzerne
 Luzerne
 Winterweizen
 Winterweizen
 Mais
 Winterweizen
 Hafer

Begrünungen: zweimal (Sommerwicke; Senf-Phacelia)

Organische Düngung: Mistkompost 10 t ha⁻¹; das Stroh verblieb am Feld.

Tab. D- 5: Ergebnis der Humusbilanzierung mit Methode Kolbe für den Praxisschlag 3 (11 Jahre).

Fruchtartsspezifische Veränderung des Humusvorrates (,Humusbedarf') (kg C ha ⁻¹)	-1800
Humuszufuhr (kg C ha ⁻¹)	+3226
Humussaldo (kg C ha ⁻¹)	+1426

Durch das Belassen des Getreidestrohs am Feld, zusammen mit Bodenruhe durch dreieinhalbjährige Luzerne, zweimalige Begrünung sowie eine geringe Kompostgabe wird auf diesem Schlag trotz hohem Humusbedarfs ein leicht positiver Humusbilanzsaldo erreicht.

Der Humussaldo ist mit +130 kg Humus-C pro Hektar und Jahr schwach positiv.

In Summe verlief die Erprobung der ausgewählten Methode an Daten von Praxisbetrieben positiv. Diese Methode wird daher zukünftig auch in den regelmäßig stattfindenden Workshops von BFA mit Bauern aus anderen Regionen verwendet werden.

D-4 Diskussion

Die im Projekt errechneten Humusbilanzsalden lagen zwischen +370 und +1100 kg C/ha /J im Feldversuch mit Kompostdüngung und zwischen -300 und +480 kg C/ha /J auf Praxis-schlägen. Der Wert von +480 kg C wurde hier mit Feldfutterbau, Kompostdüngung und Begrünungen erzielt.

Diese Werte liegen in dem Bereich, der üblicherweise für die mit Management-Praktiken wie Begrünungen, Stallmistdüngung, komplexen Fruchtfolgen mit Tiefwurzlern etc. erzielbare C-Anreicherung angegeben wird (HÜLSBERGEN, 2009; LAL, 2004 und 2008).

Die C-Speicherkapazität von Böden hängt von der Bodentextur, dem Bodenprofil und dem Klima ab. Die Rate der Kohlenstoffanreicherung hängt vom Ausmaß der Bewirtschaftungsänderung ab bzw. davon, wie weit der C-Gehalt des Bodens von seinem ursprünglichen Gleichgewicht entfernt war (HÜLSBERGEN, 2009; LAL, 2004). Die Rate der C-Anreicherung ist am höchsten unmittelbar nach der Umstellung auf humusmehrende Bewirtschaftungsmethoden, sie erreicht nach 5-20 Jahren ihr Maximum und nimmt dann langsam ab, bis sich in temperatem Klima nach ca. 100 Jahren ein neues Gleichgewicht eingestellt hat (LAL, 2004; SMITH, 2004).

C-Senken in landwirtschaftlichen Böden sind nicht permanent und bestehen nur so lange, wie die entsprechenden Bewirtschaftungsmaßnahmen beibehalten werden. Sobald diese aufgegeben werden, wird der im Boden angereicherte Kohlenstoff wieder freigesetzt (SMITH, 2004).

Unter der optimistischen Annahme, daß durch die Forcierung von humusmehrenden Bewirtschaftungsmaßnahmen auf der gesamten österreichischen Ackerfläche (1,39 Mio. ha) jeweils 500 kg C/ha/J gespeichert würden, wären das in Summe 0,7 Mio. t C/J, entsprechend 2,55 Mio. t CO₂/J. Die gesamten CO₂-Emissionen in Österreich betragen im Jahr 2008 73,6 Mio. t, die gesamten Treibhausgasemissionen lagen bei 86,6 Mio. t CO₂-Äquivalente (UBA, 2010). Zur Erreichung seiner Kyoto-Verpflichtung muss Österreich diese Emissionen um 17,8 Mio. t CO₂-Äquivalente /Jahr reduzieren.

Der Vergleich zeigt, daß die C-Sequestrierung in landwirtschaftlichen Böden einen gemessen an den völkerrechtlichen Verpflichtungen merklichen Beitrag zur Verringerung der Treibhausgasemissionen leisten kann. Da die betreffenden Techniken bekannt und relativ leicht umsetzbar sind, wäre dieser Beitrag auch rasch zu verwirklichen. Jedoch können die aus der Verbrennung fossiler Energie stammenden CO₂-Emissionen durch C-Sequestrierung in landwirtschaftlichen Böden bei weitem nicht kompensiert werden.

Um die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre auf einem noch nicht katastrophalen Level (450-650 ppm) zu stabilisieren, ist in den nächsten 20-30 Jahren eine drastische Reduktion der CO₂-Emissionen nötig. Da die Maßnahmen zur C-Sequestrierung in landwirtschaftlichen Böden relativ schnell wirksam werden könnten, könnten sie – als Teil eines Maßnahmenbündels - dazu genutzt werden, uns Zeit zu verschaffen, bis neue Energie-Technologien entwickelt und umgesetzt sind (SMITH, 2004). Dies sollte aber keinesfalls dazu führen, daß notwendige Emissionsminderungen anderer Wirtschaftsbereiche nicht in Angriff genommen werden.

In jedem Fall aber verbessert der gespeicherte Kohlenstoff die Bodenfunktionen, er erhöht die Wasserspeicherung, die Infiltration und die Nährstoffversorgung der Pflanzen, und vermindert die Erosion, und ist deshalb – auch für die Klimawandelanpassung – sehr positiv zu bewerten.

Literaturverzeichnis

AUTORENKOLLEKTIV (1977): Empfehlungen zur effektiven Versorgung der Böden mit organischer Substanz. Hrsg.: Akademie der Landwirtschaftswissenschaften d. DDR. Agrabuch, Leipzig 6.

CAPRIEL P., RIPPEL R. (2007): Humusbilanz für Beratung in Bayern.
<http://www.lfl.bayern.de/iab/bodenschutz/12458/>

DIN ISO 11272 (2001): Bestimmung der Trockenrohddichte. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

ERHART E., FEICHTINGER F., HARTL W. (2007): Nitrogen leaching losses under crops fertilized with biowaste compost compared with mineral fertilization. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 170, 608-614.

ERHART E., HARTL W., PUTZ B. (2005): Biowaste compost affects yield, nitrogen supply during the vegetation period and crop quality of agricultural crops. *Europ. J. Agron.* 23, 305-314.

HARTL W., ERHART E. (2005): Crop nitrogen recovery and soil nitrogen dynamics in a 10-year field experiment with biowaste compost. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 168, 781-788.

HUDSON B. D. (1994): Soil organic matter and available water capacity. *J. Soil and Water Cons.* 49, 189-194.

HÜLSBERGEN K.-J. (2003): Entwicklung und Anwendung eines Bilanzierungsmodells zur Bewertung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Systeme. Shaker Verlag, Aachen.

HÜLSBERGEN K.-J. (2009): Möglichkeiten der C-Sequestrierung landwirtschaftlich genutzter Böden. In: Ökoregion Kaindorf (Hrsg.): Tagungsband Humus Symposium 2009. 23.-24. 9. 2009, Ökoregion Kaindorf, Stmk.

KOLBE H. (2007): Einfache Methode zur standortangepassten Humusbilanzierung von Ackerland unterschiedlicher Anbauintensität. In: ZIKELI S., CLAUPEIN W., DABBERT S., KAUFMANN B., MÜLLER T., VALLE ZÁRATE A. (Hrsg.): Zwischen Tradition und Globalisierung. Beiträge zur 9. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau. pp. 5-8. Verlag Dr. Köster, Berlin.

LAL R. (2004): Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304, 1623-1627.

LAL R. (2008): Carbon sequestration. *Phil. Trans. R. Soc. B.* 363, 815-830.

LEITHOLD G., HÜLSBERGEN K.-J., MICHEL D., SCHÖNMEIER H. (1997): Humusbilanzierung - Methoden und Anwendung als Agrar-Umweltindikator. In: DEUTSCHE BUNDESSTIFTUNG UMWELT: Umweltverträgliche Pflanzenproduktion – Indikatoren, Bilanzierungsansätze und ihre Einbindung in Ökobilanzen. Initiativen zum Umweltschutz 5, pp. 43-54. Zeller Verlag, Osnabrück.

NELSON D., SOMMERS L. (1982): Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: PAGE A. L., MILLER R. H., KEENEY D. R. (eds.): *Methods of Soil Analysis. Part 2.* American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, WI. pp. 539-579.

NELSON R. E. 1982. Carbonate and Gypsum. In: PAGE A. L., MILLER R. H., KEENEY D. R. (eds.): *Methods of soil analysis. Part 2.* American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, WI. pp. 181-197.

PIMENTEL D., HEPPERLY P., HANSON J., DOUDS D., SEIDEL R. (2005): Environmental, energetic, and economic comparisons of organic and conventional farming systems. *BioScience* 55, 573-582.

SCHACHTSCHABEL P., BLUME H.-P., BRÜMMER G., HARTGE K. H., SCHWERTMANN U. (1998): *Lehrbuch der Bodenkunde*. 14. Aufl., Ferd. Enke Verlag, Stuttgart.

SCHNUG E., HANEKLAUS S. (2002): Landwirtschaftliche Produktionstechnik und Infiltration von Böden – Beitrag des ökologischen Landbaus zum vorbeugenden Hochwasserschutz. *Landbauforschung Völkenrode* 52, 197-203.

SHEPHERD M., HARRISON R., WEBB J. (2002): Managing soil organic matter – implications for soil structure on organic farms. *Soil Use and Management* 18, 284-192.

SMITH P. (2004): Soils as carbon sinks: the global context. *Soil Use Management* 20, 212-218.

UBA (Umweltbundesamt; Hrsg., 2010): *Klimaschutzbericht 2010*. Reports, Bd. REP-0267. Umweltbundesamt, Wien.

VDLUFA (Hrsg., 2004): *Standpunkt Humusbilanzierung. Methode zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland*. VDLUFA-Verlag, Bonn.

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildungen

- Abb. D- 1:** Prinzip der Humusbilanzierung..... 8
- Abb. D- 2:** Versuch ‚STIKO‘ - gemessener Humus-C-Gehalt im Boden (kg ha⁻¹) zu Versuchsbeginn 1992 (rote Linie) und nach 11 Versuchsjahren im März 2003 (Säulen). 11
- Abb. D- 3:** Versuch ‚STIKO‘ - gemessener Humus-C-Gehalt im Boden (kg ha⁻¹) zu Versuchsbeginn 1992 (rote Linie) und nach 12 Versuchsjahren im August 2004 (Säulen). 12
- Abb. D- 4:** Vergleich der Differenz an Humus-C (kg ha⁻¹) zwischen Versuchsbeginn und März 2003 mit den mittels verschiedener Humusbilanzmethoden für diesen Zeitraum errechneten Humusbilanzsalden (kg C ha⁻¹). 12
- Abb. D- 5:** Vergleich der Differenz an Humus-C (kg ha⁻¹) zwischen Versuchsbeginn und August 2004 mit den mittels verschiedener Humusbilanzmethoden für diesen Zeitraum errechneten Humusbilanzsalden (kg C ha⁻¹). 13
- Abb. D- 6:** Abweichung der mittels fünf Humusbilanzmethoden für den Versuch ‚STIKO‘ errechneten Salden von Humus-C nach 11 Bewirtschaftungsjahren (2003) von den im Boden der kompostgedüngten Varianten gemessenen C-Werten. 13
- Abb. D- 7:** Abweichung der mittels fünf Humusbilanzmethoden für den Versuch ‚STIKO‘ errechneten Salden von Humus-C nach 12 Bewirtschaftungsjahren (2004) von den im Boden der kompostgedüngten Varianten gemessenen C-Werten. 14

Tabellen

- Tab. D- 1:** Einfache Empfindlichkeitsberechnung für die Strohmenge: die richtige Strohmenge sei 7 t ha⁻¹, der Schätzfehler sei max. ±1 t 16
- Tab. D- 2:** Einfache Empfindlichkeitsberechnung für die Gründungs-Biomasse: die richtige Menge sei 10 t ha⁻¹, die Fehlschätzung sei max. die Hälfte bzw. das Doppelte 16
- Tab. D- 3:** Ergebnis der Humusbilanzierung mit Methode Kolbe für den Praxisschlag 1 (11 Jahre). 17
- Tab. D- 4:** Ergebnis der Humusbilanzierung mit Methode Kolbe für den Praxisschlag 2 (11 Jahre). 18
- Tab. D- 5:** Ergebnis der Humusbilanzierung mit Methode Kolbe für den Praxisschlag 3 (11 Jahre). 18