

Validierung von Humusbilanzen in Schweizer landwirtschaftlichen Dauerfeldversuchen

H.-R. Oberholzer, H. Holenstein, B. Marbot, P. Weisskopf

Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART), Zürich

1. Einleitung

Menge und Zusammensetzung der organischen Bodensubstanz (Humus) sind zentrale Elemente der Bodenqualität und beeinflussen direkt oder indirekt die meisten Bodenfunktionen. Deshalb ist es bei der Nachhaltigkeitsbeurteilung einer Bodenbewirtschaftung wichtig zu überprüfen, ob die Erhaltung des Humusgehaltes der Böden gewährleistet ist. Außer der regelmäßigen Kontrolle durch direkte Messung des Humusgehaltes stehen auch verschiedene Methoden zur indirekten Abschätzung der Bewirtschaftungseinflüsse auf den Humusgehalt zur Verfügung. C-Simulationsmodelle werden vorwiegend für wissenschaftliche Untersuchungen zur langfristigen Entwicklung des Bodenkohlenstoffs unter bestimmten Umwelteinflüssen eingesetzt. Daneben gibt es einfache Humusbilanzmodelle für die Praxis und Beratung, mit denen sich die Bewirtschaftungsmaßnahmen von Landwirtschaftsbetrieben so planen lassen, dass die organische Bodensubstanz und damit auch die Bodenqualität langfristig erhalten werden können.

Eine wichtige Voraussetzung beim Einsatz von Beurteilungsmethoden für die praktische Anwendung und den Vollzug ist die Sicherheit, dass die verwendete Methode unter gegebenen Standortbedingungen richtige Ergebnisse liefert. Deshalb wurde eine Validierung von vorhandenen Humusbilanz-Methoden anhand von Ergebnissen aus Dauerversuchen in der Schweiz durchgeführt.

2. Methoden

Datengrundlage für die Validierung war die gemessene Entwicklung der Humusmengen in den drei Schweizer Dauerfeldversuchen DOK, A493 und p24A während 31, 60 bzw. 29 Jahren. In allen drei Versuchen werden die Auswirkungen von verschiedenen Bewirtschaftungsmaßnahmen auf die Böden untersucht. Im DOK-Versuch in Therwil (Fliessbach et al., 2007; Tab. 1) werden seit 1978 die fol-

genden drei Anbausysteme miteinander verglichen: Biologisch-dynamisch (D): Düngung mit kompostiertem Mist und Gülle, Pflanzenschutz nach biologischen Richtlinien (ohne Kupferanwendung), Anwendung von biologisch-dynamischen Präparaten; Biologisch organisch (O): Düngung mit Rottemist und Gülle, Pflanzenschutz nach biologischen Richtlinien; Konventionell (K): Düngung mit Mist, Gülle und mineralischer Ergänzung, Pflanzenschutz mit Pestiziden. Diese drei Bewirtschaftungssysteme werden auf zwei Düngungsstufen, entsprechend 0.7 und 1.4 DGVE/ha, durchgeführt (D1, O1, K1 bzw. D2, O2, K2) und verglichen mit: „Mineralisch“ (M): 1. Fruchtfolgeperiode ohne Düngung, seither rein mineralische Düngung, konventioneller Pflanzenschutz, , und „Ohne Düngung“ (N): keine Düngung, Pflanzenschutz wie bei D. Eine 7-jährige Fruchtfolge mit zwei Jahren Kleegrass wird in drei Wiederholungen zeitlich versetzt angebaut. Alle Erntenebenprodukte wurden bei allen Verfahren abgefahren.

Tab. 1: Standortinformationen der 3 Dauerversuche

	DOK	A493	p24A
Ort	Therwil	Zürich	Changins
Jahresmitteltemperatur [°C]	9.5	7.8	9.5
Durchschnittlicher Jahresniederschlag [mm]	785	1000	970
Höhe [m.ü.M.]	300	420	430
Bodentyp	pseudovergleyte Parabraunerde	Braunerde	lessivierte Braunerde
Ton [Gew.%]	12	14	19
Schluff [Gew.%]	71	27	26
Sand [Gew.%]	16	57	55
Corg [Gew.%]	1.5	1.3	1.2
pH-Wert [H ₂ O]		6.5	7.4

Im A493-Versuch in Zürich-Reckenholz (Walther et al., 2001, Tab. 1) werden mineralische Düngungsverfahren mit unterschiedlicher Dosierung von P und K bzw. N mit verschiedenen organischen Düngungsverfahren (Mist, Kompost, Klärschlamm und Torf) verglichen, jeweils mit und ohne mineralische PK-Ergänzungsdüngung. In einer achtjährigen Fruchtfolge Winterweizen/Zwischenkultur

- Mais - Kartoffeln - Winterweizen/Zwischenkultur - Mais - Sommergerste - Klee-gras - Klee-gras werden die Kulturen bei praxisüblicher Bewirtschaftung (bezogen auf Bodenbearbeitung und Pflanzenschutz) angebaut. Alle Ernteprodukte werden abgeführt.

Im Versuch p24A in Changins (Maltas et al., 2012; Tab. 1) werden Verfahren mit mineralischer und organischer Düngung in Form von Gründüngung, Strohdüngung, Mist in 2 Düngungsstufen und Gülle untersucht. In der fünf bis sechs Jahre dauernden Fruchtfolge werden 60 bis 70 % Getreide sowie Raps und Mais angebaut.

In allen Versuchen wird in regelmäßigen Abständen der Humusgehalt der Böden untersucht. Daraus wurden die Mengen an organischem Kohlenstoff in den obersten 20 cm und mittels linearer Regression die Entwicklung der gemessenen C-Mengen in den einzelnen Versuchsverfahren berechnet.

Für die Berechnung der zu erwartenden Entwicklung der Humusgehalte wurden folgende Methoden verwendet: SALCA, die Humusbilanzmethode nach Neyroud (Neyroud et al., 1997), die in der Schweiz zur Verwendung in Ökobilanzen in der Landwirtschaft erweitert wurde (Oberholzer et al., 2012) die VDLUFA-Methode (VDLUFA 2004), je mit oberen und unteren Richtwerten (VDLUFA oben bzw. VDLUFA unten); die HU-MOD-Methode, (Brock et al., 2012), Candy Carbon Balance (CCB, Franko et al., 2011) und SIMEOS-AMG (Saffih-Hdadi und Mary, 2008). Die Humusbilanzmodelle berechnen die jährliche C-Bilanz anhand des C-Eintrags durch Dünger und Pflanzen minus dem C-Austrag durch Mineralisierung. Die Humusbilanzmodelle SALCA und VDLUFA rechnen vorwiegend mit fixen Beiträgen für jede Kultur bzw. jeden Dünger. HU-MOD berechnet die Bilanz differenzierter und integriert dabei die Erträge, die Standortqualität und mineralische Stickstoffdünger. CCB und SIMEOS-AMG sind vereinfachte C-Simulationsmodelle, die die Entwicklung der C-Mengen im Boden in Jahres-schritten berechnen.

3. Resultate und Diskussion

Die Veränderung der organischen Kohlenstoffmenge in den Böden wurde mittels linearer Regression berechnet und in $t\ ha^{-1}\ Jahr^{-1}$ angegeben, weil exponentielle Kurven keine wesentlich besseren Anpassung an die Messwerte

ergaben (Abb. 1). Die Messwerte aller drei Versuche zeigten während der Untersuchungszeit in den meisten Verfahren eine Abnahme der C-Menge in den Böden. Die grösste Spannweite bei der Entwicklung der C-Menge in den Böden zeigt der DOK-Versuch. Nur im biologisch-dynamischen Verfahren mit ausreichender Düngung (D2) konnte die C-Menge im Boden erhalten werden.

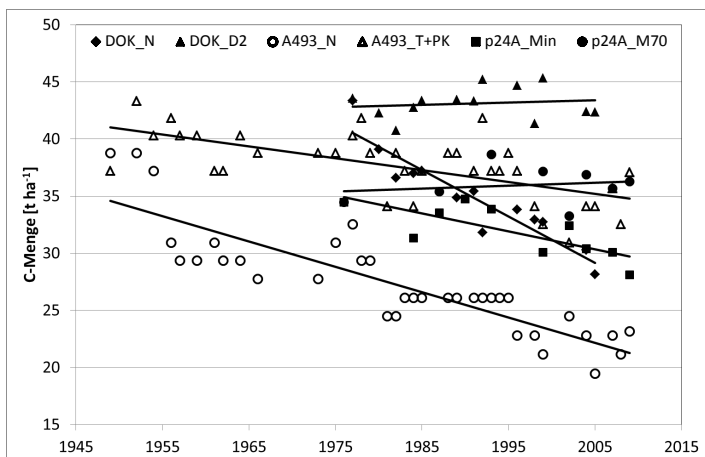


Abb.1: Verlauf der C-Mengen im Boden in den Versuchen DOK, A493 und p24A, jeweils der Verfahren mit der stärksten und der geringsten Abnahme bzw. höchsten Zunahme während der gesamten Versuchsdauer

Die geringsten Abnahmen mit ca. $0,1 \text{ t ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ verzeichneten das biologisch-organische und das konventionelle Verfahren mit ausreichender Düngung (O2, K2), deutlich stärkere Abnahmen mit $0,2$ bis $0,24 \text{ t ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ wiesen die Verfahren mit reduzierter Düngung auf, und am stärksten ist der C-Verlust in den Böden des Verfahrens ohne Düngung ($0,41 \text{ t ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$).

In den Versuchen A493 und p24A wurden die höchsten Abnahmen in den Verfahren ohne Düngung sowie in den rein mineralisch gedüngten Verfahren beobachtet. Im A493-Versuch verzeichneten die Verfahren mit Zugabe von Kompost und Torf mit mineralischer PK-Ergänzungsdüngung die geringsten Abnahmen. Im Versuch p24A war der Verlust an organischem Boden-Kohlenstoff bei Strohdüngung beinahe gleich gross wie bei rein mineralischer Düngung, etwas geringer bei Gründüngung und bei Düngung mit 35 t Mist und 60 m^3 Gülle alle drei Jahre. Eine Zunahme konnte bei der Düngung mit 70 t Mist alle drei Jahre festgestellt werden. Im Versuch A493 können die Abnahmen des organischen Bodenkohlenstoffs

durch die Bewirtschaftungsänderung von Grünland zu Ackernutzung erklärt werden. Allerdings ist es erstaunlich, dass auch nach 60 Jahren Versuchsdauer kaum Anzeichen erkennbar sind, dass ein Gleichgewichtszustand erreicht worden wäre. Für die Abnahme der organischen Kohlenstoffmenge in den Versuchen p24A und DOK - insbesondere bei einer ausgewogenen Fruchtfolge mit 2 Jahren Kunstwiese im DOK-Versuch und bei Verfahren mit ausreichender organischer Düngung - ließen sich keine eindeutigen Ursachen finden.

Tab.2: Korrelationskoeffizienten zwischen gemessenen und berechneten Veränderungen der organischen Kohlenstoffmengen in den Versuchsböden

	DOK	A493	p24A
SALCASQ	0.83	0.75	0.89
VDLUF oben	0.85	0.83	0.94
VDLUFA unten	0.85	0.83	0.90
HU-MOD	0.88	0.53	0.89
CCB	0.83	0.67	0.60
SIMEOS-AMG			0.90

Zur Beurteilung der Humusbilanzmethoden wurden die Bilanzen von SALCA, VDLUFA oben, VDLUFA unten und HU-MOD direkt mit den gemessenen jährlichen Veränderungen der organischen C-Mengen in den Versuchsböden verglichen. Für CCB wurde aus den errechneten Verläufen der organischen C-Mengen in den Böden - wie bei den gemessenen Werten mittels linearer Regression - die errechnete jährliche Veränderung im Boden berechnet. Die berechneten und gemessenen Veränderungen werden in Abbildung 2 dargestellt und in einem ersten Schritt anhand der Korrelationskoeffizienten (Tab. 2) beurteilt.

Die Korrelationen sind generell sehr hoch, d. h. die Methoden sind in der Lage, die Unterschiede zwischen den Verfahren korrekt darzustellen. Lediglich p24A für CCB und im A493-Versuch für SALCA und CCB sind die Korrelationen etwas geringer und für HU-MOD am geringsten. Absolut gesehen schätzen alle Humusbilanzmethoden die Entwicklung der organischen Kohlenstoffmengen in allen Versuchen deutlich positiver ein als sie tatsächlich gemessen wurden und überschätzen dadurch die Wirkung der einzelnen Verfahren klar, was sich sowohl in einer Parallelverschiebung der Kurven in Abbildung 2 wie auch in einer größeren Steigung im Vergleich zur 1:1 Linie manifestiert. Dabei unterscheiden

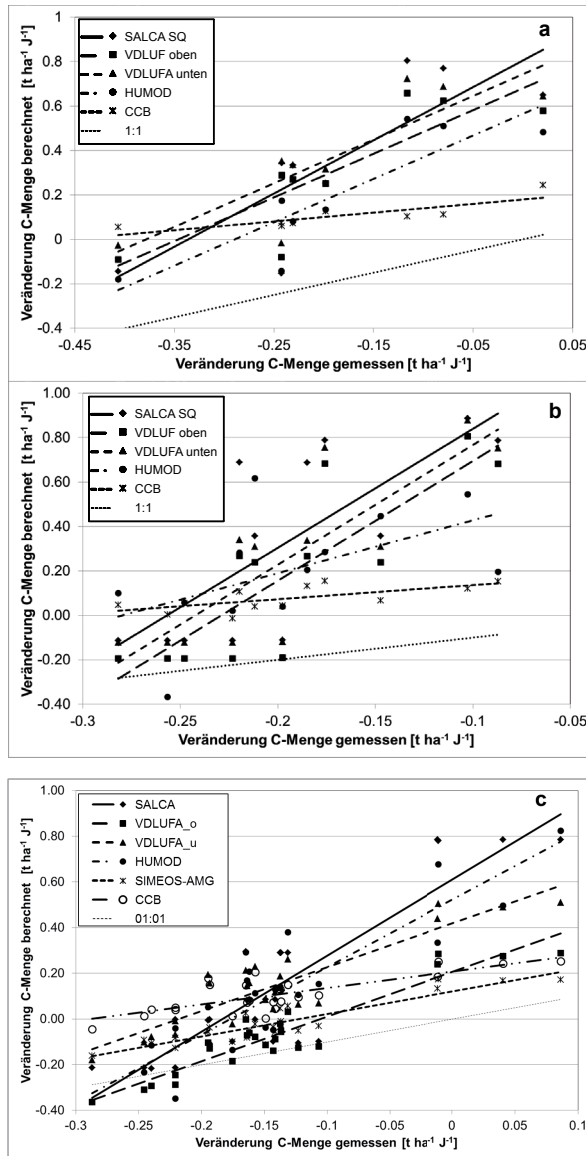


Abb.2: Gemessene und mit den verschiedenen Humusbilanzmethoden berechnete Veränderungen der Kohlenstoffmengen in den Verfahren der Versuche DOK (a), A493 (b) und p24A (c); als Anhaltspunkt ist jeweils die 1:1 Linie eingezeichnet

sich die Methoden SALCA, VDLUFA oben, VDLUFA unten und HU-MOD in den Versuchen DOK und A493 nur geringfügig, während CCB ebenfalls generell zu hohe Veränderungen berechnet, aber die Differenzierung zwischen den Verfahren unterschätzt. Im p24A-Versuch sind die Ergebnisse für SALCA und HU-MOD ähnlich wie in den andern Versuchen: Beide schätzen die Veränderung der organischen Kohlenstoffmenge zu hoch ein und überschätzen auch die Verfahrenswirkung, vor allem im Verfahren mit hoher Mistgabe, während dies für die VDLUFA-Methoden in diesem Versuch weniger ausgeprägt ist. Die nur in diesem Versuch eingesetzte Humusbilanzmethode SIMEOS-AMG schätzt die Veränderung der organischen Kohlenstoffmenge am besten. SIMEOS-AMG konnte leider nur in diesem Versuch eingesetzt werden, da in dieser Methode der Einsatz von Klee gras in der Fruchtfolge noch nicht implementiert ist.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die geprüften Methoden Veränderungen der organischen Kohlenstoffmenge in den Böden für praktische Anwendungszwecke nicht ausreichend genau schätzen können. Dies ist zwar in vielen Fällen bereits festgestellt worden ist (z. B. Kolbe, 2010, Brock et al., 2012), steht aber im Widerspruch zu publizierten positiven Validierungen von einzelnen Methoden (Franko et al., 2011, Brock et al., 2012). Aufgrund der bei dieser Validierung erzielten Ergebnisse sollten die Humusbilanzmethoden mit Vorsicht eingesetzt werden. Ihr Einsatz ist vor allem dann sinnvoll, wenn unterschiedliche Bewirtschaftungsszenarien miteinander verglichen werden, aber kaum, wenn beurteilt werden soll, wie sich die Bewirtschaftung eines Betriebes auf die absoluten Mengen an organischem Bodenkohlenstoff in den Böden auswirken wird.

Eine Verbesserung der SALCA-Methode durch Anpassung der durch die Kulturen und die organischen Dünger zugeführten Mengen an humuswirksamer organischer Substanz wurde geprüft; über alle Versuche betrachtet ergaben sich jedoch keine konsistenten Verbesserungen. Für die Verbesserung der Prognose von Bewirtschaftungseinflüssen auf die absoluten Mengen an organischem Bodenkohlenstoff müssten weitere Daten, vor allem Daten von unterschiedlichen Standorten, zur Verfügung stehen.

4. Zusammenfassung

Alle eingesetzten Humusbilanzmethoden konnten in den einzelnen Versuchen die relativen Unterschiede zwischen den Verfahren richtig abbilden, was sich

in guten Korrelationen zwischen den Ergebnissen der Humusbilanzen und den gemessenen Veränderungen der Humusmengen zeigte. Die absoluten Abweichungen zwischen den tatsächlich gemessenen Veränderungen der Mengen an organischem Kohlenstoff im Boden und den Ergebnissen der Humusbilanz-Berechnungen sind jedoch bei allen geprüften Methoden so groß, dass eine praktische Anwendung der Methoden nur bedingt empfohlen werden kann. Eine Verbesserung der Methoden ist unbedingt erforderlich und muss insbesondere zu einer verbesserten Einschätzung (Parametrisierung) der Humuswirkung verschiedener Kulturen und organischer Dünger führen.

5. Literaturangaben

- Brock, C., Hoyer, U., Leithold, G., Hülsbergen, K.-J., 2012: The humus balance model (HU-MOD): A simple tool for the assessment of management change impact on soil organic matter levels. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 92, 239-254.
- Brock, C., Franko, U., Oberholzer, H.-R., Kuka, K., Leithold, G., Kolbe, H., Reinhold, J., 2012: Humus balancing in Central Europe – concepts, state of the art, and further challenges. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, accepted.
- Fliessbach, A., Oberholzer, H.-R., Gunst, L., Mäder, P., 2007: Soil organic matter and biological soil quality indicators after 21 years of organic and conventional farming. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 118, 273-284.
- Franko, U., Kolbe, H., Thiel, E., Ließ, E., 2011: Multi-site validation of a soil organic matter model for arable fields based on generally available input data. *Geoderma* 166, 119-134.
- Holenstein, H., 2010: Humusbilanzen in Schweizer landwirtschaftlichen Dauerfeldversuchen - Validierung von Humusbilanzmodellen. Master Thesis Department of Geography, University of Zurich UZH, Zurich.
- Kolbe, H., 2010: Site-adjusted organic matter-balance method for use in arable farming systems. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 173, 678-691.
- Maltas, A., Oberholzer, H.-R., Charles, R., Bovet, V., Sinaj, S., 2012: Langfristige Wirkung von organischen Düngern auf die Bodeneigenschaften. *Agrarforschung Schweiz* 3(3), 148-155.
- Neyroud, J.-A., Supcik, P., Magnollay, F., 1997: La part du sol dans la production intégrée. 1. Gestion de la matière organique et bilan humique. *Revue Suisse d'Agriculture*, 29(1), 45-51.

- Saffih-Hdadi, K., Mary, B., 2008: Modeling consequences of straw residues export on soil organic carbon. *Soil Biol. Biochem.* 40, 594-607.
- VDLUFA Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (Hrsg.), 2004: Humusbilanzierung – Methode zur Beurteilung und Bemessung der Humusbilanzversorgung von Ackerland. Standpunkt, VDLUFA, Bonn.
- Walther, U., Weiskopf, P., Oberholzer, H.-R., Knecht, K., 2001: 50 Jahre organische und mineralische Düngung: Humusgehalte, N-Ausnützung und N-Bilanzen. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde*, 46, 265-280.