

Humusfunktionen und -Dynamik in landwirtschaftlich genutzten Böden

Heide Spiegel^{1*}, Georg Dersch¹, Norman Schlatter¹, Karl Aichberger¹, Josef Söllinger¹
und Andreas Baumgarten¹

Zusammenfassung

Langzeit-Feldversuche sind eine gute Basis, um Humus-Veränderungen, die durch unterschiedliche Bodenbewirtschaftung (z.B. Bodenbearbeitung, organische, mineralische Düngung) verursacht werden, zu quantifizieren. Dazu werden Bodenkennwerte, wie z.B. der organische Kohlenstoffgehalt (C_{org}), der Gesamt-Stickstoffgehalt (N_t), das C/N Verhältnis, das N-Mineralisierungspotenzial und der Gehalt an mineralischem Stickstoff (N_{min}) herangezogen. Die Ergebnisse langjähriger, regelmäßiger Bodenanalysen an AGES Feldversuchen zeigen, dass auf den untersuchten Versuchsstandorten der organische Kohlenstoffgehalt des Bodens nur aufrecht erhalten werden kann, wenn die Bodenbearbeitung minimiert wird und die Ernterückstände (z.B. Getreide- und Maisstroh, Zuckerrübenblätter) auf dem Feld verbleiben. Langjährige Kompostanwendung führt zu einem Humus-Anstieg (insbesondere der C_{org} und N_t Gehalte). Durch die kontinuierliche Mineralisierung kommt es allerdings – ab 12 Jahren nach Versuchsbeginn – zu einem Ansteigen der N_{min} Gehalte in den Kompostvarianten, vergleichbar mit denen in der höchsten mineralischen N Düngungsstufe, und damit zu einem erhöhten N Austragsrisiko. Dieses kann durch geeignete Maßnahmen (z.B. reduzierte Bodenbearbeitung, Begrünungen) minimiert werden. Langfristig nehmen die C_{org} Gehalte des Bodens mit häufiger Bodenbearbeitung und wenn Ernterückstände jedes Jahr vom Feld abgefahren werden, ab.

Schlagwörter: Langzeitfeldversuche, organischer Boden-Kohlenstoff, Gesamt-Stickstoff, N Mineralisierungspotenzial

Summary

Long-term field experiments are a good basis to evaluate long-term effects of different soil management on soil organic matter dynamics. We have evaluated the effects of tillage, the management of crop residues as well as the application of compost on selected soil parameters connected to humus dynamics (C_{org} , N_t , C to N ratio, N mineralisation potential, N_{min}). The maintenance of soil organic carbon (C_{org}) is only possible on the investigated sites, if tillage is reduced to a minimum and crop residues (cereal grain straw, maize stover, sugar beet leaves) remain on the field. Long-term compost application leads to an increase of soil organic matter (e.g. C_{org} and N_t), which are – delayed but continuously – mineralised. 12 years after the start of the experiment the N_{min} contents in the compost variants are as high as or higher compared with the highest mineral N fertilisation rate connected with an increased nitrate leaching risk. This can be minimised by suitable measures (e.g. reduced tillage, green cover). C_{org} decreases occur in the long-term with frequent tillage (two times a year and more). This is also the case, if crop residues are removed every year from the field.

Keywords: Long-term field experiments, soil organic carbon, total nitrogen, N mineralisation potential

Einleitung

Die organische Substanz des Bodens (hier synonym verwendet mit Humus) beeinflusst chemische, physikalische und biologische Bodeneigenschaften und damit auch den Wasser-, Luft-, Wärme- und Nährstoffhaushalt des Bodens. Insbesondere spielt Humus, von dem angenommen wird, dass er unter anderem ca. 58% organischen Kohlenstoff enthält, eine wesentliche Rolle in der Speicherung und Freisetzung von Nährstoffen und in der Verbesserung der Aggregatstabilität und damit der Bodenstruktur. Wesentliche ökologische Bodenfunktionen (BLUM 2005) stehen mit dem Gehalt an organischer Substanz in Zusammenhang, einschließlich der Produktion von Biomasse für Nahrungs- und

Futtermittel sowie für energetische Zwecke und Rohstoffe. In der Klimaschutz-Diskussion wird eine Erhöhung der Speicherung von Kohlenstoff im Boden und die damit verbundene Reduktion der Emissionen des Treibhausgases CO_2 in die Atmosphäre intensiv besprochen. Eine Möglichkeit dieses Speicherpotenzial zu quantifizieren, besteht in der Auswertung von Humus-Daten langjähriger Feldversuche (> 20 Jahre) mit unterschiedlichem Bodenmanagement (z.B. SPIEGEL und DERSCH 2009, ELLMER und BAUMCKER 2005, FREIBAUER et al. 2004). Um Veränderungen im Humusgehalt feststellen zu können, ist es notwendig, den Ausgangsgehalt zu kennen und regelmäßige (wenn möglich jährliche) Bodenuntersuchungen durchzuführen, da die zeitlichen und räumlichen Schwankungen hoch

¹ Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH - AGES, Spargelfeldstraße 191, A-1220 WIEN

* Ansprechpartner: Dr. Heide Spiegel, adelheid.spiegel@ages.at



sind (KÖRSCHENS 2010). Im Allgemeinen hängt das C-Speicherpotenzial vom Eintrag organischer Substanz (z.B. Ernte- und Wurzelrückstände, Bestandesabfall) sowie von der Intensität der Umsetzungsvorgänge ab und ob und wie die organische Substanz im Boden vor Abbau geschützt ist (KÖGEL-KNABNER et al. 2008, BACHMANN et al. 2008, EKSCHMITT et al. 2008). Diese Thematik ist Gegenstand zahlreicher wissenschaftlicher Publikationen. In dieser Arbeit soll anhand von Feldversuchen gezeigt werden, wie weit die landwirtschaftliche Bewirtschaftung von Ackerböden zur C-Speicherung beitragen kann. Weiters ist mit dem Aufbau von Humus gleichzeitig eine Anreicherung von organisch gebundenem Stickstoff verbunden, der langfristig wieder mineralisiert und freigesetzt werden kann. Dabei ist darauf zu achten, dass nicht Maßnahmen ergriffen werden, die eine rasche und unkontrollierte Mineralisierung zur Folge haben (z.B. Pflügen von langjährig minimal bearbeiteten Böden, Umbruch von Grünland). Dies könnte den ungewünschten Austrag von Nitrat in benachbarte Wasserkörper zur Folge haben. Ein einfacher Indikator um Umsetzungsvorgänge der organischen Substanz zu charakterisieren, ist das C/N Verhältnis. In Österreich liegen die C/N Verhältnisse in Oberböden von Ackerstandorten üblicher Weise zwischen 8 und 11, ein engeres C/N Verhältnis weisen hochaktive Böden mit einem hohen Anteil an Biomasse auf, da Mikroorganismen sehr N reich sind. Diese Zusammenhänge werden anhand von Ergebnissen von Feldversuchen der AGES näher beleuchtet.

Material und Methoden

AGES Feldversuchsstandorte

Beschreibung der Versuche

Für die Quantifizierung der Auswirkungen unterschiedlichen landwirtschaftlichen Bodenmanagements auf die Humusdynamik werden folgende Feldversuche verwendet.

Bodenbearbeitungsversuch Fuchsenbigl

Der Bodenbearbeitungsversuch wurde 1988 im Marchfeld mit drei Varianten mit jeweils drei Wiederholungen und

einer Parzellengröße von 12x60 m (=720 m²) angelegt. Folgende Bodenbearbeitungsvarianten werden geprüft:

- MT (Minimalbodenbearbeitung): Frässaat ohne Grundbodenbearbeitung vor der Saat, Bearbeitungstiefe: 5-8 cm.
- RT (Reduzierte Bodenbearbeitung): Bodenbearbeitung mit dem Grubber im Herbst und nach der Ernte. Bearbeitungstiefe: 15 cm.
- CT (konventionelle Pflugbearbeitung): Wendepflug im Herbst und Grubber nach der Ernte. Bodenbearbeitungstiefe: bis 25-30 cm.

Die Düngung erfolgte nach den Richtlinien für die sachgerechte Düngung (BMLFUW 2006). Eine genauere Versuchsbeschreibung ist in SPIEGEL et al. (2002 und 2007) enthalten.

Management der Ernterückstände (Einarbeitung und Abfuhr)

Die Feldversuche, die sich mit den Auswirkungen von Einarbeitung und Abfuhr der Ernterückstände beschäftigen, wurden im Marchfeld und Waldviertel 1982, im Alpenvorland 1986 ursprünglich als P-Düngungsversuche mit 8 Varianten und jeweils 4 Wiederholungen in einer Parzellengröße von 32x6 m (Marchfeld) und 30x7,5 m (Alpenvorland) angelegt. Der Versuch im Waldviertel musste 2002 stillgelegt werden. In einer Variante wurden jeweils in 4 P-Aufwandstufen (0, 75, 150, 300 kg P₂O₅ ha⁻¹ a⁻¹) alle Ernterückstände am Feld belassen, in der anderen abgeführt. Die N und K Düngung erfolgte nach den Richtlinien der sachgerechten Düngung (BMLFUW 2006). Im Marchfeld betrug der Anteil der Blattfrüchte (Zuckerrübe, Erbse, Körnermais, Winterraps, Sojabohne, Sonnenblume, Kartoffel) in der Fruchtfolge 48 %, im Waldviertel betrug der Anteil von Kartoffel, Silomais, Erbse und Winterraps 33% in der Fruchtfolge.

Kompostdüngungsversuch

1991 wurde am Ritzlhof bei Linz ein Kompostdüngungsversuch angelegt, um die Auswirkungen unterschiedlicher Kompostdüngung im Vergleich zu mineralischer N Düngung auf Ernteprodukte und Bodenqualität zu erfassen.

Tabelle 1: Beschreibung der Versuchsstandorte.

	Marchfeld	Alpenvorland	Waldviertel*	OÖ Zentralraum
Seehöhe (m über N.N.)	147	290	511	280
Jahresniederschlag (mm) (30-jähriges Mittel)	529	778	661	753
Jahresmitteltemperatur °C (30-jähriges Mittel)	9,4	8,4	6,8	8,5
Bodentyp	Tschernosem	Braunerde	Braunerde	Braunerde
Ausgangsgestein	Löß	Schwemmmaterial	Silikatmaterial	Lößlehm
Bodenart	sandiger Lehm	schluffiger Lehm	sandiger Lehm	lehmiger Schluff
pH in CaCl ₂	7,5	6,6	5,3	6,8
Carbonat (CaCO ₃) in %	13	0	0	0
Organischer Kohlenstoff in %	1,10	1,40	1,00	1,20
Sand/Schluff/Ton	40/42/18	3/67/30	48/36/16	14/69/17

*Standort 2002 aufgelassen.

Der Versuch wurde im ungeordneten Block mit jeweils 4 Wiederholungen und einer Parzellengröße von 3 m x 10 m (= 30 m²) angelegt. Die untersuchten Varianten bestanden in einer Nullparzelle (Nulldüngung), mineralischer N Düngung (40 kg N, 80 kg N, 120 kg N ha⁻¹ a⁻¹) sowie Bioabfallkompost, Grüngutkompost, Stallmistkompost und Klärschlammkompost - mit Aufwandmengen, die jeweils 175 kg N ha⁻¹ a⁻¹ entsprechen. Weitere Varianten waren dieselben Kompostarten mit zusätzlicher mineralischer N-Düngung (Nitramoncal) von 80 kg ha⁻¹ a⁻¹. Winterweizen, Wintergerste, Mais und Erbse (ohne Kompostdüngung) waren Bestandteil der Fruchtfolge. Innerhalb von 17 Versuchsjahren wurden 380 - 610 t ha⁻¹ Kompost aufgebracht, je nach N Gehalt der Komposte. Die Bodenproben wurden 2010 in 0-25 cm Bodentiefe entnommen.

Bodenanalysen

Die Bodenanalysen wurden an luftgetrockneten, < 2mm gesiebten Bodenproben durchgeführt. Organischer Bodenkohlenstoff (C_{org}) und Gesamtstickstoff (N_t) wurden mittels Elementaranalyse analysiert. Das N Mineralisierungspotenzial wurde mit der anaeroben Inkubationsmethode nach KEENEY (1982), modifiziert nach KANDELER (1993) untersucht. N_{min} Proben wurden in unterschiedlichen Jahren im Frühling (März oder April) in 0-90 cm Bodentiefe genommen und nach WEHRMANN and SCHARPF (1979) analysiert.

Ergebnisse und Diskussion

Bodenbearbeitungsversuch

Abbildung 1 zeigt die Langzeitentwicklung der C_{org} Gehalte in 0-30 cm. Bezogen auf diese Tiefenstufe konnten die C_{org} Gehalte nur mit Minimalbodenbearbeitung annähernd aufrecht erhalten werden, während sie mit Pflug- und Grubberbearbeitung abnahmen. C_{org} war nach 24 Jahren nur in der Minimalbodenbearbeitungs-Variante in 0-10 cm Bodentiefe signifikant höher als in den anderen Varianten (Tabelle 2). Bezogen auf die Tiefenstufe 0-30 cm waren die Unterschiede selten statistisch signifikant.

Tabelle 2 zeigt – neben den C_{org} Gehalten – weitere Humusparameter 24 Jahre nach Versuchsbeginn. In der obersten Tiefenstufe (0-10 cm) waren auch die Gesamtstickstoffgehalte und das N Mineralisierungspotenzial mit Minimalbodenbearbeitung signifikant höher verglichen mit reduzierter und konventioneller Pflugbearbeitung. Mit MT kann dieser

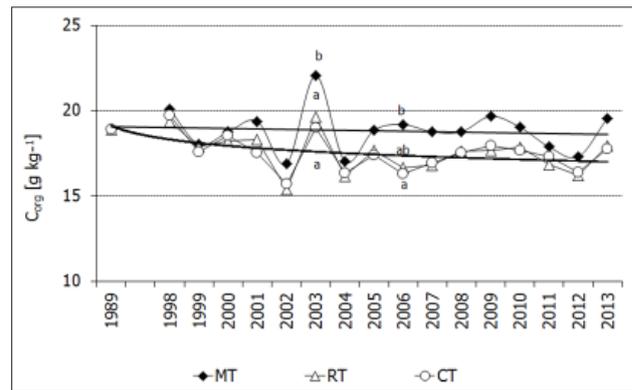


Abbildung 1: Auswirkungen von Frässaat (MT), reduzierter Bodenbearbeitung (RT) und konventioneller Pflugbearbeitung (CT) auf C_{org} (g kg⁻¹) in 0-30 zwischen 1998 und 2013. Unterschiedliche Buchstaben zeigen statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Bodenbearbeitungsverfahren an (P < 0.05, (Tukey Test). 1989: Anfangsgehalte in 0-25 cm.

Parameter als hoch (>75 mg N kg⁻¹ 7 d⁻¹), und mit CT als niedrig (<35 mg N kg⁻¹ 7 d⁻¹) nach BMLFUW (2006) eingestuft werden. Das C/N Verhältnis dagegen war (in allen Tiefenstufen) am niedrigsten unter Frässaat (siehe Tabelle 2). Dies weist – gemeinsam mit dem höheren Mineralisierungspotenzial – auf eine höhere biologische Aktivität nach langjähriger Minimalbodenbearbeitung hin.

Ernterückstände

Die langjährige Entfernung der Ernterückstände vom Feld führte zu einer Abnahme von C_{org} an den Standorten Marchfeld und Waldviertel (SPIEGEL et al. 2012). Noch keine eindeutigen Ergebnisse waren am Standort im Alpenvorland erkennbar (Ergebnisse nicht dargestellt). Die Ergebnisse der langjährigen AGES Feldversuche zeigen, dass die C_{org} -Gehalte annähernd aufrecht erhalten bleiben können, wenn die Ernterückstände, wie Getreidestroh und Blattreste (z.B. der Zuckerrübe) am Feld verbleiben. Allerdings kann eine Fruchtfolge mit einem höheren Anteil mit fehlenden oder geringen Ernterückständen (z.B. Silomais und Kartoffeln) auch zu einer Abnahme des organischen Kohlenstoffs im Boden führen, auch wenn normalerweise die Ernterückstände eingearbeitet werden.

Die Einarbeitung von Ernterückständen hatte nach 30 Jahren (Marchfeld) bzw. 26 Jahren (Alpenvorland) eine signifikante Erhöhung der C_{org} und N_t Gehalte zur Folge (siehe Tabelle 3).

Tabelle 2: Auswirkungen von Frässaat (MT), reduzierter Bodenbearbeitung (RT) und konventioneller Pflugbearbeitung (CT) auf C_{org}, N_t, C/N und N-Mineralisierungspotenzial in unterschiedlichen Bodentiefen (0-10cm, 20-30cm), 2012. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Bodenbearbeitungsverfahren in den einzelnen Tiefenstufen an (P < 0.05, Tukey Test).

Bodentiefe (cm)	C _{org} g kg ⁻¹		N _t g kg ⁻¹		C/N		N Mineralisierungspotenzial (mg N kg ⁻¹ 7 d ⁻¹)	
	0-10	20-30	0-10	20-30	0-10	20-30	0-10	20-30
1 Frässaat (MT)	20,2 a	15,4 a	2,12 a	1,46 a	9,5 a	10,6 a	94,7a	28,0 a
3 Reduzierte Bodenbearbeitung (RT)	16,6 b	15,8 a	1,69 ab	1,39 a	10,0 a	11,4 a	62,7b	25,3 a
2 Konventionelle Pflugbearbeitung (CT)	16,2 b	16,7 a	1,51 b	1,50 a	10,7 a	11,2 a	32,7b	33,7 a

Tabelle 3: Auswirkungen der Behandlung von Ernterückständen auf organischen Kohlenstoff (C_{org}), Gesamtstickstoff (N_t), C/N und N-Mineralisierung im Marchfeld und im Alpenvorland in 0-25 cm und 25-50 cm. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten (Abfuhr, Belassen der Ernterückstände) an ($P < 0,05$, einfaktorische ANOVA), 2012.

Marchfeld							
Ernterückstände	C_{org} g kg ⁻¹		N_t g kg ⁻¹		C/N		N Mineralisierungspotenzial (mg N kg ⁻¹ 7 d ⁻¹)
	Tiefe cm		Tiefe cm		Tiefe cm		Tiefe cm
	0-25	25-50	0-25	25-50	0-25	25-50	0-25
Abfuhr	20,6 b	18,0 b	1,95 b	1,62 b	10,6 a	11,1 a	37,6 b
Einarbeitung	22,0 a	20,0 a	2,13 a	1,84 a	10,4 b	10,9 a	44,9 a

Alpenvorland							
Ernterückstände	C_{org} g kg ⁻¹		N_t g kg ⁻¹		C/N		N Mineralisierungspotenzial (mg N kg ⁻¹ 7 d ⁻¹)
	Tiefe cm		Tiefe cm		Tiefe cm		Tiefe cm
	0-25	25-50	0-25	25-50	0-25	25-50	0-25
Abfuhr	8,43 b	5,57 b	1,01 b	0,73 b	8,36 b	7,60 b	21,8 b
Einarbeitung	9,29 a	6,44 a	1,06 a	0,80 a	8,82 a	8,06 a	33,6 a

Tabelle 4: Organischer Kohlenstoff (C_{org}), Gesamtstickstoff (N_t) in g kg⁻¹, C/N Verhältnis; potenzielle N Mineralisation (mg N kg⁻¹ 7d⁻¹ in 0 - 25 cm Bodentiefe, 2010.

	C_{org} g kg ⁻¹	N_t g kg ⁻¹	C/N	N Mineralisierungspotenzial (mg N kg ⁻¹ 7 d ⁻¹)
Kontrolle (0 N)	12.7	1.40	9.1	54
Mineralischer N (Ø 40, 80, 120 N)	12.8	1.39	9.2	55
Biotonnenkompost 175 N	15.2	1.65	9.2	60
Grünschnittkompost 175 N	15.4	1.72	8.9	59
Bäuerlicher Mistkompost 175 N	14.3	1.52	9.4	61
Klärschlammkompost 175 N	15.8	1.62	9.7	59
Biotonnenkompost 175 N + 80 N	14.5	1.62	9.1	57
Grünschnittkompost 175 N + 80 N	15.3	1.74	8.9	59
Bäuerlicher Mistkompost 175 N + 80 N	14.4	1.59	9.0	65
Klärschlammkompost 175 N + 80 N	15.8	1.64	9.6	66
GD _{5%}	1.56	0.142	0.46	8.5

Dies war nicht nur im Oberboden (0-25 cm) zu erkennen, sondern auch im Unterboden (25-50 cm). Zudem war auf beiden Standorten auch das N Mineralisierungspotenzial im Oberboden signifikant höher mit Einarbeitung der Ernterückstände. Ein uneinheitliches Bild ergaben die C/N Verhältnisse: auf dem Standort im Alpenvorland waren sie mit der Einarbeitung, im Marchfeld mit der Abfuhr höher, was auch mit der unterschiedlichen Bodenart begründet werden könnte.

Kompostversuch

Die Bodenuntersuchungsergebnisse 2010 (Tabelle 4) zeigen, dass die Gehalte an C_{org} und N_t mit Kompostaufbringung (außer bei Stallmistkompost) im Vergleich zur Kontrolle signifikant erhöht waren. Das C/N Verhältnis des Bodens war in den Klärschlamm-Kompostvarianten am höchsten. Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, dass der Klärschlamm aus einer kommunalen Kläranlage stammte und zumindest zu Beginn mit Sägespänen als Füllsubstanz, die ein hohes C/N Verhältnis von > 20 aufweisen, angereichert war. Die

damit verbundene N Immobilisierung ist allerdings bereits überwunden.

Die N_{min} Gehalte in 0-90 cm Bodentiefe zu Vegetationsbeginn zeigten in Abhängigkeit von den Kulturen hoch signifikante Unterschiede ($P < 0.01$, nicht dargestellt) zwischen den Untersuchungsjahren. Die höchsten N_{min} Gehalte traten bei Mais und Winterweizen auf. Die N_{min} Gehalte in den Kompostvarianten stiegen im Laufe der Versuchsjahre (SPIEGEL et al. 2010). Ab 12 Jahren nach Beginn des Kompostversuchs zeigten die Kompostvarianten gleich hohe oder höhere N_{min} Gehalte verglichen mit der höchsten N Mineraldüngung (120 kg N ha⁻¹). Auch das N Mineralisations-Potenzial zeigte nach Kompostanwendung z.T. signifikante Erhöhungen.

Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der AGES Feldversuche zeigen, dass auf den untersuchten Standorten die Humusgehalte langjährig nur mit einer Minimierung der Bodenbearbeitung und mit Einarbeitung von Ernterückständen aufrechterhalten werden kön-

nen. Ebenfalls von großer Bedeutung für die Aufrechterhaltung des C_{org} -Niveaus ist die Anlage von Begrünungen und Zwischenfrüchten. Langfristig nehmen die C_{org} -Gehalte mit intensiver Bodenbearbeitung (mindestens zwei Mal im Jahr und mehr) ab. Dies ist auch der Fall, wenn die Ernterückstände jedes Jahr vom Feld abgefahren werden und wenn Früchte mit fehlenden oder geringen Ernterückständen (z.B. Silomais, Kartoffel) die Fruchtfolge dominieren, auch wenn normalerweise die Ernterückstände am Feld verbleiben. Nach langjähriger minimaler Bodenbearbeitung und mit der Einarbeitung der Ernterückstände ist auch ein Anstieg der Stickstoffgehalte und der mikrobiellen Aktivität im Boden feststellbar. Organische Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte sind auch nach langjähriger Kompostanwendung im Boden angestiegen ebenso wie die Enzymaktivitäten, die die N-Mineralisierung beeinflussen. Wie erwartet, hat sich Kompost als langsam fließende Stickstoffquelle erwiesen. Langfristig (nach über 12 Versuchsjahren) sind mit Kompostdüngung auch die mineralischen N-Gehalte angestiegen, was auch auf ein höheres N-Austragsrisiko hinweist. Dieses kann durch geeignete Maßnahmen (z.B. reduzierte Bodenbearbeitung, Begrünungen) vermindert werden. Somit kann Kompostanwendung einerseits helfen wertvolle Nährstoffressourcen zu sparen, andererseits sollten Nährstoffverluste vermieden werden. Regelmäßige Bodenanalysen können helfen, diese Vorgänge zu beobachten und einem unkontrollierten Nährstoff-Austrag entgegenwirken.

Danksagungen

Teile dieser Arbeit werden im Rahmen des EU (FP 7) Projektes CATCH-C (Grant Agreement N° 289782) gefördert.

Literatur

- BLUM, W.E.H., 2005: Functions of soil for society and the environment. Review in *Environmental Science and Bio/Technology*, 4; 75-79.
- BMLFUW, 2006: Richtlinien für die sachgerechte Düngung. Anleitung zur Interpretation von Bodenuntersuchungsergebnissen. 6. Auflage. Fachbeirat für Bodenfruchtbarkeit und Bodenschutz. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien. 80 p.
- BACHMANN, J., G. GUGGENBERGER, T. BAUMGARTL, R.H. ELLERBROCK, E. URBANEK, M.-O. GOEBEL, K. KAISER, R. HORN and W.R. FISCHER, 2008: Physical carbon-sequestration mechanisms under special consideration of soil wettability. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171, 14-26.
- EKSCHMITT, K., E. KANDELER, C. POLL, A. BRUNE, F. BUSCOT, M. FRIEDRICH, G. GLEIXNER, A. HARTMANN, M. KÄSTNER, S. MARHAN, A. MILTNER, S. SCHEU and V. WOLTERS, 2008: Soil-carbon preservation through habitat constraints and biological limitations on decomposer activity. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171: 27-35.
- ELLMER, F. and M. BAUMECKER, 2005: Static nutrient depletion experiment Thyrow. Results after 65 experimental years. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 51, 2, 151-161.
- FREIBAUER, A., M.D.A. ROUNSEVELL, P. SMITH and J. VERHAGEN, 2004: Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe. *Geoderma* 122, 1-23.
- FREUDENSCHUSS, A., K. SEDY, G. ZETHNER und H. SPIEGEL, 2010: Arbeiten zur Evaluierung von ÖPUL-Maßnahmen hinsichtlich ihrer Klimawirksamkeit. Schwerpunkt agrarische Bewirtschaftung. Erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Abt. II/5. Umweltbundesamt Wien. ISBN 978-3-99004-091-1.
- KANDELER, E., 1993: Bestimmung der N-Mineralisation im anaeroben Brutversuch. In: Schinner, F. et al. (Hrsg.): *Bodenbiologische Arbeitsmethoden*. Springer Verlag, Berlin.
- KEENEY, D.R., 1982: Nitrogen-availability indices. In Page, A.L. et al. (eds): *Methods of Soil Analysis, Part 2*. Am. Soc. Agron. Inc., Soil Sci. Am. Inc., Madison Wisconsin USA, p. 711.
- KÖGEL-KNABNER, I., K. EKSCHMITT, H. FLESSA, G. GUGGENBERGER, E. MATZNER, B. MARSCHNER and M. VON LÜTZOW, 2008: An integrative approach of organic matter stabilization in temperate soils: Linking chemistry, physics, and biology. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171, 5-13.
- KÖRSCHENS, M., 2010: Soil organic carbon (C_{org}) – importance, determination, evaluation. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 56, 4, 375-392.
- SPIEGEL, H., M. PFEFFER und J. HÖSCH, 2002: N-Dynamik bei reduzierter Bodenbearbeitung. *Arch. Acker- Pfl. Boden*, 48, 503-512.
- SPIEGEL, H., G. DERSCH, J. HÖSCH and A. BAUMGARTEN, 2007: Tillage effects on soil organic carbon and nutrient availability in a long-term field experiment in Austria. *Die Bodenkultur* 58, 1, 47-58.
- SPIEGEL, H. und G. DERSCH, 2009: Humus - wichtig für Boden, gut für Klima. *Bauernzeitung*, 51, 17. Dezember 2009.
- SPIEGEL, H., J. SÖLLINGER und K. AICHBERGER, 2010: Was kann der Kompost? Auswirkungen unterschiedlicher Kompostdüngung auf Pflanzenertrag und Boden. *Der Fortschrittliche Landwirt*, 19, 34-36.
- SPIEGEL, H., G. DERSCH und A. BAUMGARTEN, 2012: Humus – ein geeigneter Indikator für eine nachhaltige Bodennutzung? *VDLUFASchriftenreihe* 68, Kongressband 2012, 89-96.
- WEHRMANN, J. und H. SCHARPF, 1979: Der Mineralstickstoffgehalt des Bodens als Maßstab für den Stickstoffdüngerbedarf (N_{min} -Methode). *Plant and Soil*. 52(1), 109-126.