

Humuswirtschaft im ökologischen Landbau

1. Einleitung: allgemeine Grundlagen der Humuswirtschaft

Organische Substanz wird dem Boden hauptsächlich über Wirtschaftsdünger zugeführt (z.B. in Form von Stallmist oder Gülle) sowie über Ernte- und Wurzelrückstände der angebauten Pflanzen oder über die Gründüngung. Wenn die organische Substanz vom Bodenleben abgebaut wird (Mineralisation), werden Nährstoffe freigesetzt, die von den Pflanzen und von Bodenorganismen genutzt werden können. Gleichzeitig entstehen durch den Abbau und Umbau der organischen Substanz eine Reihe verschiedener, teils neuartiger Stoffe, die in ihrer Gesamtheit als Humus bezeichnet werden.

Humus ist also ein Produkt des Bodenlebens, hergestellt aus der organischen Substanz, die in den Boden gelangt sowie aus abgestorbenen Pflanzenteilen und Bodenbewesen. Höhe und Zusammensetzung des Humusgehaltes hängen sehr stark von den Standortbedingungen (hauptsächlich von Bodenart und Klima) und von den Bewirtschaftungsmaßnahmen (Düngung, Bodenbearbeitung, Fruchtfolge) ab. Humus ist nichts Einförmiges, sondern hat verschiedene Bestandteile, die sich sehr stark in ihren biochemischen Eigenschaften und in ihrer Lebensdauer unterscheiden. Es gibt Humusfraktionen, die innerhalb weniger Monate umgesetzt werden, und langlebige Fraktionen, die für Jahre, ja für Jahrhunderte im Boden stabil sind (Abb. 1). So dürfte aus dem leicht abbaubaren *Nährhumus* mit der Zeit *Dauerhumus* werden, wobei nicht alle Prozesse und Zusammenhänge bei der Humusbildung eindeutig bekannt sind.

Die Humusmenge und -zusammensetzung in einem Boden ist nichts Konstantes, sondern zu jedem Zeitpunkt die Summe dauernder Abbau- und Aufbauprozesse. Nur wenn sich beide Richtungen die Waage halten, ist ein langfristig gleich bleibender Humusgehalt möglich. Da viele Leistungen des Wasser- und Nährstoffhaushaltes sowie die Bodenstruktur mit dem Humus und seinen Umwandlungsprodukten zu tun haben, verfolgen wir im Ackerbau das Ziel einer geregelten Humuswirtschaft, die den Humusgehalt auf lange Sicht zumindest auf gleicher Höhe hält oder eher noch steigert. Dies setzt voraus, dass den Böden geeignetes organisches Material in ausreichender Menge zugeführt wird.

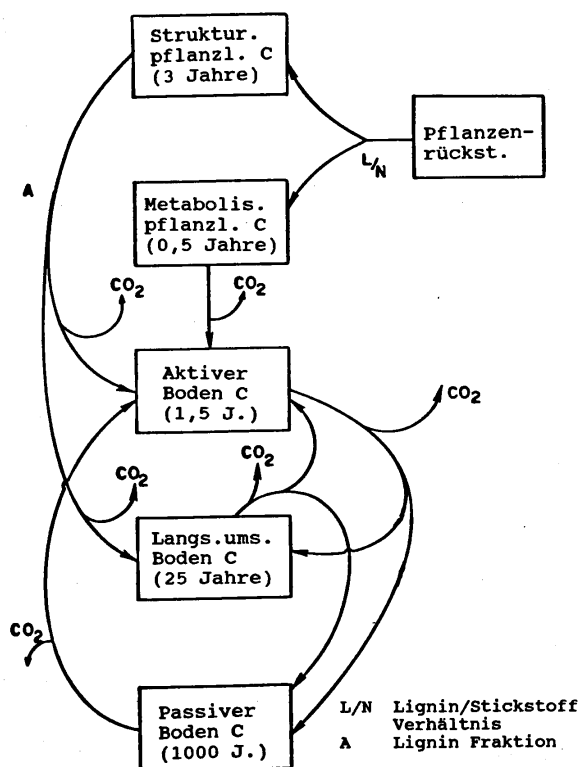


Abb. 1: Schema des Umsatzes der organischen Substanz (Kohlenstoff) im Boden; Parton et al. (1987)

In meinem Beitrag werde ich vor allem die Frage behandeln, ob die verschiedenen Düngerarten in gleicher Weise zur Humusbildung geeignet sind und welchen Nutzen die angebauten Pflanzen von einem gut mit Humus versorgten Boden haben. Die Frage nach der erforderlichen Menge an organischer Substanz, die dem Boden zur Humusbildung zugeführt werden sollte, kann heute nicht sicher beantwortet werden. Dafür müsste man die genauen Abbau- und Aufbauraten der Dünger bzw. Humusfraktionen unter den jeweiligen Standortbedingungen kennen, was für die Verhältnisse von ökologisch bewirtschafteten Böden nicht der Fall ist.

2. Auswirkungen von Stallmist und anderen Düngerarten auf den Humusgehalt

Zu diesem Thema gibt es mittlerweile eine Reihe von Langzeitversuchen, so dass man den Beitrag einzelner Dünger zur Humusversorgung der Böden relativ sicher beurteilen kann. Viele dieser Versuche wurden sogar unter den Bedingungen des ökologischen Landbaus durchgeführt, was die Aussagen sehr erleichtert, da Ergebnisse aus konventionellen Versuchen oft nur mit Vorbehalt auf den ökologischen Landbau übertragen werden können.

An unserem Institut in Darmstadt gibt es einen Langzeitdüngungsversuch, in dem seit 1980 Stallmistvarianten mit und ohne Anwendung biologisch-dynamischer Präparate und Mineraldüngung miteinander verglichen werden (Tab. 1). Jede Düngerart wird in 3 verschiedenen Mengen (nach Gesamtstickstoffgehalt bemessen) ausgebracht. Die Standortbedingungen sind 590 mm Niederschlagssumme pro Jahr, 9,5 °C mittlere Jahrestemperatur und eine Braunerde aus Flugsand mit 87% Sand im Oberboden.

Tab. 1: Varianten des Langzeitdüngungsversuches am IBDF in Darmstadt (seit 1980)

1. Faktor: Düngerart:				
RM	=	Düngung mit Rottemist und Jauche		
RMBD	=	Düngung mit Rottemist und Jauche und Anwendung aller biologisch-dynamischer Präparate		
MIN	=	Mineraldüngung (KAS, Superphosphat, Kalimagnesia)		
2. Faktor: Düngermenge (gültig seit 1985/86):				
		Getreide	Kartoffeln	Leguminosen
niedrig	=	60 kg Nt ha ⁻¹	50 kg Nt ha ⁻¹	0
mittel	=	100 kg Nt ha ⁻¹	100 kg Nt ha ⁻¹	0
hoch	=	140 kg Nt ha ⁻¹	150 kg Nt ha ⁻¹	0

In diesem Versuch hat sich gezeigt, dass die Humusgehalte (gemessen als organisch gebundener Kohlenstoff) im Oberboden heute mit Rottemist und biologisch-dynamischen Präparaten am höchsten sind (Abb. 2, Variante RMBD); sie entsprechen noch dem Anfangsgehalt des Feldes zu Versuchsbeginn in 1980. Bei Rottemist ohne Präparate (Variante RM) und noch stärker bei Mineraldüngung (MIN) sind die Humusgehalte dagegen gesunken. Keine der Düngungsarten hat eine Anhebung der Humusmenge erreicht, aber die Rottemistdüngung mit Präparaten konnte die Werte immerhin über mehr als 20 Jahre auf gleichem Niveau halten und Humusabbau verhindern. Die Steigerung der Düngermenge hat sich nur mit Rottemist positiv auf die Humusgehalte ausgewirkt, nicht jedoch mit Mineraldüngung.

Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Humusversorgung mit organischer Düngung besser ist als mit mineralischer. Dies ist einer der Gründe, warum Mineraldüngung im ökologi-

schen Landbau ausgeschlossen ist. Zusätzlich zum hohen Humusgehalt hatten die Böden bei Mistdüngung und Präparateanwendung die stärkste Besiedelung mit Mikroorganismen (mikrobielle Biomasse) und die höchste Aktivität von Bodenzymen (Bachinger, 1996), was auf eine intensive Nährstoffnachlieferung in diesen Böden deutet.

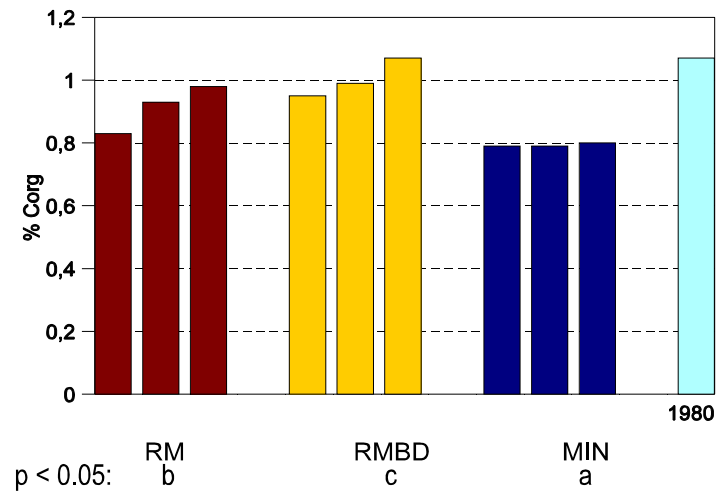


Abb. 2: C_{org}-Gehalte im Oberboden nach 18 Jahren Rottemistdüngung mit (RMBD) und ohne Präparate (RM) und bei Mineraldüngung (MIN), jeweils in 3 Stufen; Raupp (2001)

Auch im Unterboden erhöhten Stallmist und die biologisch-dynamischen Präparate den Humusgehalt und die Aktivität des Bodenzym Dehydrogenase (Tab. 2), was überraschend war, da der Mist ja nur mit dem Oberboden in Berührung kam. Die Verbesserung des Unterbodens ist für den ökologischen Landbau besonders wichtig, da die Pflanzen in dieser Wirtschaftsweise den Unterboden häufig intensiver durchwurzeln und damit stärker als Reservoir von Wasser und Nährstoffen nutzen als im konventionellen Landbau.

Tab. 2: Organischer Kohlenstoff und Aktivität des Enzyms Dehydrogenase (DHA) im Ober- und Unterboden bei Rottemistdüngung ohne (RM) und mit biologisch-dynamischen Präparaten (RMBD) und bei Mineraldüngung (MIN); Bachinger (1996)

	Düngung	Oberboden (0-25 cm)		Unterboden (25-55 cm)	
		relativ	relativ	relativ	relativ
org. Kohlenstoff (%)	RM	0,99 b	124	0,27 a	104
	RMBD	1,21 c	151	0,37 b	142
	MIN	0,80 a	100	0,26 a	100
DHA (Fg TPF/10 g)	RM	164,0 b	129	20,8 a	137
	RMBD	184,5 c	146	29,1 b	191
	MIN	126,8 a	100	15,3 a	100

Die Bedeutung des Stallmistes für den Humusaufbau ergibt sich auch aus einigen anderen Langzeitversuchen unter ökologischen oder konventionellen Bedingungen. Meist war der Stallmist, wie in unserem Versuch, Vertreter der organischen Düngung allgemein, so dass die Frage offen bleibt, ob mit anderen organischen Düngern ähnlich gute Ergebnisse bei der Humusbildung erzielbar sind oder ob Stallmist tatsächlich bessere Wirkungen hat.

In dieser Hinsicht liefert ein Langzeitversuch in Zentral-Schweden wichtige Informationen, in dem die Wirkung von Stallmist, Gründüngung und Mineraldüngung über 47 Jahre untersucht wurde. Mit beiden organischen Düngern wurde die gleiche Menge organische Substanz ausgebracht, nämlich 4 t ha^{-1} Kohlenstoff in jedem zweiten Jahr. Der Kohlenstoffgehalt des Bodens war mit Stallmist und mit der kombinierten organisch-mineralischen Düngung (Sägemehl + Calciumnitrat) am höchsten und lag deutlich über dem der Gründüngungsvariante (Tab. 3). Noch niedriger als diese war der C-Gehalt bei alleiniger Mineraldüngung und in der ungedüngten Kontrollvariante.

Tab. 3: Gesamt-Kohlenstoff- und -Stickstoffgehalt (% TS) und C:N-Verhältnis mit verschiedenen organischen und mineralischen Düngern; Mittelwerte mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant; Elfstrand et al. (2007)

Düngung	C _t	N _t	C:N
Gründüngung	1,7 b	0,15 b	11,1 b
Ungedüngt	1,2 d	0,11 d	10,7 b
Calciumnitrat (Mineraldünger)	1,4 c	0,13 c	10,4 b
Stallmist	2,1 a	0,19 a	11,0 b
Sägemehl + Calciumnitrat	2,1 a	0,15 b	13,6 a

Die Humusversorgung war bei Stallmist also eindeutig besser als mit Gründüngung. Der hohe C-Gehalt in der kombinierten Variante lag sicher am schwer zersetzbaren Sägemehl, denn die Mineraldüngung alleine erreichte nur ein sehr niedriges Humusniveau. Auch im Stickstoffgehalt des Bodens übertraf der Stallmist die Wirkung der Gründüngung.

In einem anderen Langzeitversuch an unserem Institut untersuchen wir ebenfalls die Wirkung organischer Dünger rein pflanzlicher Herkunft, ohne tierische Bestandteile. Die pflanzlichen organischen Dünger waren Ackerbohenschrot oder in anderen Jahren Leguminosengrünmehl, also Materialien, die heute in manchen Betrieben im ökologischen Gemüsebau als Zusatzdünger eingesetzt werden. Dort sieht man in den Schroten großkörniger Leguminosen jedoch in erster Linie Nährstofflieferanten und macht sich um die langfristige Humusentwicklung keine Gedanken, was nach unseren Ergebnissen durchaus angebracht wäre.

Tab. 4: C_{org}-Gehalt des Oberbodens nach 10 Jahren Stallmistdüngung im Vergleich zu pflanzlichem organischem Dünger; Mittelwerte mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($p < 0,05$); Raupp & Oltmanns (2006)

Düngung	% C _{org}
Rottemist, $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$	0,79 b
Rottemist + bd Präparate, $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$	0,78 b
pflanzlicher org. Dünger, $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$	0,75 ab
pflanzlicher org. Dünger + bd Präp., $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$	0,74 a
Rottemist, $170 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$	0,86 c
Rottemist +bd Präparate, $170 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$	0,83 c
Mineraldünger, $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$	0,72 a

Mit pflanzlichem wie tierischem Dünger und mit Mineraldünger wurde die gleiche Menge Stickstoff ausgebracht, nämlich $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$. Zusätzlich gab es Stallmistvarianten mit $170 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$. Die organischen Dünger waren in Varianten mit und ohne biologisch-dynamische Präparate angelegt. Nach 10 Jahren Laufzeit war mit Stallmist ein höherer Humusgehalt festzustellen als mit pflanzlichem Dünger (in gleicher Aufwandmenge), während sich der Humusgehalt zwischen pflanzlicher und mineralischer Düngung nicht signifikant unterschied (Tab. 4). Den insgesamt höchsten Humusgehalt erreichte Stallmist in erhöhter Aufwandmenge.

Auch dieser Versuch zeigt also die langfristig bessere Humusversorgung der Böden durch Stallmist gegenüber der Düngung mit Pflanzenmasse, wobei die biologisch-dynamischen Präparate in diesem Fall keinen weiteren Effekt hatten. Man sollte auch auf anderen Standorten die langfristige Humusentwicklung bei rein pflanzlicher organischer Düngung überprüfen, bevor diese Dünger generell empfohlen werden.

Die Bewertung der organischen Dünger, der Ernterückstände und anderer Materialien im Hinblick auf ihre Funktion als Humusersatz geschieht heute normalerweise nach ihrem Kohlenstoffgehalt. Auch die Humusbilanzierung einzelner Flächen oder der gesamten Fruchtfolge eines Betriebes beruht auf dieser Größe, da der C-Gehalt der gemeinsame Bestandteil aller organischen Substanzen und außerdem ein einfach messbares Merkmal ist. Allenfalls das C:N-Verhältnis organischer Materialien wird noch berücksichtigt, wobei auch hier der C-Gehalt eine wesentliche Rolle spielt. Diese Sichtweise muss wahrscheinlich weiter differenziert werden, da es eine Einschränkung darstellt, die Eigenschaften organischen Materials allein auf den Kohlenstoff zurück zu führen und dabei die Bedeutung anderer Bestandteile, wie zum Beispiel Protein oder Aminosäuren, völlig zu ignorieren.

Es gibt Hinweise in der Literatur, dass Aminosäuren bei der Humussynthese in landwirtschaftlich genutzten Böden eine bedeutende Rolle spielen (Scheller & Friedel, 2000). Dies hat sich an unserem Langzeitversuch grundsätzlich bestätigt (Scheller & Raupp, 2005) und wird von uns derzeit an acht weiteren Langzeitversuchen untersucht. In diesem Zusammenhang möchte ich dankbar an einen Kollegen erinnern, Dr. Edwin Scheller (1957-2006), der sich diesem Forschungsthema sehr intensiv gewidmet hat und dem wir viele Erkenntnisse über die Nährstoffdynamik ökologisch bewirtschafteter Böden verdanken. Wer an den SIGÖL-Fortbildungskursen früherer Jahre teilgenommen hat, konnte ihn mehrfach als Referent erleben.

3. Braucht die Pflanze Humus für Wachstum und Ertragsbildung?

Die Durchschnittserträge über acht Jahre der Hauptkulturen unseres Langzeitversuches zeigten keine Übereinstimmung zwischen Ertrag und Humusgehalt einer Variante (Tab. 5). Während Sommerweizen mit jeder Düngerart etwa den gleichen Durchschnittsertrag brachte, hat Winterroggen bei Mineraldüngung deutlich höhere Erträge erreicht als mit Rottemist. Als Wintergetreide mußte Roggen einen Großteil seiner Wachstumszeit unter Witterungsbedingungen mit geringer oder fehlender Nährstoffnachlieferung verbringen, was die organisch gedüngten Varianten verständlicherweise stärker eingeschränkt hat als die mineralisch gedüngten. Für das Sommergetreide galten andere Bedingungen, so dass es keinen Ertragsunterschied zwischen organisch und mineralisch gab. Die Kartoffeln reagierten als vegetatives Produkt ebenfalls im Ertrag stärker auf die Mineraldüngung; bei der Mistdüngung erhöhten jedoch die biologisch-dynamischen Präparate den Ertrag auf das gleiche Niveau wie in der mineralisch gedüngten Variante.

Tab. 5: Erträge (dt ha⁻¹) im Mittel der Jahre 1992-99 (2 Fruchtfolgeperioden) bei Rottemistdüngung ohne (RM) und mit biologisch-dynamischen Präparaten (RMBD) und bei Mineraldüngung (MIN), jeweils in 3 Stufen; Mittelwerte mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant (p<0,05); Raupp (2001)

	RM	RMBD	MIN	niedrig	mittel	hoch
Winterroggen	28,3 a	29,8 a	37,7 b	28,1 a	31,7 b	36,1 c
Sommerweizen	38,9	39,3	41,0	36,8 a	40,2 b	42,2 c
Kartoffeln	247 a	262 b	271 b	230 a	262 b	288 c

Das Ertragsniveau hing offenbar in erster Linie von der Höhe und vom zeitlichen Verlauf des Nährstoffbedarfes einer Kultur ab und richtete sich nicht primär nach dem Humusgehalt der Böden. Wenn man aber anstelle der Durchschnittserträge vieler Jahre die Ertragsbildung in einzelnen Jahren mit extremen Wachstumsbedingungen betrachtet, findet man sehrwohl Ertragsunterschiede, die mit den Humusgehalten und anderen Merkmalen des Bodenlebens zusammen hängen dürften. Die Punkte in Abb. 3 stellen die Sommerweizenerträge in unserem Langzeitversuch aus 14 Jahren dar (mit vier Wiederholungen pro Jahr).

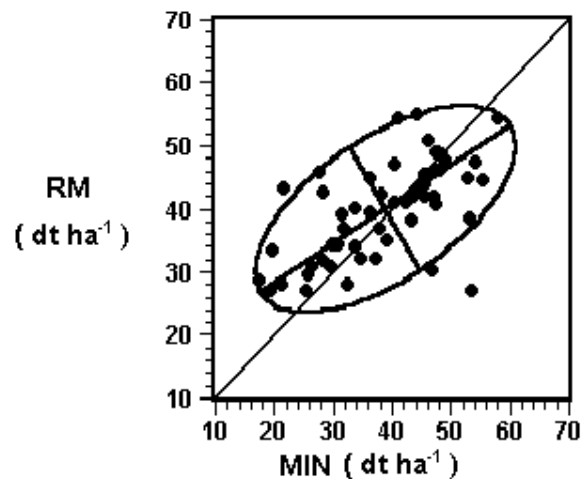


Abb. 3: Beziehung zwischen den Sommerweizenerträgen mit Mineraldüngung (MIN) und mit Rottemist-Düngung (RM) in 14 Jahren; Raupp (2001)

Die Strecke auf der waagrechten Achse entspricht dem Ertrag der Mineraldüngervariante, die auf der senkrechten Achse dem der Stallmistvariante. Gäbe es keinen Unterschied zwischen ihnen, wären beide Strecken gleich lang und die Punkte lägen mehr oder weniger entlang der diagonalen Linie. Dies ist aber nicht der Fall. Im hohen Ertragsbereich, d.h. in Jahren mit guten Wachstumsbedingungen, übertraf der Ertrag mit Mineraldüngung in der Regel den Stallmist-Ertrag (die Punkte liegen vorwiegend unterhalb der Linie). Bei niedrigem Ertragsniveau dagegen, auf unserem Standort sind dies vor allem Jahre mit extremer Trockenheit, brachten die Stallmist-gedüngten Pflanzen höhere Erträge als die mineralisch gedüngten (die Punkte liegen mehrheitlich oberhalb der Linie). Die langjährig organisch gedüngten Böden konnten also offensichtlich die schlechten Bedingungen teilweise ausgleichen, und die Pflanzen reagierten mit geringeren Ertragseinbußen. Der organisch gedüngte Weizen hatte also eine größere Ertragssicherheit mit geringeren Schwankungen von Jahr zu Jahr. Dies könnte damit zusammen hängen, dass die Pflanzen bei Stallmistdüngung, vor allem in Verbindung mit den biologisch-dynamischen Präparaten, ein dichteres Wurzelsystem ausgebildet hatten, wie in früheren Untersuchungen festgestellt wurde (Bachinger, 1996), und auf diese Weise besser

mit der Trockenheit zurecht kamen. Dieser Vorteil machte sich am Durchschnittsertrag nicht bemerkbar, wohl aber am Ertrag der Trockenjahre.

Eine ähnliche Beobachtung wurde von einem Langzeitversuch in den USA über den Maisertrag berichtet, der in den organischen Varianten mit hohem Humusgehalt in trockenen Jahren weit höher war als in konventionellen Varianten mit niedrigem Humusgehalt (Hepperly et al., 2006).

Ertragsvorteile der Pflanzen auf organisch gedüngten Böden zeigten sich in unserem Langzeitversuch nicht nur in Jahren mit ungünstiger Witterung, sondern auch in Jahren mit hohem Krankheitsdruck. Die Krautfäule an Kartoffeln ist bei uns nur in einzelnen Jahren ein Problem, wenn sich ein enormer Befallsdruck aufbaut, wie z.B. in 1996. Dann werden die mineralisch gedüngten Kartoffeln deutlich stärker befallen und sterben früher ab als die Pflanzen der Stallmistvarianten. Dies kam letztlich im Ertrag zum Ausdruck, der in den beiden Stallmistvarianten höher ausfiel als in der Mineraldüngervariante, während es im Mittel der Jahre umgekehrt war (Tab. 6).

Tab. 6: Kartoffelertrag (dt ha⁻¹) bei hohem Krautfäulebefall in 1996 im Vergleich zum langjährigen Ertragsmittel bei Rottemistdüngung ohne (RM) und mit biologisch-dynamischen Präparaten (RMBD) und bei Mineraldüngung (MIN), jeweils in 3 Stufen; Mittelwerte mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant (p<0,05)

	RM	RMBD	MIN	niedrig	mittel	hoch
langj. Durchschnitt	247 a	262 b	271 b	230 a	262 b	288 c
in 1996	245 b	243 b	217 a	209 a	245 b	251 b

Literatur

- Bachinger, J. (1996): Der Einfluß unterschiedlicher Düngungsarten (mineralisch, organisch, biologisch-dynamisch) auf die zeitliche Dynamik und die räumliche Verteilung von bodenchemischen und -mikrobiologischen Parametern der C- und N-Dynamik sowie auf das Pflanzen- und Wurzelwachstum von Winterroggen. Diss. Univ. Gießen. Schriftenreihe Bd. 7, IBDF Darmstadt
- Elfstrand, S.; Hedlund, K.; Mårtensson, A. (2007): Soil enzyme activities, microbial community composition and function after 47 years of continuous green manuring. *Applied Soil Ecology* **35**, 610-621
- Hepperly, P.R.; Douds Jr., D.; Seidel, R. (2006): The Rodale Institute Farming Systems Trial 1981 to 2005: Long Term Analysis of Organic and Conventional Maize and Soybean Cropping Systems. In: Raupp, J. et al. (eds.), Long-term field experiments in organic farming. ISOFAR Scientific Series No. 1; Verlag Dr. Köster; 15-32
- Parton, W.J.; Schimel, D.S.; Cole, C.V.; Ojima, D.S. (1987): Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. *Soil Science Society of America Journal* **51**, 1173-1179
- Raupp, J. (2001): Manure fertilization for soil organic matter maintenance and its effects upon crops and the environment, evaluated in a long-term trial. In: Rees, R.M.; Ball, B.C.; Campbell, C.D.; Watson, C.A. (eds.), Sustainable management of soil organic matter. CAB International, Wallingford UK; 301-308
- Raupp, J.; Oltmanns; M. (2006): Effects of plant based organic fertilizer (faba bean meal)

compared to farmyard manure on yield and quality of potatoes and soil organic matter levels. Proc. European Joint Organic Congress, Odense (Denmark), May 30 - 31, 2006; 296-297

Scheller, E.; Friedel, J.K. (2000): Amino acids in soils, humic substances and soil microbial biomass. Proceedings of the 13th IFOAM Scientific Conference, Basel; 6-9

Scheller, E.; Raupp, J. (2005): Amino acid and soil organic matter content of topsoil in a long term trial with farmyard manure and mineral fertilizers. *Biol. Agric. Hortic.* **22**, 379-397