Anhang 2, Teil 1

Kompost-Abschlussbericht 2008

Untersuchungen sowie zu heißwasserlöslichen Bodengehalten an Kohlenstoff und Stickstoff sowie zur Humusreproduktion und Humusqualität

Punkte C 2.2.1.2 und C 2.2.1.5

Ausführlicher Ergebnisbericht

Autor: Dr. Jürgen Reinhold, Bioplan Dr. Reinhold und Dr. Müller GmbH
14532 Klein Machnow

Organische Bodensubstanz

Die organische Bodensubstanz gewinnt im Rahmen von Vermeidungs- und Anpassungsstrategien zum Klimawandel erheblich an Bedeutung. Die Böden sind in ihrer stark humusabhängigen Fruchtbarkeit für die klimaneutrale Erzeugung von energetisch nutzbarer Biomasse zu ertüchtigen und zugleich selber in ihrer erwärmungsbedingten Funktion als CO_2-Quelle einzuschränken oder sogar als zumindest temporäre CO_2-Senke zu nutzen. All diese Funktionen sind an den Bodenhumus und seine Eigenschaften gebunden.

Aus den Untersuchungen des vorliegenden Kompostprojektes können dazu Aussagen zu den Fragen der Humusreproduktion und zu den Fragen der Humuseigenschaften abgeleitet werden. Für die Bewertung der Humusreproduktionsleistung werden dazu die 12-jährigen Messreihen zur Entwicklung der Gehalte an organischer Bodensubstanz von drei Versuchstandorten genutzt. Die zum Versuchsabschluss (im Jahr 2006) erreichte Humusqualität wird anhand der Gesamtgehaltsbestimmungen von C_{org} und N_t sowie deren heißwasserlöslichen Anteile beschrieben.

Humusreproduktion

Aussagen zur Humusreproduktionsleistung von Komposten können aus den Ergebnissen der Standorte Forchheim (Biotonnenabfallfertigkompost), Weierbach (Grüngutfertigkompost) und Stockach (Biotonnenabfallfrischkompost) abgeleitet werden. Die 12-jährigen Messreihen von C_{org}-Bodengehalten sind schon geeignet, erste konkrete Hinweise auf die erreichte Humusreproduktionsleistung der eingesetzten Komposte zu bekommen.

Um die Humusreproduktionsleistungen ableiten zu können, wurden zuerst die einzelnen Versuchstandorte hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung ihrer C_{org}-Bodengehalte in Abhängigkeit von der Kompostversorgung und der Stickstoffdüngung betrachtet.

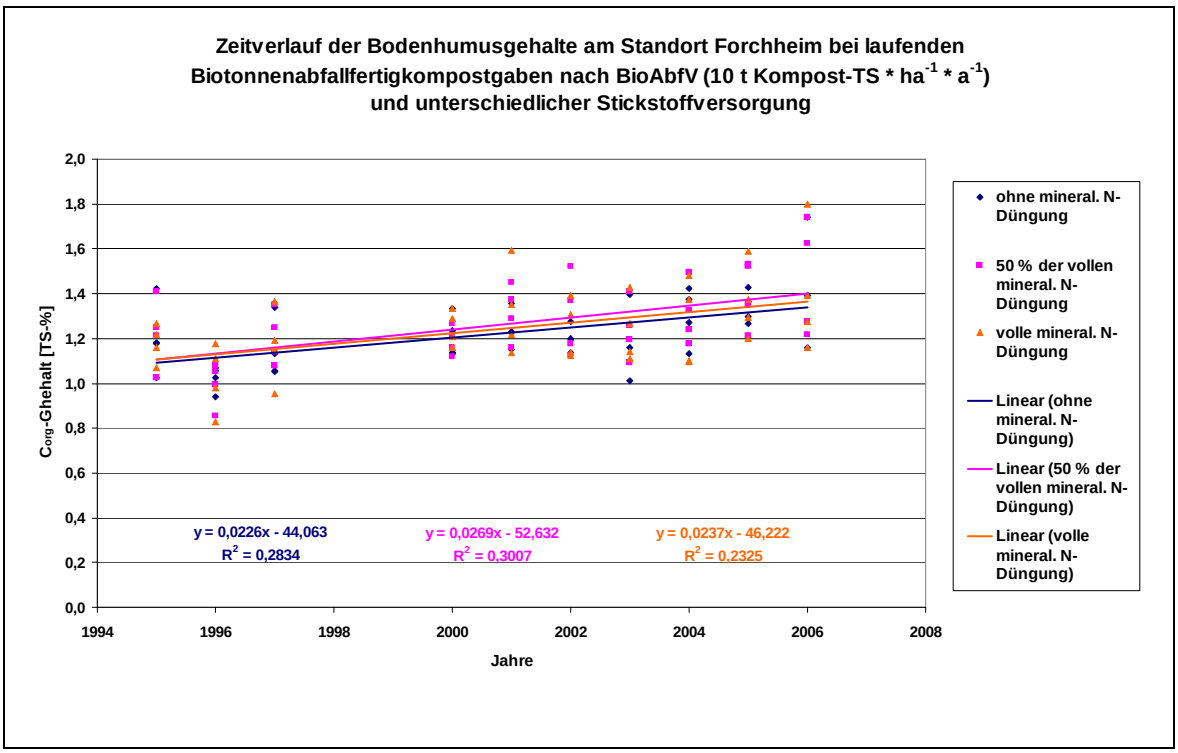
Versuchsstandort Forchheim

Der Versuchstandort Forchheim ist durch eine grundwasserferne Parabraunerde (lehmiger Sand) gekennzeichnet. Der hier eingesetzte Biotonnenabfallfertigkompost wies folgende mittlere humusreproduktionsrelevante Eigenschaften auf:

- C_{org}-Gehalt 21,2 TS-%
- N_t-Gehalt 1,55 TS-%
- C:N-Verhältnis 13,7
- Rottegrad 4,3

Es handelt sich um einen stark zersetzten Kompost.

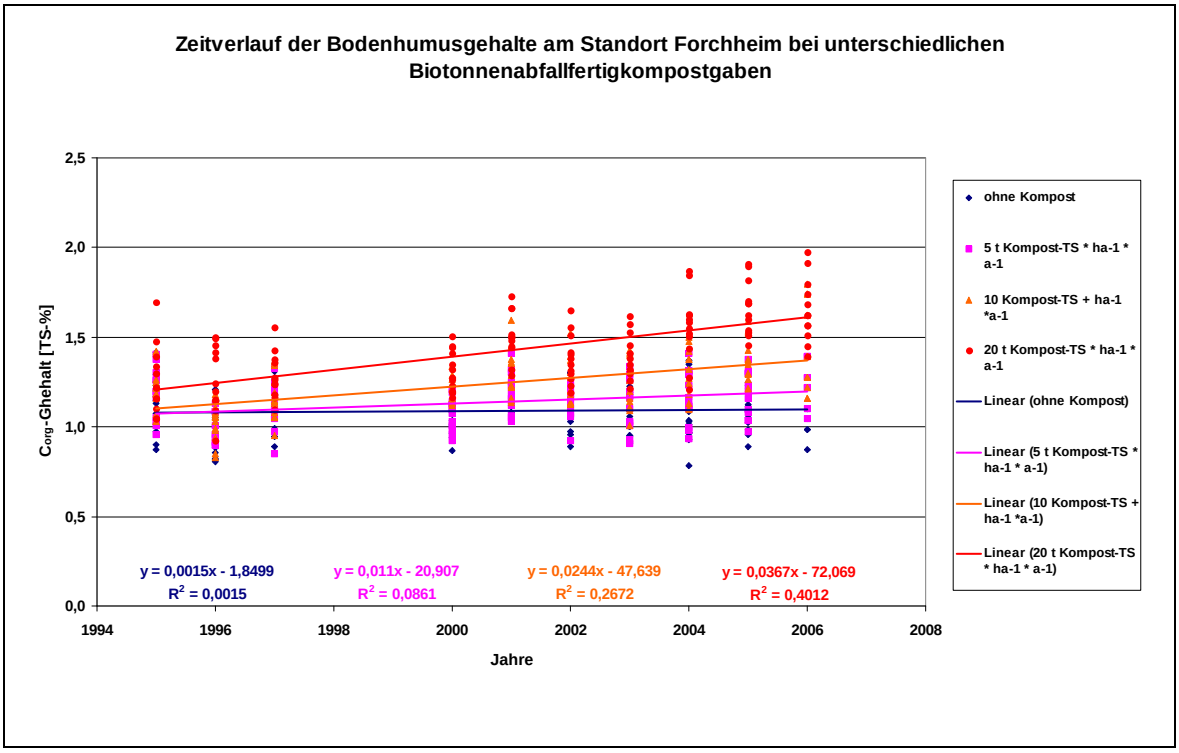
Der Zeitverlauf der C_{org}-Bodengehalte bei Komposteinsatz nach BioAbfV ist nachfolgend in Abhängigkeit von der differenzierten Stickstoffdüngung dargestellt.



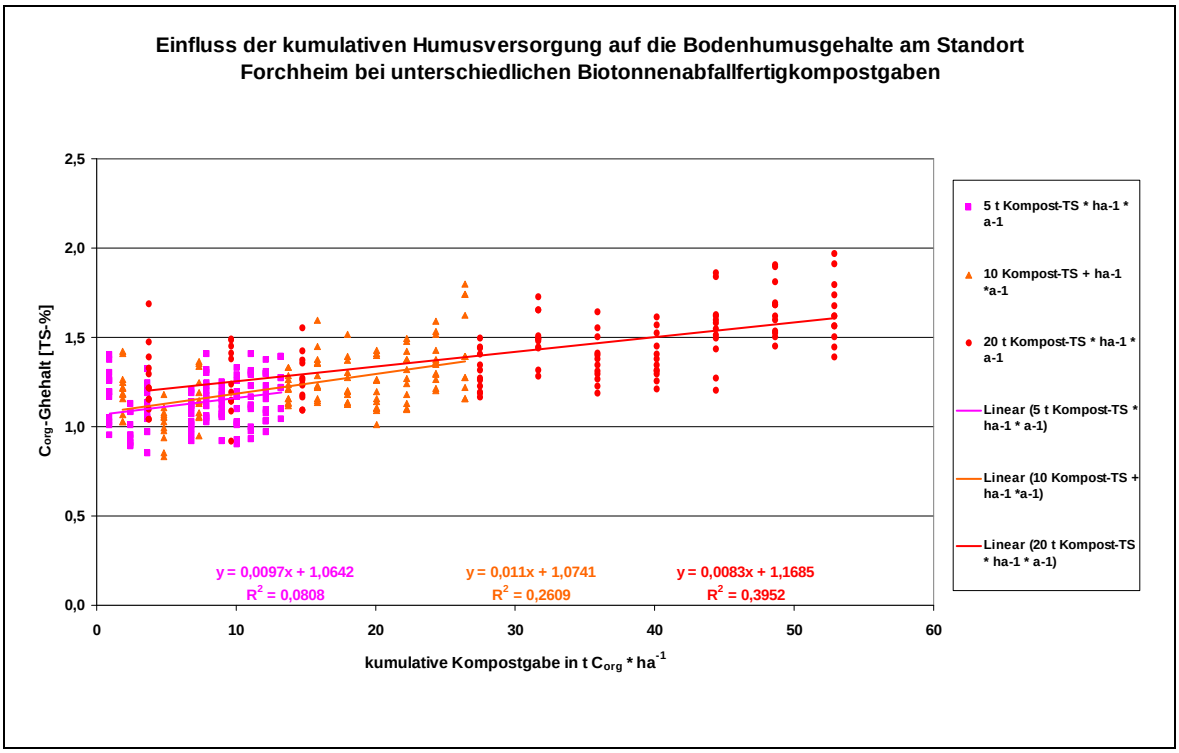
Die Darstellung für die unterschiedlichen N-Düngungsstufen zeigt eine etwa gleichlaufend lineare Zunahme der C_{org}-Gehalte im Boden an. Die organische Substanz des eingesetzten Biotonnenabfallfertigkompostes erwies sich als so wenig stickstoffmobilisierbar, sodass eine gesonderte Betrachtung der unterschiedlichen N-Düngungsstufen nachfolgend unnötig ist. Auffallend sind die starken jahresabhängigen Niveauunterschiede der Messwerte, die zu großen Streubreiten und geringen Bestimmtheitsmaßen der Regressionsgeraden geführt haben.

Die Prüfung des Zeitverlaufs der C_{org}-Bodengehalte konnte wegen des fehlenden Einflusses der N-Düngungsstufen für alle Kompostgaben einheitlich vorgenommen werden. Die Regressionsergebnisse sind nachfolgend dargestellt.

Für die differenzierten Kompostgaben konnten deutlich voneinander abweichende zeitlich lineare Anstiege der C_{org}-Bodengehalte und deren Bestimmtheitsmaß nachgewiesen werden. Ab einer jährlichen Gabe von 10 t Komposttrockenmasse je ha sind diese Anstiege als statistisch gesichert zu bezeichnen.



Nun soll geprüft werden, ob die jährlich unterschiedlichen Mengen an Kompostgaben sich als Summenfunktion auf die Bodenhumusgehalte auswirken. Dazu wurden die jeweiligen Jahresmesswerte der C_{org}-Bodengehalte hinsichtlich ihres Zusammenhangs mit den bis zu diesem Jahr insgesamt durch den Kompost gegebenen Mengen in organischen Kohlenstoff betrachtet. Dazu folgende Darstellung.



Mit steigender jährlicher Zuführung von organischer Kompostsubstanz in den Boden nahmen die Bestimmtheitsmaße als Ausdruck für die statistische Sicherung des Zusammenhangs mit den C_{org}-Bodengehalten zu. Die Anstiege (Regressionskoeffizienten) sind dagegen für die drei Kompost-Düngungsstufen ähnlich. Daraus ergibt sich für den Versuchstandort Forchheim die Möglichkeit, alle C_{org}-Bodenmesswerte gemeinsam mit den jeweiligen kumulativgegebenen C_{org}-Mengen durch Kompostanwendung regressionsanalytisch auszuwerten.

Versuchsstandort Weierbach

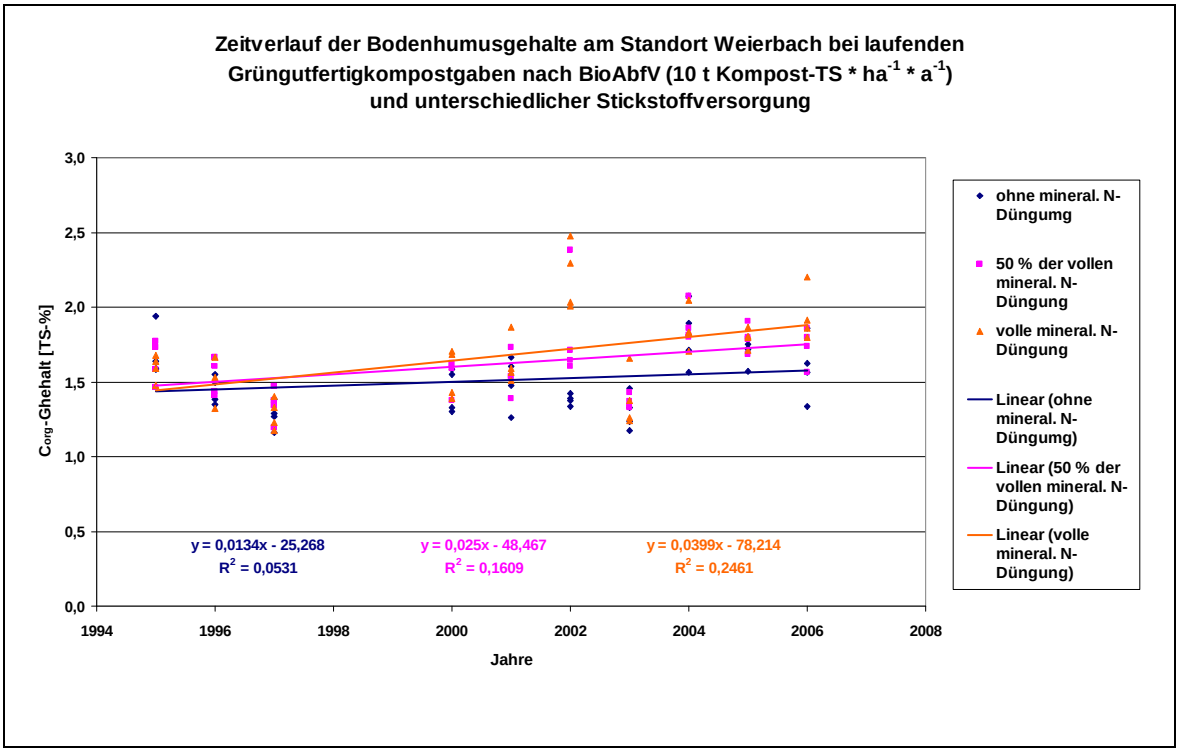
Der Versuchstandort Weierbach ist durch einen grundwasserferne Kolluvisol (schluffiger Lehm) gekennzeichnet. Der hier eingesetzte Grüngutfertigkompost wies folgende mittlere humusreproduktionsrelevante Eigenschaften auf:

- C_{org}-Gehalt 16,3 TS-%
- N_t-Gehalt 1,39 TS-%
- C:N-Verhältnis 11,7
- Rottegrad 4,7

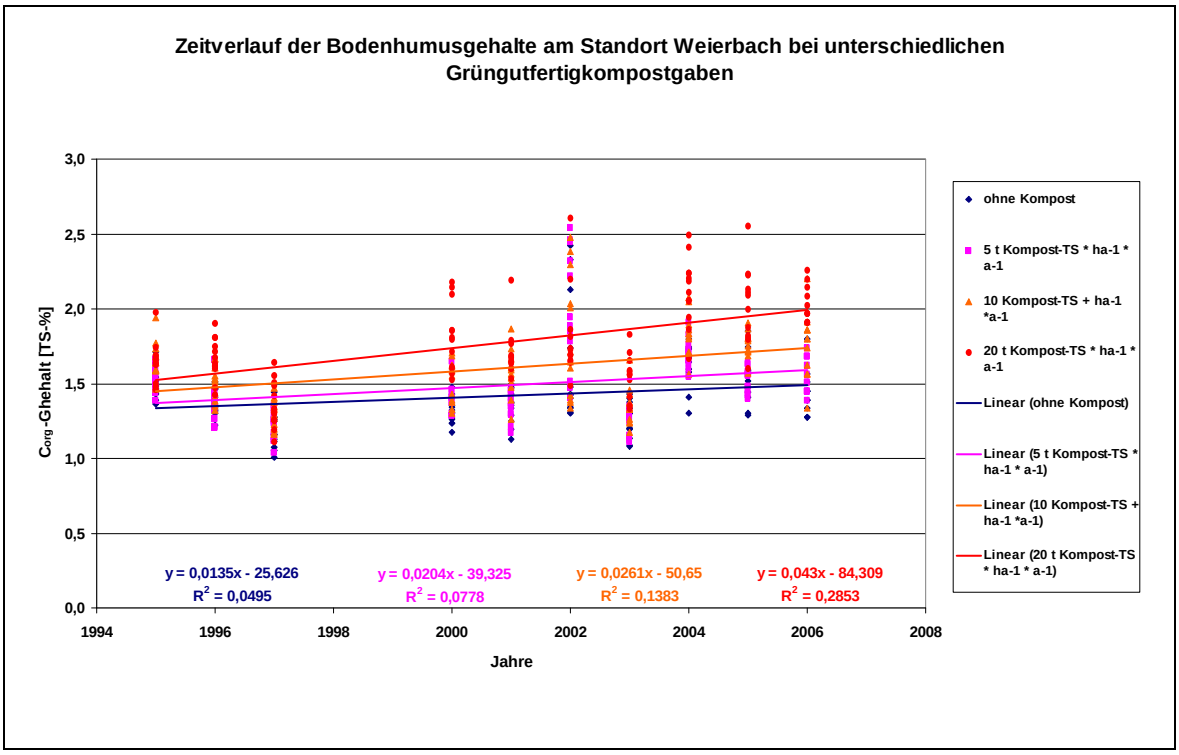
Es handelt sich um einen stark zersetzten Kompost, der schon Tendenzen zu einer beginnenden Vererdung zeigt.

Der Zeitverlauf der C_{org}-Bodengehalte bei Komposteinsatz nach BioAbfV ist nachfolgend in Abhängigkeit von der differenzierten Stickstoffdüngung dargestellt.

Die nährstoffarmen und abbaustabilen Grüngutfertigkompost führen zu linear steigenden C_{org}-Bodengehalten. Durch Stickstoffmangel wird die Freisetzung von organischem Kohlenstoff in der Tendenz gefördert. Der zunehmende Trend an C_{org}-Bodengehalten ist so stark durch Jahresschwankungen der Messwerte überlagert, dass keine gesicherte Unterscheidung der Regressionen einzelner N-Versorgungsstufen möglich ist. Die Stickstoffdüngungsstufen können für weiterführende Auswertungen zusammengefasst werden.



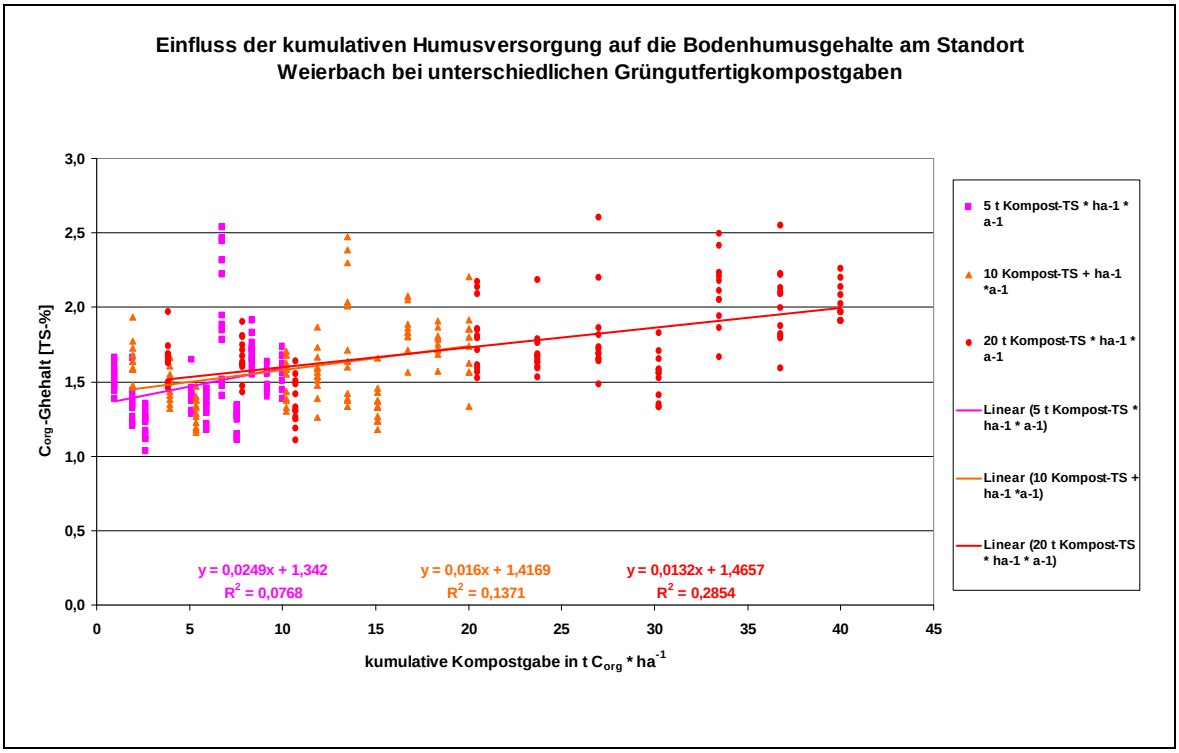
Die Prüfung des Zeitverlaufs der C_{org}-Bodengehalte konnte wegen des nicht statistisch gesicherten Einflusses der N-Düngungsstufen für alle Kompostgaben einheitlich vorgenommen werden. Die Regressionsergebnisse sind nachfolgend dargestellt.



Der Einfluss steigender Kompostgaben auf die C_{org}-Bodengehalte ist wegen der starken Jahresschwankungen der Messwerte erst ab jährlichen Gaben von 20 t Trockenmasse je ha und Jahr gesichert nachweisbar.

Die jährlich unterschiedlichen Mengen an Kompostgaben wirken sich als Summenfunktion auf die Bodenhumusgehalte aus. Dazu wurden die jeweiligen Jahresmesswerte der C_{org}-Bodengehalte auf ihren Zusammenhang mit den bis zu diesem Jahr insgesamt durch den Kompost gegebenen Mengen in organischen Kohlenstoff geprüft. Dazu die nachfolgende Darstellung.

Wie am Versuchsstandort Forchheim (für Biotonnenabfallfertigkompost) zeigen auch die Grüngutfertigkomposte am Standort Weierbach über alle Kompostaufwandmengen lineare Beziehungen der Gesamtgaben an organischem Kohlenstoff zu den C_{org}-Bodengehalten. Die Wirkungen der gestaffelten Höhen der Kompostgaben sind dabei statistisch nicht voneinander zu unterscheiden, können also als eine Grundgesamtheit betrachtet werden. Die höchste Kompostgabe zeigt auch hier die deutlichsten Auswirkungen auf die C_{org}-Bodengehalte.



Versuchsstandort Stockach

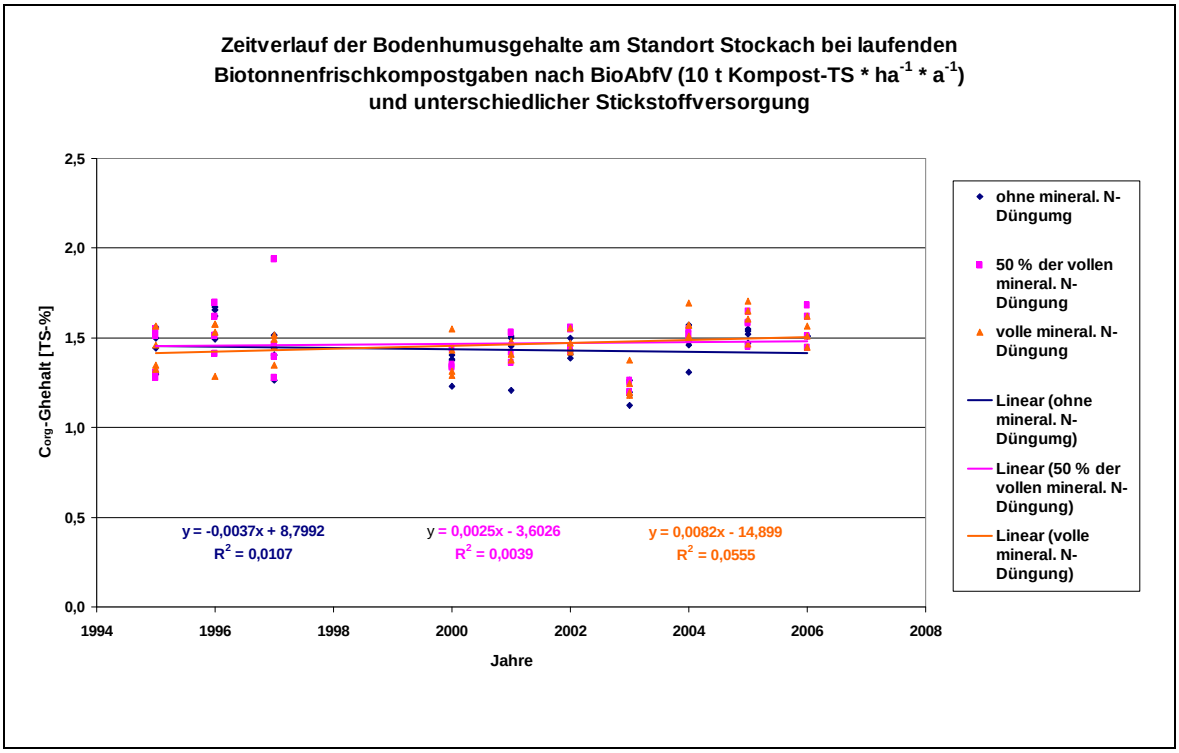
Der Versuchstandort Stockach ist durch einen grundbeeinflussten Braunerde-Pseudogley (schluffig-toniger Lehm) gekennzeichnet. Der hier eingesetzte Biotonnenabfallfrischkompost (Brikkolareverfahren) wies folgende mittlere humusreproduktionsrelevante Eigenschaften auf:

- C_{org}-Gehalt 37,9 TS-%
- N_t-Gehalt 2,79 TS-%
- C:N-Verhältnis 13,6
- Rottegrad 1,8

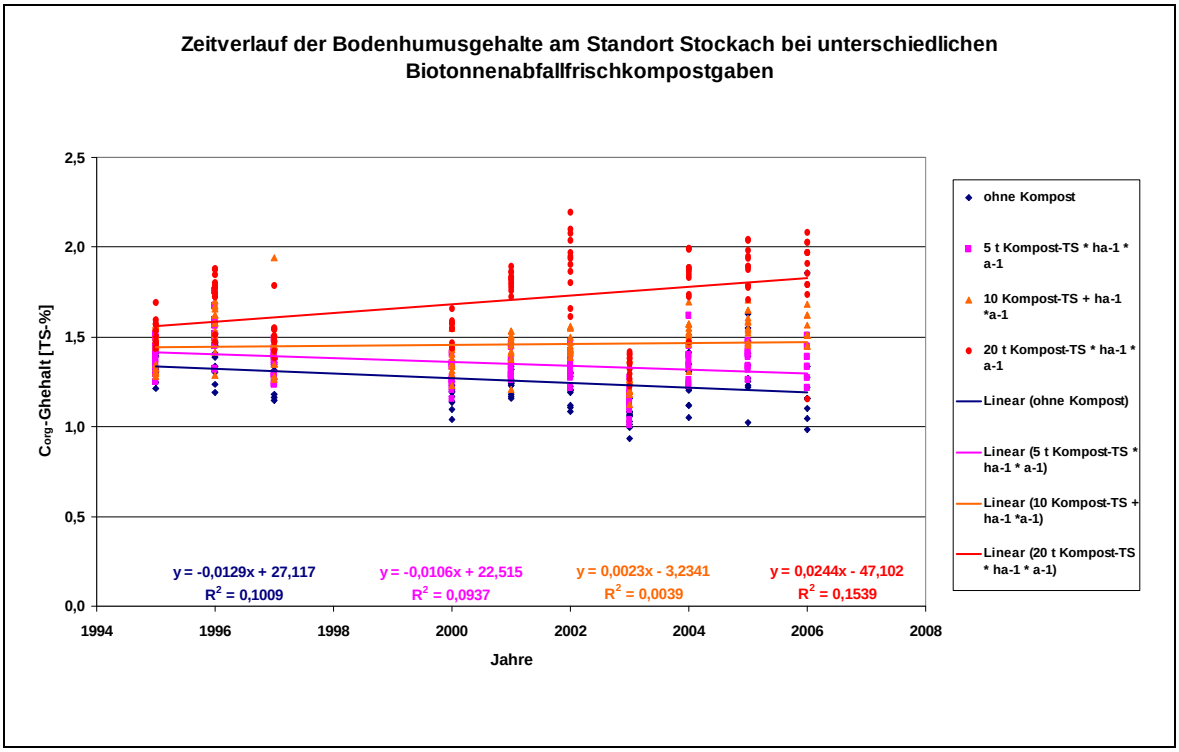
Es handelt sich um einen sehr schwach zersetzten Kompost, der noch qualitative Tendenzen zu Kompostrohmaterial aufweist.

Der Zeitverlauf der C_{org}-Bodengehalte bei Komposteinsatz nach BioAbfV ist nachfolgend in Abhängigkeit von der differenzierten Stickstoffdüngung dargestellt.

Bei jährlichen Gaben von 10 t Trockenmasse eines Biotonnenabfallfrischkompostes je Hektar wurden im Vergleich zu den beiden vorgenannten Fertigkomposten nur geringere Anstiege der C_{org}-Bodengehalte über die Zeit festgestellt. Ein Einfluss unterschiedlich hoher Stickstoffdüngung auf die zeitliche Entwicklung der C_{org}-Bodengehalte ist nicht erkennbar. Die Stickstoffdüngungsstufen können somit bei den weiteren Auswertungsschritten als Einflussfaktor vernachlässigt werden.



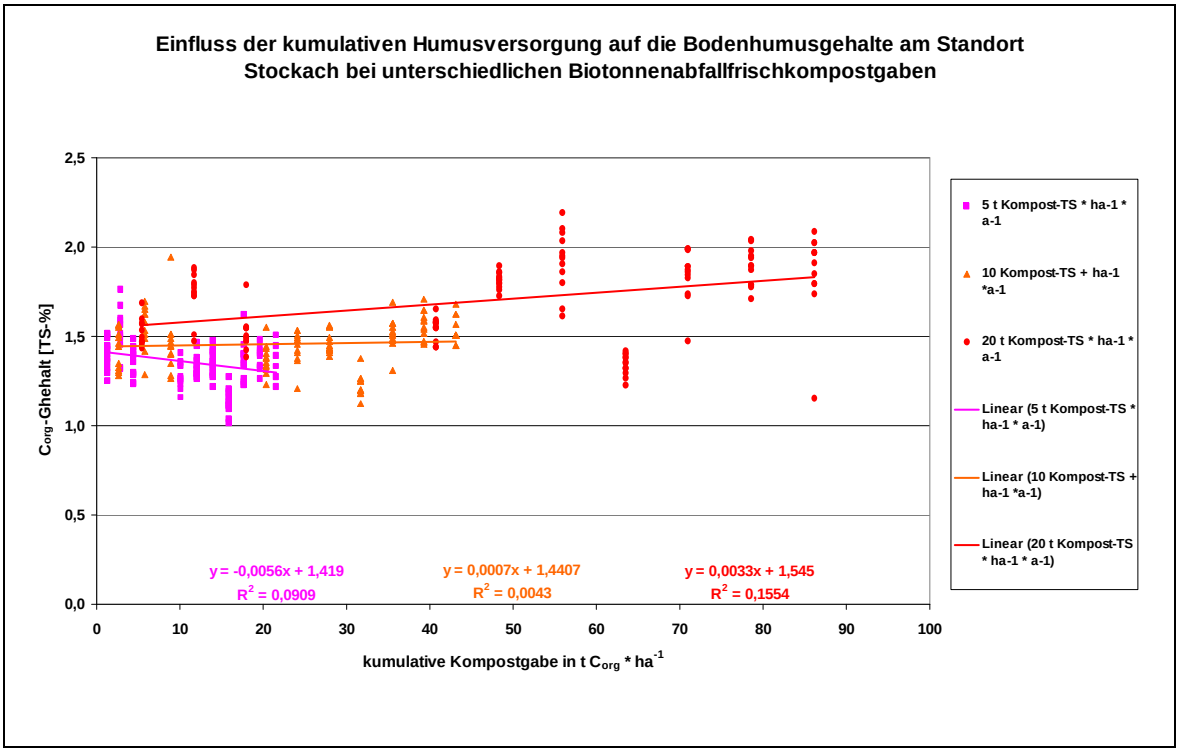
Die Auswirkungen der differenzierten Gaben von Biotonnenabfallfrischkomposten auf den Trend von C_{org}-Bodengehalten über die gesamte Versuchsdauer ist nachfolgender Darstellung zu entnehmen.



Der Versuchsstandort Stockach weist im Vergleich zu den beiden anderen Standorten eine Besonderheit auf. Die Variante ohne Kompostdüngung zeigt sinkende Tendenzen der C_{org}-

Bodengehalte. Das ist darauf zurückzuführen, dass diese hofnahe Versuchsflächen in den Jahren zuvor eine besonders hohe Versorgung mit Stallmist erfahren hat (Luxuskonsum). Entfällt nun die organische Düngung , nehmen die C_{org}-Bodengehalte allmählich ab. Erste bei jährlichen Biotonnenabfallfrischkompostgaben von 20 t Trockensubstanz je Hektar ist ein weiterer Anstieg der C_{org}-Bodengehalte erzielbar. 10 t Komposttrockensubstanz je Hektar und Jahr können den hohen Humusspiegel aufrechterhalten.

Im Weiteren soll geprüft werden, wie die jährlich unterschiedlichen Mengen an Kompostgaben sich als Summenfunktion auf die Bodenhumusgehalte auswirken. Dazu wurden die jeweiligen Jahresmesswerte der C_{org}-Bodengehalte hinsichtlich ihres Zusammenhangs mit den bis zu diesem Jahr insgesamt durch den Kompost gegebenen Mengen in organischen Kohlenstoff betrachtet, was nachfolgend dargestellt ist.



Wegen der zuvor erhöhten Humusversorgung zeigen die kumulativen Gaben von organischem Kohlenstoff aus gestaffelter Kompostanwendung unterschiedliche Wirkungen auf die C_{org}-Bodengehalte. Insgesamt werden diese schwachen Tendenzen durch eine starke Streuung der C_{org}-Messwerte überlagert. Die zusammengefasste Auswertung der gestaffelten Kompostgaben ist demnach aus statistischer Sicht auch hier möglich.

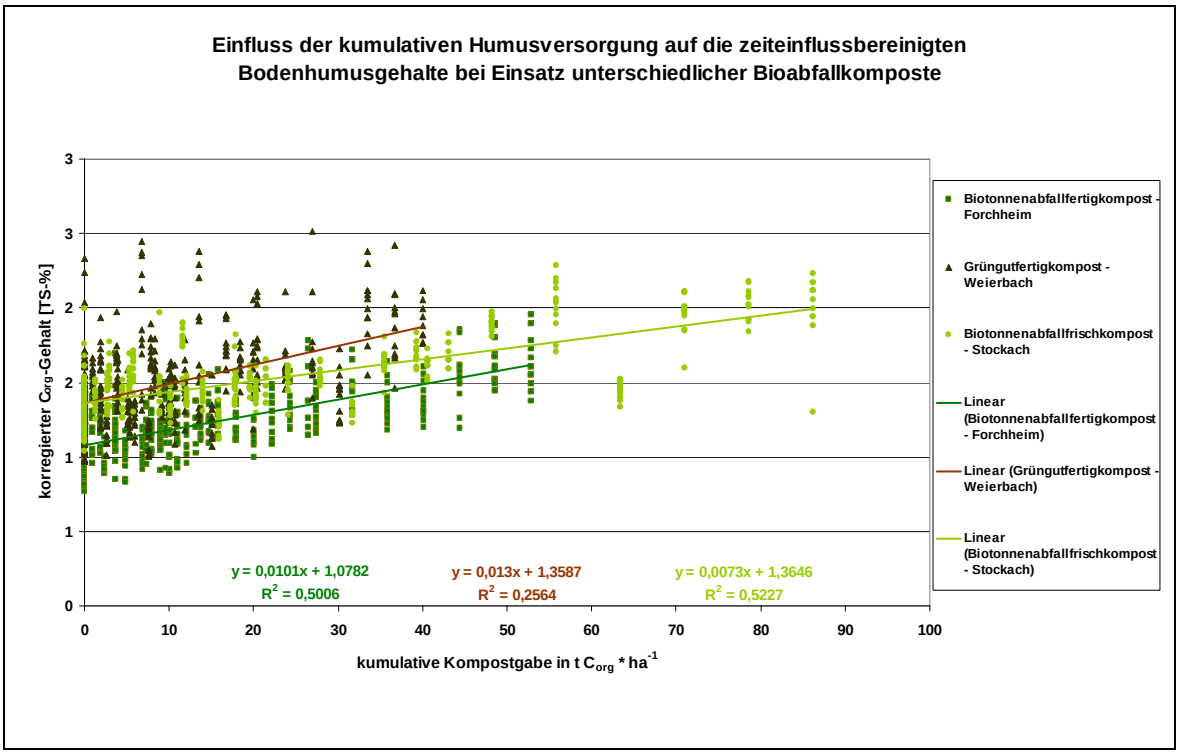
Zusammenfassende Betrachtung der drei Versuchsstandorte

Die Auswertung der 12-jährigen Kompostversuchsreihen von drei Standorten erlauben insgesamt folgende Aussagen:

- Die Stickstoffdüngungsstufen zeigen nur geringe, vernachlässigbare Wirkungen auf die Entwicklung der C_{org}-Bodengehalte. Sie sind für die Ableitung von Humusreproduktionsleistungen von geringer Bedeutung.

- Die steigenden Kompostgaben führen über die Versuchsdauer zu linear erhöhten C_{org}-Bodengehalten, deren gesicherter Nachweis durch große Jahresunterschiede der C_{org}-Messwerte jedoch erst ab Aufwandmengen von 20 t Komposttrockenmasse je Hektar und Jahr möglich sind. Für die Ableitung der Humusreproduktionsleistung kann über die 12-jährige Versuchsdauer für alle drei geprüfte Komposte von linearen Zuwächsen ausgegangen werden.
- Eine zusammenfassende Auswertung aller Kompostdüngungsstufen ist bei Wahl der kumulativen C_{org}-Versorgung als Einflussfaktor auf die C_{org}-Bodengehalte zulässig. Die geprüften Komposte zeigten alle eine stabile Humusanreicherungsleistung, unabhängig vom Zeitpunkt der Gabe.
- Infolge unterschiedlicher Humusversorgungzustände der Standorte vor Versuchsbeginn sind von den Kompostgaben unabhängige Trends in der Entwicklung der C_{org}-Bodengehalte zu berücksichtigen. Das kann durch die Berücksichtigung des Zeitverlaufs der Versuchsparzellen ohne Kompostdüngung erfolgen.

Für die drei geprüften Komposte können folgende Auswirkungen der kumulativen Zuführung von organischer Kompostsubstanz auf die an der nicht mit Kompost versorgten Fläche korrigierten C_{org}-Bodengehalte abgeleitet werden.



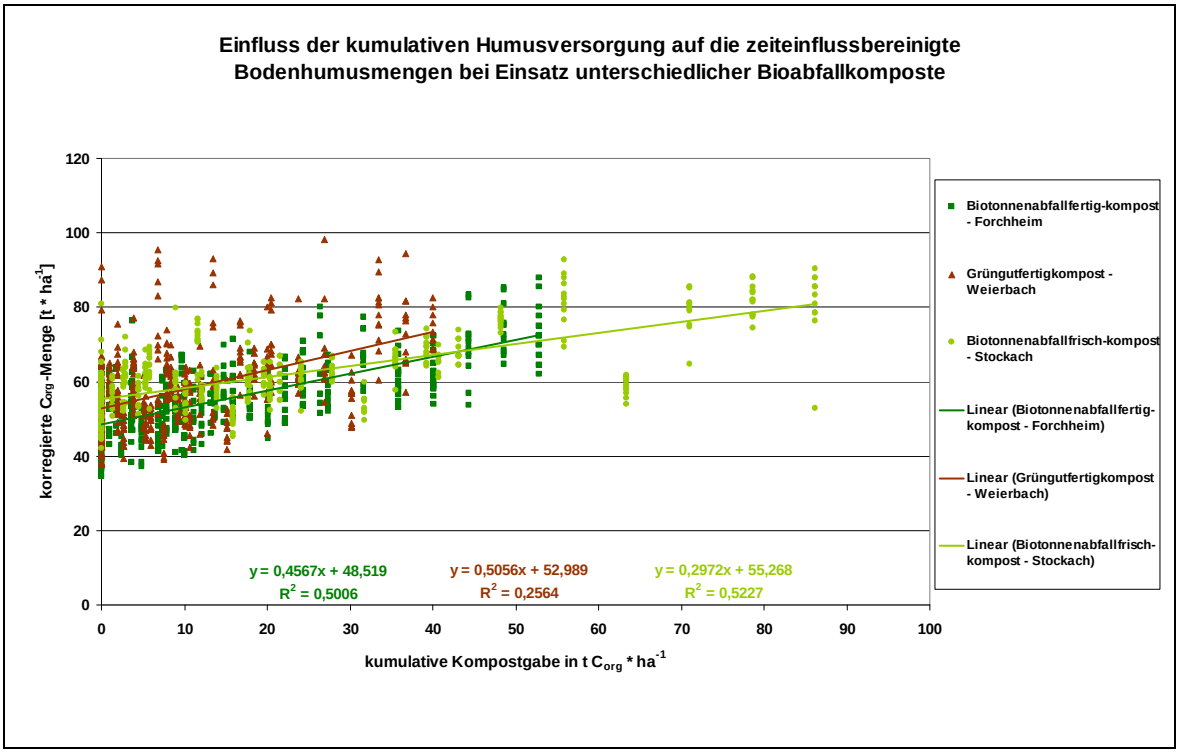
Für die ausschließlich mineralisch gedüngten Versuchsstandorte (ohne organische Düngung) können folgende C_{org}-Bodengehalte als durchschnittlich nutzungstypisch geschätzt werden:

- Forchheim (lehmiger Sand) 1,08 TS-%
- Weierbach (schluffiger Lehm) 1,36 TS-%
- Stockach (schluffig-toniger Lehm) 1,36 TS-%

Alle drei Komposte zeigen statistisch gesicherte Beziehungen zu den C_{org}-Gehaltserhöhungen in den Böden. Dabei wurde folgende Reihenfolge der C_{org}-Gehaltserhöhungen gefunden:

Grüngutfertigkomposte **>** Biotonnenabfallfertigkompost **>** Biotonnenabfallfrischkompost

Um die Humusreproduktionsleistung der geprüften Komposte kennzeichnen zu können, sind aus den C_{org}-Gehaltserhöhungen die C_{org}-Mengenzunahmen in den Böden abzuleiten. Das erfolgt unter Berücksichtigung der Probenahmetiefe von 30 cm und der Bodenlagerungsdichten der Standorte (1,3 bis 1,5 g/cm³). Das Ergebnis dieser regressionsanalytischen Auswertung ist nachfolgend dargestellt.



Für die drei geprüften Komposte können folgende Wiederfindungsraten von organischem Kohlenstoff aus der organischen Düngung in einer 30 cm mächtigen Ackerkrume abgeschätzt werden:

- Grüngutfertigkompost bei schluffigem Lehm 50,6 %
- Biotonnenabfallfertigkompost bei lehmigem Sand 45,7 %
- Biotonnenabfallfrischkompost bei schluffig-tonigem Lehm 29,7 %

Durch die Kompostanwendung erfolgte eine Humusanreicherung im Boden. Für die 12 Versuchsjahre wurden lineare Zusammenhänge gefunden, unabhängig von der Höhe der Kompostgabe. Die Einstellung eines fließgleichgewichtig stabilen Humusgehaltes wurde in den 12 Versuchsjahren durch die geprüften Kompostgaben nicht erreicht bzw. nicht einmal geleitet.

Innerhalb der 12 Versuchsjahre wurde für eine nach BioAbfV zulässige Kompostgabe von 10 t TS * ha^{-1} * a^{-1} folgende Humusanreicherung in den Böden nachgewiesen:

- Grüngutfertigkompost bei schluffigem Lehm 0,82 t $C_{org} \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$
- Biotonnenabfallfertigkompost bei lehmigem Sand 0,97 t $C_{org} \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$
- Biotonnenabfallfrischkompost bei schluffig-tonigem Lehm 1,13 t $C_{org} \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$

Dieser Effekt kann sich zumindest temporär als klimaschutzrelevant erweisen, wenn er mittelfristig aufrecht erhalten wird.

Damit gehen die in diesem Kompostprojekt erzielten Ergebnisse deutlich über die Angaben aus dem VDLUFA-Standpunkt „Humusbilanzierung“ (Körschens et al., 2004) hinaus, der für Komposte eine Humusreproduktionsleistung von etwa 40 bis 50 % der dem Boden zugeführten organischen Substanz beinhaltet. Hier wird davon ausgegangen, dass auch diese organische Substanz nach Einstellung eines standort- und nutzungstypischen Humusgehaltes abgebaut ist, wobei für die Humusbilanzierung von deutlich geringeren Kompostgaben ausgegangen wird als in dem vorgestellten Kompostprojekt geprüft worden sind.

Aus deutschen Dauerdüngungsfeldversuchen kann ein mittlerer Humus-C-Bedarf von etwa 0,4 t je Hektar und Jahr abgeleitet werden, wenn keine Rückführung von Ackerrückständen (z.B. Stroh, Rübenblatt) erfolgt. Die nach VDLUFA-Standpunkt „Humusbilanzierung“ für die in diesem Projekt geprüften Komposte ableitbaren Aufwandmengen zur einfachen Humusreproduktion sind dann wie folgt anzugeben:

- Grüngutfertigkompost 4,8 t TS $\cdot$ ha^{-1} $\cdot$ a^{-1}
- Biotonnenabfallfertigkompost 3,8 t TS $\cdot$ ha^{-1} $\cdot$ a^{-1}
- Biotonnenabfallfrischkompost 2,6 t TS $\cdot$ ha^{-1} $\cdot$ a^{-1}

In diesem Projekt wurden Kompostgaben bis zu 20 t TS * ha^{-1} * a^{-1} geprüft. Das liegt bei den höchsten Kompostgaben 4- bis 8-fach über den Empfehlungen für die einfache Humusreproduktion.

Für leichter abbaubare organische Dünger wird davon ausgegangen, dass eine über die Empfehlungen der Humusbilanzierung hinausgehende Humusversorgung zu erhöhtem Abbau von organischem Kohlenstoff im Boden führt. Das ist in diesem Kompostprojekt nicht bestätigt worden, sodass sich für die Kompostanwendung erste Hinweise auf eine nachhaltige Humusanreicherung im Boden ergeben. Das sollte durch Forschungsvorhaben weiter verfolgt werden, wozu die Weiterführung der verfügbaren Kompostanwendungsdauerfeldversuche, insbesondere der hier genannten Versuchsstandorte zu empfehlen ist.

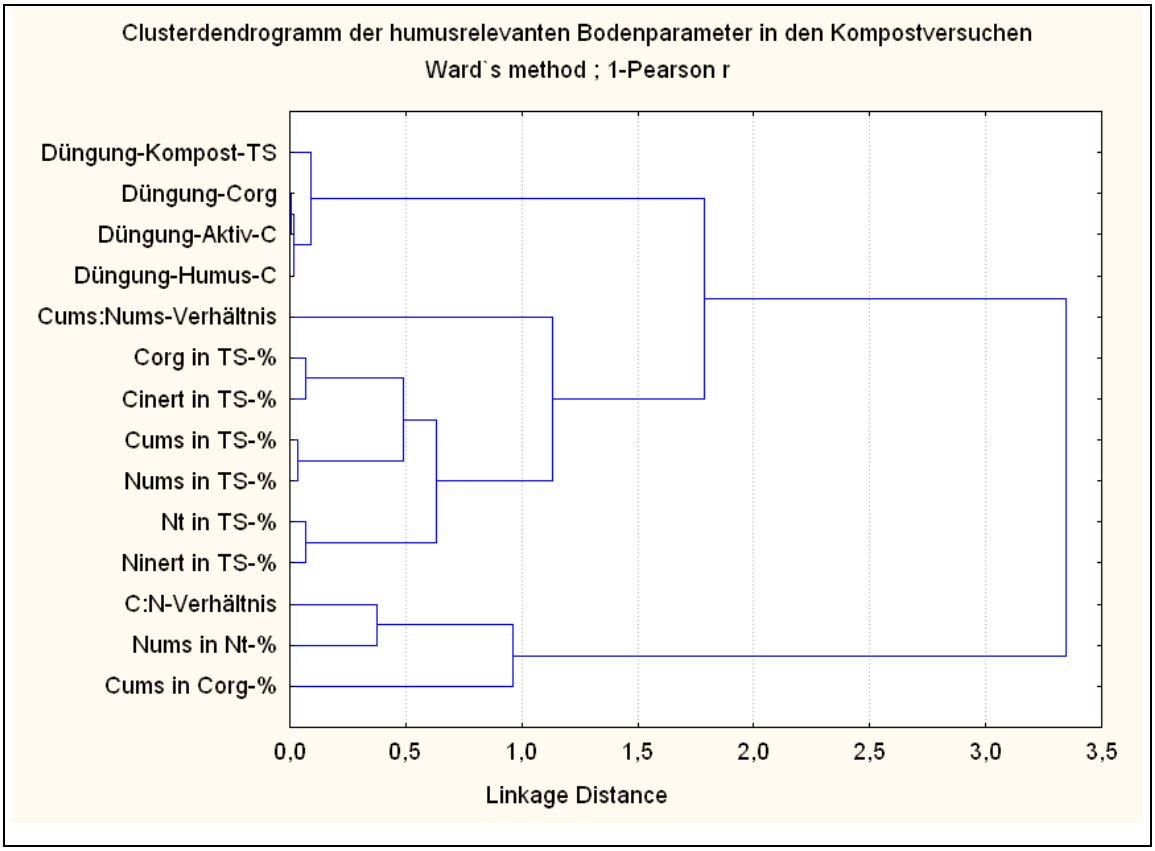
Humusbeschaffenheit

Die Bodenuntersuchungen für das Jahr 2006 wurden um einige Parameter zur Beschreibung der Humusbeschaffenheit erweitert. Hier wurden neben der Untersuchungen auf C_{org} und N_t auch die heißwasserlöslichen C- und N-Gehalte (C_{hwl}, N_{hwl}) analysiert. Damit besteht die Möglichkeit, neben den Humusgesamtgehalten auch den im Boden umsetzbaren Anteil

(C_{ums})zu beschreiben, sowohl nach Menge als auch nach Qualität (hier C:N-Verhältnis). Der C_{ums}-Bodengehalt errechnet sich nach Körschens & Schulz (1999) wie folgt:

$$C_{ums} = 15 \cdot C_{hwl}$$

Einen ersten Überblick soll eine Clusteranalyse liefern, mit deren Hilfe die humusrelevanten Parameter zu Merkmalsgruppen ähnlicher Verteilung in den einzelnen Versuchsparzellen zusammengefasst werden können. Dazu folgende Abbildung:



Die Gesamtgehalte an Corg und Nt bilden mit den umsetzbaren sowie den inerten C- und N-Gehalten eine Gruppe, die gemeinsam etwas lockere Ähnlichkeiten mit dem C:N-Verhältnis in der umsetzbaren organischen Substanz und den Kompostdüngungsparameter zeigen.

Als weitgehend eigenständige Parametergruppe sind dagegen das C:N-Verhältnis der gesamten organischen Bodensubstanz sowie die Anteile von umsetzbarem C und N an deren Gesamtgehalten im Boden anzusehen.

Nachfolgend sollen die Untersuchungsergebnisse der über sieben Jahre (2000 bis 2006) mit gestaffelten Kompostgaben (0, 10 und 20 t Kompost-TS) bei voller mineralischer Nährstoffversorgung organisch gedüngten Versuchsstandorte betrachtet werden.

Auswertung der humusrelevanten Bodenuntersuchungsergebnisse

Zur varianzanalytischen Auswertung der Bodenuntersuchungsergebnisse wurde ein multipler Newman-Keuls-Test durchgeführt. Die Ergebnisse dieser statistischen Auswertung sind nachfolgend getrennt nach den untersuchten Humusparametern zusammengestellt.

Ergebnisse des Newman-Keuls-Tests zur Prüfung des Einflusses von Kompostgaben auf die Corg-Bodengehalte (Stand 2006)

Standort	Kompostgabe		Corg in TS-%	Irrtumswahr. (p)		
	Qualität	t TS/ha*a	Mittelwert	0	10	20
Forchheim	Fertigkompost Biotonne	0	1,19		0,12	**0,02**
		10	1,47	0,12		0,65
		20	1,66	**0,02**	0,65	
Weierbach	Fertigkompost Grüngut	0	2,03		**0,01**	**0,00**
		10	2,41	**0,01**		**0,01**
		20	2,91	**0,00**	**0,01**	
Stockach	Frischkompost Biotonne	0	1,26		0,06	**0,00**
		10	1,65	0,06		0,09
		20	1,98	**0,00**	0,09	
Ellwangen	Fertigkompost Biotonne	0	1,62		**0,00**	**0,00**
		10	2,41	**0,00**		0,05
		20	2,74	**0,00**	0,05	
Heidenheim	Frischkompost Biotonne	0	1,53		**0,03**	**0,00**
		10	1,96	**0,03**		**0,00**
		20	2,56	**0,00**	**0,00**	

Legende: Fettdruck - Irrtumswahrscheinlichkeit(p) < 0,05 = gesichert verschieden
mittlere Ablehnungsschwelle bei p < 0,05 = ± 0,37

In ihrer Wirkung auf die C_{org}-Bodengehalte sind in allen Fällen die höchsten Kompostgaben von den organisch ungedüngten Varianten statistisch gesichert zu unterscheiden. Für die Versuchstandorte Weierbach und Heidenheim sind auch die Unterschiede der Kompostgaben-Differenzen von 10 t TS je Hektar und Jahr statistisch gesichert nachzuweisen.

Die Auswertungsergebnisse zu den Gesamt-Stickstoffgehalten im Boden entsprechen im Wesentlichen denen zu den C_{org}-Bodengehalten. Die Wirkung der gestaffelten Kompostgaben ist zumeist noch deutlicher erkennbar.

Das C:N-Verhältnis im Boden kennzeichnet das Stickstoffnachlieferungsvermögen aus der organischen Bodensubstanz. Die Versuchssatndorte Stockach, Ellwangen und Heidenheim fallen durch sehr niedrige C:N-Verhältnisse auf, was auf die Möglichkeit einer hohen Versorgung mit leicht abbaubaren organischen Düngern (Stallmist, Gülle) vor Versuchsbeginn hindeutet.

Ergebnisse des Newman-Keuls-Tests zur Prüfung des Einflusses von Kompostgaben auf die C:N-Verhältnisse im Boden (Stand 2006)						
Standort	**Kompostgabe**		**C : N**	**Irrtumswahr. (p)**		
	Qualität	t TS/ha*a	Mittelwert	0	10	20
Forchheim	Fertigkompost Biotonne	0	10,34		0,78	0,85
		10	10,67	0,78		0,90
		20	10,74	0,85	0,90	
Weierbach	Fertigkompost Grüngut	0	10,60		0,10	**0,00**
		10	11,76	0,10		0,19
		20	12,40	**0,00**	0,19	
Stockach	Frischkompost Biotonne	0	7,72		0,83	0,95
		10	7,82	0,83		0,95
		20	7,97	0,95	0,95	
Ellwangen	Fertigkompost Biotonne	0	8,18		0,79	0,62
		10	8,63	0,79		1,00
		20	8,63	0,62	1,00	
Heidenheim	Frischkompost Biotonne	0	7,86		0,88	0,58
		10	8,10	0,88		0,59
		20	8,58	0,58	0,59	
Legende:	Fettdruck - Irrtumswahrscheinlichkeit(p) < 0,05 = gesichert verschieden mittlere Ablehnungsschwelle bei p < 0,05 = ± 1,30					

Bei den Kompostgaben wurde zumeist eine unbedeutende Zunahme des C:N-Verhältnisses beobachtet. Eine signifikante Zunahme wurde nur bei dem Grüngutfertigkompost (Versuchsstandort Weierbach) nachgewiesen. Die geringeren Nährstoffgehalte von Grüngutkomposten im Vergleich zu Biotonnenabfallkomposten sind dafür als Ursache anzunehmen.

Die Bodengehalte von heißwasserlöslichem organischen Kohlenstoff zeigen ähnliche Reaktionen auf die gestaffelten Kompostgaben, wie die C_{org}-Bodengehalte. Auffällig ist, dass die zuvor wahrscheinlich hoch humusversorgten Versuchsstandorte Stockach, Ellwangen und Heidenheim auf Kompostgaben mit sehr deutlich zunehmenden heißwasserlöslichen C-Gehalten im Boden reagieren. Das deutet auf eine stärkere Mobilisierung der gedüngten Kompost-C_{org}-Mengen in biologisch aktiven Böden hin.

Der heißwasserlösliche Stickstoff läuft mit den C_{hwl}-Bodengehalten weitgehend parallel. Lediglich bei den nährstoffarmen Grüngutfertigkomposten konnte kein statistischer Zusammenhang zu den Kompostgaben abgeleitet werden.

Die C:N-Verhältnisse in den Heißwasserextrakten zeigen nur bei dem Versuchsstandort Stockach (Biotonnenabfallfrischkompost) eine gesicherte Abhängigkeit von den Kompostgaben. Das C.N-Verhältnis der umsetzbaren organischen Bodensubstanz wird durch die Kompostanwendung enger. Die im Brikkolare-Verfahren sehr schwach angerotteten Komposte unterliegen im Boden einem verstärkten mikrobiologischen Abbau, der vor allem CO_2 freisetzt und Stickstoff anteilig biologisch fixiert. Die stärker zersetzten Komposte reagieren wegen ihrer höheren Abbaustabilität nicht in diese Richtung.

Ergebnisse des Newman-Keuls-Tests zur Prüfung des Einflusses von Kompostgaben auf die C_{hwl}-Bodengehalte (Stand 2006)						
Standort	**Kompostgabe**		**C_{hwl} [mg/kg TS]**	**Irrtumswahr. (p)**		
	Qualität	t TS/ha*a	Mittelwert	0	10	20
Forchheim	Fertigkompost Biotonne	0	491		0,50	**0,01**
		10	549	0,50		0,06
		20	620	**0,01**	0,06	
Weierbach	Fertigkompost Grüngut	0	814		0,06	**0,00**
		10	884	0,06		0,27
		20	951	**0,00**	0,27	
Stockach	Frischkompost Biotonne	0	496		**0,00**	**0,00**
		10	689	**0,00**		**0,00**
		20	903	**0,00**	**0,00**	
Ellwangen	Fertigkompost Biotonne	0	506		**0,00**	**0,00**
		10	740	**0,00**		**0,00**
		20	929	**0,00**	**0,00**	
Heidenheim	Frischkompost Biotonne	0	531		**0,00**	**0,00**
		10	750	**0,00**		**0,00**
		20	996	**0,00**	**0,00**	
Legende:	Fettdruck - Irrtumswahrscheinlichkeit(p) < 0,05 = gesichert verschieden mittlere Ablehnungsschwelle bei p < 0,05 = ± 98					

Ergebnisse des Newman-Keuls-Tests zur Prüfung des Einflusses von Kompostgaben auf die N_{hwl}-Bodengehalte (Stand 2006)						
Standort	**Kompostgabe**		**N_{hwl} [mg/kg TS]**	**Irrtumswahr. (p)**		
	Qualität	t TS/ha*a	Mittelwert	0	10	20
Forchheim	Fertigkompost Biotonne	0	48,3		0,25	**0,04**
		10	52,7	0,25		0,18
		20	57,9	**0,04**	0,18	
Weierbach	Fertigkompost Grüngut	0	68,0		0,28	0,05
		10	73,8	0,28		0,28
		20	78,0	0,05	0,28	
Stockach	Frischkompost Biotonne	0	40,6		**0,00**	**0,00**
		10	62,6	**0,00**		**0,00**
		20	85,1	**0,00**	**0,00**	
Ellwangen	Fertigkompost Biotonne	0	40,9		**0,00**	**0,00**
		10	63,9	**0,00**		**0,00**
		20	81,0	**0,00**	**0,00**	
Heidenheim	Frischkompost Biotonne	0	47,0		**0,00**	**0,00**
		10	69,3	**0,00**		**0,00**
		20	91,4	**0,00**	**0,00**	
Legende:	Fettdruck - Irrtumswahrscheinlichkeit(p) < 0,05 = gesichert verschieden mittlere Ablehnungsschwelle bei p < 0,05 = ± 10,3					

Ergebnisse des Newman-Keuls-Tests zur Prüfung des Einflusses von Kompostgaben auf das Verhältnis von C_{hwl}:N_{hwl} (Stand 2006)						
Standort	**Kompostgabe**		**C_{hwl} : N_{hwl}**	**Irrtumswahr. (p)**		
	Qualität	t TS/ha*a	Mittelwert	0	10	20
Forchheim	Fertigkompost Biotonne	0	10,27		0,61	0,56
		10	10,44	0,61		0,70
		20	10,70	0,56	0,70	
Weierbach	Fertigkompost Grüngut	0	11,99		0,97	0,53
		10	11,97	0,97		0,78
		20	12,19	0,53	0,78	
Stockach	Frischkompost Biotonne	0	12,21		**0,01**	**0,00**
		10	11,00	**0,01**		0,75
		20	10,61	**0,00**	0,75	
Ellwangen	Fertigkompost Biotonne	0	12,40		0,15	0,09
		10	11,59	0,15		0,72
		20	11,47	0,09	0,72	
Heidenheim	Frischkompost Biotonne	0	11,38		0,33	0,33
		10	10,82	0,33		0,78
		20	10,91	0,33	0,78	
Legende:	Fettdruck - Irrtumswahrscheinlichkeit(p) < 0,05 = gesichert verschieden mittlere Ablehnungsschwelle bei p < 0,05 = ± 0,87					

Ergebnisse des Newman-Keuls-Tests zur Prüfung des Einflusses von Kompostgaben auf die Relation von C_{ums} zu C_{org} (Stand 2006)						
Standort	**Kompostgabe**		**C_{ums} in C_{org}-%**	**Irrtumswahr. (p)**		
	Qualität	t TS/ha*a	Mittelwert	0	10	20
Forchheim	Fertigkompost Biotonne	0	61,9		0,31	0,38
		10	56,4	0,31		0,99
		20	56,1	0,38	0,99	
Weierbach	Fertigkompost Grüngut	0	60,7		0,52	**0,00**
		10	56,2	0,52		0,08
		20	49,3	**0,00**	0,08	
Stockach	Frischkompost Biotonne	0	59,2		0,54	**0,01**
		10	62,7	0,54		**0,03**
		20	68,5	**0,01**	**0,03**	
Ellwangen	Fertigkompost Biotonne	0	46,7		0,81	0,24
		10	46,0	0,81		0,25
		20	51,0	0,24	0,25	
Heidenheim	Frischkompost Biotonne	0	52,1		0,25	0,18
		10	57,6	0,25		0,76
		20	58,4	0,18	0,76	
Legende:	Fettdruck - Irrtumswahrscheinlichkeit(p) < 0,05 = gesichert verschieden mittlere Ablehnungsschwelle bei p < 0,05 = ± 7,1					

Aus den Messwerten von C_{hwl} kann der Gehalt an umsetzbarem organischen Kohlenstoff (C_{ums}) im Boden abgeleitet werden. Wird dieser in Relation zu den gesamten C_{org}-Bodengehalten gesetzt, so zeigen sich für extreme Kompostqualitäten gegenläufige Wirkungen, die sogar statistisch gesichert werden konnten.

Während der nährstoffarme und sehr abbaustabile Grüngutfertigkompost am Versuchstandort Weierbach mit steigenden Gaben zu einem sinkenden Anteil an umsetzbarem Kohlenstoff im Boden führt, bewirkt der weniger abbaustabile Biotonnenabfallfrischkompost am Versuchsstandort Stockach eine gesicherte Zunahme des Anteils an umsetzbarem organischen Kohlenstoff. Für die anderen geprüften Komposte konnte kein deutlicher Einfluss auf den umsetzbaren Humusanteil im Boden gefunden werden.

Ergebnisse des Newman-Keuls-Tests zur Prüfung des Einflusses von Kompostgaben auf die Relation von N_{ums} zu N_t (Stand 2006)

Standort	**Kompostgabe**		**N_{ums} in N_t-%**	**Irrtumswahr. (p)**		
	Qualität	t TS/ha*a	Mittelwert	0	10	20
Forchheim	Fertigkompost Biotonne	0	62,8		0,07	**0,05**
		10	57,8	0,07		0,57
		20	56,3	**0,05**	0,57	
Weierbach	Fertigkompost Grüngut	0	53,2		0,70	0,42
		10	54,3	0,70		0,36
		20	49,9	0,42	0,36	
Stockach	Frischkompost Biotonne	0	37,4		**0,04**	**0,00**
		10	44,6	**0,04**		0,06
		20	51,4	**0,00**	0,06	
Ellwangen	Fertigkompost Biotonne	0	30,8		0,19	**0,05**
		10	34,3	0,19		0,42
		20	38,3	**0,05**	0,42	
Heidenheim	Frischkompost Biotonne	0	36,2		0,06	**0,01**
		10	43,1	0,06		0,53
		20	45,9	**0,01**	0,53	

Legende: Fettdruck - Irrtumswahrscheinlichkeit(p) < 0,05 = gesichert verschieden
mittlere Ablehnungsschwelle bei p < 0,05 = ± 7,1

Wesentlich deutlicher als der umsetzbare Anteil des organischen Kohlenstoffs wird der umsetzbare Anteil von Gesamtstickstoff im Boden durch die Kompostgaben beeinflusst. Dabei spielt anscheinend der standorttypische Anteil an umsetzbarem Stickstoff eine wesentliche Rolle. Für die Versuchsstandorte Stockach, Ellwangen und Heidenheim wurden umsetzbare Stickstoffanteile von etwa 30 bis 40 % des Gesamtstickstoffs im Boden nachgewiesen. In Forchheim und Weierbach lagen diese deutlich über 50 %.

Die Böden mit geringen Anteilen umsetzbaren Stickstoffs am Gesamtstickstoff reagierten auf die Kompostgaben mit gesicherter Zunahme an umsetzbarem Stickstoff, die mit hohen Ausgangsanteilen mit einer gesicherten Abnahme an umsetzbarem Stickstoff. Es kam bei den höchsten Kompostgaben (20 t Kompost-TS $\cdot$ ha^{-1} $\cdot$ a^{-1}) zu einer weitgehenden Annäherung des umsetzbaren Stickstoffanteils im Boden. Die Bodenunterschiede wurden durch hohe Kompostgaben hinsichtlich ihres Stickstofffreisetzungsverhaltens annähernd ausgeglichen.

Auf den inerten oder umsatzträgen organischen Kohlenstoff kann wie folgt geschlossen werden:

$$C_{inert} = C_{org} - C_{ums}$$

Der inerte oder umsatzträge organische Kohlenstoff ist nur in geringem Maße und meist über längere Zeiträume an den mikrobiologischen Ab-, Um- und Aufbauprozessen im Boden be-

teiligt. Er ist stark in Ton-Humus-Komplexen gebunden und vorwiegend bodenphysikalisch wirksam.

Ergebnisse des Newman-Keuls-Tests zur Prüfung des Einflusses von Kompostgaben auf die C_{inert}-Bodengehalte (Stand 2006)						
Standort	**Kompostgabe**		**C_{inert} in TS-%**	**Irrtumswahr. (p)**		
	Qualität	t TS/ha*a	Mittelwert	0	10	20
Forchheim	Fertigkompost Biotonne	0	0,45		0,40	0,14
		10	0,64	0,40		0,45
		20	0,73	0,14	0,45	
Weierbach	Fertigkompost Grüngut	0	0,81		0,13	**0,00**
		10	1,08	0,13		**0,00**
		20	1,48	**0,00**	**0,00**	
Stockach	Frischkompost Biotonne	0	0,51		0,37	0,55
		10	0,61	0,37		0,89
		20	0,63	0,55	0,89	
Ellwangen	Fertigkompost Biotonne	0	0,87		**0,00**	**0,00**
		10	1,30	**0,00**		0,65
		20	1,35	**0,00**	0,65	
Heidenheim	Frischkompost Biotonne	0	0,73		0,64	**0,03**
		10	0,83	0,64		0,10
		20	1,06	**0,03**	0,10	
Legende:	Fettdruck - Irrtumswahrscheinlichkeit(p) < 0,05 = gesichert verschieden mittlere Ablehnungsschwelle bei p < 0,05 = ± 0,30					

Für alle Versuchstandorte ist eine Zunahme der C_{inert}-Bodengehalte in Abhängigkeit von der steigenden Kompostgaben erkennbar. Eine gesicherte Aussage ist jedoch für den Kompsteinsatz auf sandigem Boden nicht erkennbar und für Frischkompost nur in einem Fall gegeben. Hier war der mittlere Rottegrad mit 3,3 auch schon recht hoch. Die stärkste Anhebung der C_{inert}-Bodengehalte konnte durch Anwendung von Grüngutfertigkompost erzielt werden.

In der Regel wird für die Humusreproduktion nach VDLUFA-Standpunkt davon ausgegangen, dass keine dauerhafte Anhebung der C_{inert}-Bodengehalte erfolgt. Für die Anwendung stärker zersetzte Bioabfallkomposte auf lehmigen bis schluffigen Standorten konnte in diesem Kompostprojekt jedoch eine darüber hinausgehende Wirkung gesichert nachgewiesen werden.

Wird für die Gesamtstickstoffgehalte von gleichen Beziehungen wie beim organischen Kohlenstoff im Boden ausgegangen, so ergeben sich für den umsatzträgen bzw. inerten Stickstoff folgende Aussagen.

Sämtliche geprüfte Komposte führten zu statistisch gesicherten Zunahmen von inertem Stickstoff im Boden. Dieser Stickstoff verbleibt über eine längere Zeit im Boden, ohne wesentlich in die bodeninternen Stoffumsätze einbezogen zu werden. Das erklärt auch die in vielen Kompostanwendungsversuchen bestätigte geringe Stickstoffnachwirkung der Stickstofffrachten aus Kompostmaterial. Über die Dauer des Verbleibs von Stickstoff in der umsatzträgen bzw. inerten organischen Bodensubstanz kann über die hier ausgewerteten 7 bis 12-jährigen Versuchsreihen hinaus keine Aussage erfolgen. Eine Weiterführung der Versuchsdurchführung und –auswertung ist dafür dringend angeraten.

Ergebnisse des Newman-Keuls-Tests zur Prüfung des Einflusses von Kompostgaben auf die N_{inert}-Bodengehalte (Stand 2006)						
Standort	**Kompostgabe**		**N_{inert} in TS-%**	**Irrtumswahr. (p)**		
	Qualität	t TS/ha*a	Mittelwert	0	10	20
Forchheim	Fertigkompost Biotonne	0	0,042		**0,03**	**0,00**
		10	0,058	**0,03**		0,20
		20	0,067	**0,00**	0,20	
Weierbach	Fertigkompost Grüngut	0	0,090		0,59	**0,00**
		10	0,093	0,59		**0,01**
		20	0,117	**0,00**	**0,01**	
Stockach	Frischkompost Biotonne	0	0,102		**0,04**	**0,04**
		10	0,117	**0,04**		0,80
		20	0,121	**0,04**	0,80	
Ellwangen	Fertigkompost Biotonne	0	0,137		**0,00**	**0,00**
		10	0,184	**0,00**		0,07
		20	0,197	**0,00**	0,07	
Heidenheim	Frischkompost Biotonne	0	0,124		0,15	**0,00**
		10	0,138	0,15		**0,00**
		20	0,161	**0,00**	**0,00**	
Legende:	Fettdruck - Irrtumswahrscheinlichkeit(p) < 0,05 = gesichert verschieden mittlere Ablehnungsschwelle bei p < 0,05 = ± 0,019					

Zusammenfassend kann zur Beeinflussung der qualitativen Beschaffenheit der organischen Bodensubstanz durch Anwendung von Bioabfallkomposten folgendes festgestellt werden:

- Die Anwendung von Bioabfallkomposte kann zu wesentlichen Änderungen in Menge und Beschaffenheit der organischen Bodensubstanz beitragen, weil die mit der Kompostanwendung verbundenen Nährstofffrachten kaum aufwandsbeschränkend wirken.
- Kompostgaben erhöhen nicht nur die Gehalte an umsetzbarer organischer Bodensubstanz, sondern auch deren inerte bzw. umsatzträge Anteile. Das betrifft vor allem Fertigkomposte, insbesondere aus Grüngut.
- Frischkomposte erhöhen den Anteil von umsetzbarer organischer Substanz in der gesamten organischen Bodensubstanz. Das gilt sowohl für organischen Kohlenstoff, aber insbesondere für umsetzbaren organischen Stickstoff.
- Das C:N-Verhältnis wird durch Kompostanwendung wesentlich geringer beeinflusst als andere humusrelevante Faktoren. Dabei sind vereinzelte Zunahme für das C:N-Verhältnis der Gesamtgehalte (z.B. Grüngut) und vereinzelte Senkungen für das C:N-Verhältnis der umsetzbaren organischen Substanz aufgetreten (z.B. Biotonnenabfallfrischkompost).

Vergleich der Versuchsergebnisse zur organischen Bodensubstanz zu bestehenden Bewertungsvorgaben

Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse zu den Gesamtgehalten und der heißwasserlöslichen Gehalten sollen abschließend mit Bewertungsvorschlägen für die organische Bodensubstanz verglichen werden. Auf Bundesebene wird dazu auf die Bewertungsvorschläge für C_{org}-Bodengehalte von Wessolek et al. (2004) zurückgegriffen, die einen Schätzrahmen für

Hauptbodenarten in unterschiedlichen Klimaregionen und bei gestaffeltem Düngungsregime enthalten. Für das benachbarte Bundesland Bayern sind von Wendland et al. (2007) standorttypische Humusgehalte als Grundlage für die Düngungsberatung genannt, die nach auf Bodentextur (Tongehalt) gruppiert sind. Die Messwerte aus dem Versuchsjahr 2006 werden in der folgenden Tabelle mit diesen Bewertungsvorgaben verglichen.

Vergleich der eigenen C_{org}-Messwerte (Stand 2006) mit relevanten Bewertungsvorgaben			
Versuchs-standort	**C_{org} in TS-%**		
		Standorttypische Gehalte nach	
	eigene Messwerte	Wessolek et al. (2004)	Wendland et al. (2007)
Forchheim	1,19 - 1,66	1,73 - 2,01	0,9 - 1,8
Weierbach	2,03 - 2,91	2,59 - 2,80	1,3 - 2,9
Stockach	1,26 - 1,98	1,10 - 1,44	1,3 - 2,9
Ellwangen	1,62 - 2,74	2,59 - 2,80	1,3 - 2,9
Heidenheim	1,53 - 2,56	2,59 - 2,80	1,3 - 2,9

In die sehr weit gefassten, aus Praxisbeobachtungsflächen abgeleiteten bayerischen standorttypischen Humusgehalte ordnen sich die eigenen Messwerte aus den Kompostversuchen problemlos ein. Die unteren Grenzen der eigenen Messwerte (ohne organische Düngung) liegen nur am Standort Stockach an der unteren Grenze der standorttypischen Humusgehalte. Am Standort Weierbach erreichen die sehr hoch humusversorgten Böden (20 t Kompost-TS $\cdot$ $ha^{-1} \cdot a^{-1}$) auch gerade die obere Grenze der standorttypischen Humusgehalte.

Für eine Bewertung der eigenen Messwerte nach dem Schätzrahmen von Wessolek et al. (2004) für standorttypische Humusgehalte muss berücksichtigt werden, dass in diesem Schätzrahmen mittlere C_{org}-Bodengehalte genannt sind. Die genannten Spannen leiten sich aus unterschiedlichem Düngungsregime ab. Toleranzen für die Bewertung von konkreten Messwerten werden nicht genannt. Wird hier die in den eigenen Kompostversuchen für die C_{org}-Bodengehalte gefundene mittlere Ablehnungsschwelle von $\pm$ 0,37 TS-% zugrunde gelegt, so ergeben sich folgende Aussagen.

- Alle Versuchstandorte außer Stockach weisen für die nur mineralisch gedüngten Flächen C_{org}-Bodengehalte auf, die unter den standorttypischen Empfehlungen liegen.
- Nur der Versuchsstandort Stockach wird mit den oberen gefundenen Messwerten (20 t Kompost-TS $\cdot$ $ha^{-1} \cdot a^{-1}$) als über den standorttypischen C_{org}-Bodengehalten liegend bewertet.

Bezogen auf kompostversorgten Flächen ergeben sich aus den Vergleichen mit relevanten Bewertungsvorgaben für standorttypische Humusgehalte kaum Hinweise auf eine überhöhte Humusversorgung, obwohl ein Mehrfaches der Humusreproduktionsleistung erfolgte, als im VDLUFA-Standpunkt „Humusbilanzierung“ empfohlen worden ist. Lediglich für den vor Versuchsbeginn schon sehr hoch mit Stallmist versorgte Standort Stockach kann auf eine Humusüberversorgung bei den höchsten Kompostgaben geschlossen werden.

Auf einen Vergleich der C_{org}-Bodenmesswerte aus den eigenen Kompostversuchen mit Bewertungsvorgaben für ostdeutsche Regionen wurde hier wegen der andersartigen klimatischen Bedingungen verzichtet.

Erste grobe Vorschläge für die Bewertung von C_{hwl}-Bodengehalten liegen von Körschens & Schulz (1999) vor, ohne einen Bezug auf Bodenarten, Klimaeinflüsse oder Düngung zu nehmen. Dazu folgender tabellarischer Vergleich mit den eigenen Untersuchungsergebnissen.

Vergleich der eigenen C_{hwl}-Messwerte (Stand 2006) mit einer Klassifizierung nach Körschens & Schulz (1999) für ostdeutsche grundwasserferne Sand- und Lößstandorte

Versuchs-standort	C_{hwl} in mg/kg TS					
	eigene Messwerte	sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch
Forchheim	491 - 620	< 200	200 bis 250	250 bis 300	300 bis 400	> 400
Weierbach	814 - 951					
Stockach	496 - 903					
Ellwangen	506 - 929					
Heidenheim	531 - 996					

Anhand der Bewertungsvorgaben von Körschens & Schulz wären alle Untersuchungsergebnisse auf C_{hwl}-Bodengehalte als sehr hoch einzustufen. Hier zeigt sich, dass ähnlich wie bei den C_{org}-Bodengehalten, für eine Bewertung von Humusgehalten die Standortbedingungen zu berücksichtigen sind. Unter den klimatischen Verhältnissen Baden-Württembergs scheinen grundsätzlich höhere C_{hwl}-Bodengehalte aufzutreten als in den ostdeutschen Trockenregionen.

Literatur

Körschens, M. & Schulz, E. (1999)	Die organische Bodensubstanz: Dynamik - Reproduktion - ökonomisch und ökologisch begründete Richtwerte. UFZ, Umweltforschungszentrum, Leipzig-Halle, 1999
Körschens, M. et al. (2004)	Standpunkt Humusbilanzierung, Methode zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland, Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten, Bonn 2004
Wendland, M. et al (2007)	Leitfaden für die Düngung von Acker- und Grünland, LfL- Information, 8. überarbeitete Auflage, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Freising-Weihenstephan, 2007
Wessolek, G. et al (2004)	Ermittlung von Optimalgehalten an organischer Substanz landwirtschaftlich genutzter Böden nach § 17 (2) Nr. 7 BBodSchG, Projektabschlussbericht, Umweltbundesamt, Dessau, 2004