

**Biologischer Abbau organischer Substanz
bei unterschiedlichem Wassergehalt
in einem Modellversuch**

Master-Arbeit

von

Volker Birth

zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science (M.Sc.)

im Fachbereich **Gartenbau**

Betreuer:

Prof. Dr. habil. Christian Siewert, Prof. Dr. habil. Ankea Janssen

15.04.2019

Erklärung über eigenständige Anfertigung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorgelegte Arbeit mit dem Titel „Biologischer Abbau organischer Substanz bei unterschiedlichem Wassergehalt in einem Modellversuch“ selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie alle wörtlich oder sinngemäß übernommenen Stellen in der Arbeit als solche und durch Angabe der Quelle gekennzeichnet habe. Dies gilt auch für Zeichnungen, Skizzen, bildliche Darstellungen sowie für Quellen aus dem Internet.

Mir ist bewusst, dass die Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden Abschlussarbeiten stichprobenartig mittels Softwareverwendung zur Erkennung von Plagiaten überprüft.

Baal, 15.04.2019



Volker Birth

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	1
2	Hintergrund und Zielstellung	2
3	Material und Methoden.....	3
3.1	Allgemeine Vorgehensweise	3
3.2	Probenmaterial	3
3.3	Inkubationsexperimente.....	4
3.4	Thermogravimetrische Analysen.....	5
3.5	Statistische Auswertung.....	6
4	Ergebnisse	7
4.1	Summarer C-Umsatz	7
4.2	Dynamik des C-Umsatzes.....	8
4.3	Zusammenfassung Inkubationsexperimente	11
5	Diskussion	12
6	Fazit	18
A	Abkürzungsverzeichnis.....	19
B	Tabellenverzeichnis.....	20
C	Abbildungsverzeichnis	20
D	Literaturverzeichnis	21
E	Anhang.....	24

1 Zusammenfassung

In der Landnutzung stellt die Bewertung der Versorgung mit organischer Bodensubstanz (OBS) eine besondere Herausforderung dar. Dabei wird der Einfluss der Bodenfeuchte aufgrund des globalen Klimawandels an Bedeutung gewinnen, da die Wasserverfügbarkeit Einfluss auf die Aktivität der bodenlebenden Mikroorganismen nimmt. Ziel der Arbeit waren daher Aussagen, inwieweit verschiedene Wassergehalte den biologischen Umsatz bei der Inkubation von Bodenproben mit unterschiedlicher Herkunft sowie organischer Düngung beeinflussen. In einem Modellversuch wurden Bodenproben ungedüngter Parzellen von drei deutschen Dauerfeldversuchen in einer zweifaktoriellen Blockanlage in Abhängigkeit von organischer Düngung (Weizenstroh, Stallmist) und Wassergehalt inkubiert. Die Experimente wurden in vier Feuchtigkeitsstufen mit 10, 40, 65 und 90 % der Feldkapazität über einen Zeitraum von 85 Tagen bei einer Temperatur von 25 °C realisiert. Zusätzlich sind vor und nach der Inkubation Thermogravimetrische Bodenanalysen (TGBA) durchgeführt worden.

Die Ergebnisse belegen einen mit dem Wassergehalt steigenden C-Umsatz, da die Aktivität von aeroben Mikroorganismen bis zur Wassersättigung des Bodens zunimmt. Die Steigerung war bei Zugabe von Weizenstroh höher als bei Stallmist, ohne Düngerzusatz signifikant niedriger. Gleichzeitig änderte sich die Dynamik der Abbauprozesse. Durch besonders trockene Verhältnisse wurde die Umsetzung verzögert, zudem sank die Umsatzrate langsamer. Ein dauerhafter Einfluss des Standorts auf den Umsatz der Düngemittel war dagegen nicht nachweisbar. Der biologische Abbau im Inkubationsversuch veränderte darüber hinaus die thermische Zerfallsdynamik. Die größten Veränderungen wurden nach Zugabe von Stroh festgestellt. Nicht geklärt werden konnte, ob in Böden mit höherer Versorgung durch organische Substanz gleiche Ergebnisse erzielt werden können.

2 Hintergrund und Zielstellung

In der Landnutzung stellt die Bewertung der Versorgung mit organischer Bodensubstanz (OBS) eine besondere Herausforderung dar, obwohl ihr eine Schlüsselrolle in Böden und Ökosystemen beigemessen wird. Die OBS bestimmt beispielsweise das Bodenleben, die Bodenstruktur sowie die Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit, dient aber auch als Schadstoffpuffer (RÖBER & SCHACHT 2007; KÖRSCHENS 2009). Dabei sind für die Bewertung der Versorgung Analyseverfahren erforderlich, die die Komplexität der biologischen Prozesse hinsichtlich der Funktionen von OBS und deren Transformation berücksichtigen (SIEWERT 2004; SIEWERT ET AL. 2012). Zur Bestimmung des C-Umsatzes werden unter anderem Inkubationsversuche verwendet, je nach Ziel der Untersuchungen mit variierenden Rahmenbedingungen (KANDELER ET AL. 1993; SIEWERT ET AL. 2012; KUČERÍK ET AL. 2012). Für die Bewertung der OBS werden auch Thermogravimetrische Bodenanalysen (TGBA) empfohlen (SIEWERT 2004; GHABBOUR ET AL. 2014; KUČERÍK & SIEWERT 2014; KUČERÍK ET AL. 2018). Mit diesem Verfahren können in einer erweiterten Glühverlustbestimmung u. a. thermolabile, biologisch umsetzbare sowie thermostabile, humifizierte Bestandteile der OBS neben dem Gehalt an organischem Kohlenstoff und Stickstoff bestimmt werden (SIEWERT 2004).

Im Zuge des globalen Klimawandels verändern sich Wasserverfügbarkeit und Bodenfeuchte. Folglich wandeln sich auch die Abbauprozesse organischer Substanz im Boden und die Möglichkeiten der Landnutzung. DIXON ET AL. (2014) erläutern dies beispielsweise für die gartenbauliche Nutzung. Dabei prognostizieren sie Veränderungen der unmittelbar durch Wasserverfügbarkeit beeinflussten Aktivität von Mikroorganismen mit Konsequenzen für die Bodenfruchtbarkeit. In der vorliegenden Arbeit soll untersucht werden, wie sich durch unterschiedliche Wassergehalte der biologische Umsatz bei der Inkubation von Bodenproben mit verschiedener Herkunft sowie organischer Düngung im Labor verändert. Dabei wird angenommen, dass sich Menge und Qualität der organischen Substanz zwischen einem minimalen, für biologische Aktivität notwendigen und einem maximalen, für die O₂-Versorgung ausreichenden Wassergehalt ändern. Ungünstige Wasserverhältnisse fördern die Anreicherung mit humifizierter Substanz und Biomasse. Bei optimalen Bedingungen dominiert dagegen ein vollständiger Abbau (DAVIDSON ET AL. 1998).

3 Material und Methoden

3.1 Allgemeine Vorgehensweise

Optimale Bedingungen für bodenlebende Mikroorganismen liegen laut Literaturangaben bei einem Wassergehalt von 70 – 80 % der Feldkapazität vor. Bei dieser Bodenfeuchte ist der höchste Abbau organischer Substanz zu erwarten (RÖBER & SCHACHT 2007; SIEWERT ET AL. 2012). Für den durchgeführten Inkubationsversuch wurden abweichende Wassergehalte verwendet, um die Wirkungen unterschiedlicher Feuchtigkeit auf den Umsatz organischer Substanz zu quantifizieren. Zur Modellierung des Umsatzes von organischem Material wurden Weizenstroh und Stallmist mit definierten C- und N-Gehalten als Beispiele für häufig verwendete organische Düngemittel (RÖBER & SCHACHT 2007; KNITTEL ET AL. 2012) in die Bodenproben eingemischt. Um eine effektive Überlagerung der Düngung im Rahmen der Flächenbewirtschaftung und des Modellversuchs zu vermeiden, sind Bodenproben von ungedüngten Parzellen in Dauerfeldversuchen verwendet worden. Als Referenz wurde je eine Variante ohne Zusätze belassen.

3.2 Probenmaterial

Der Modellversuch wurde mit Bodenproben von drei landwirtschaftlichen Dauerfeldversuchen in Deutschland durchgeführt. Deren Bodenarten sind in Tabelle 1 dargestellt. Die aus 0 – 30 cm Tiefe entnommenen Mischproben wurden nach gestörter Lagerung luftgetrocknet und auf 2 mm gesiebt. Anschließend erfolgte die Bestimmung der Feldkapazität bei pF 1,8 mittels keramischer Platten nach DIN ISO 11274 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e.V. 2012).

Tabelle 1: Bodenart und Feldkapazität der Dauerfeldversuchsstandorte, Probenahmetermine

Standort	Bodenart	Termin der Probenahme	Feldkapazität (FK)
Müncheberg	lehmiger Sand	22.10.2015	13 %
Bad Lauchstädt	schluffiger Lehm	20.12.2016	24 %
Großbeeren (Kastenparzelle Löss)	toniger Schluff	20.10.2016	22 %

3.3 Inkubationsexperimente

Die Messung der Bodenatmung erfolgte in einem zweifaktoriellen Blockversuch über 85 Tage bei 25 °C in Abhängigkeit von organischer Düngung und Wassergehalt.

Folgende Düngungsvarianten wurden untersucht: Ohne Zusätze sowie mit Zugabe von Weizenstroh bzw. Stallmist. Die zugegebenen Mengen entsprechen einer C-Zufuhr von 2 kg / m² bei 30 cm Bearbeitungstiefe (Ap-Horizont). Das verwendete Material stammt von der Versuchsstation des UFZ Halle-Leipzig in Bad Lauchstädt und ist in Tabelle 2 näher beschrieben. Jede der Varianten wurde in vier Feuchtigkeitsstufen mit 10, 40, 65 und 90 % der Feldkapazität inkubiert. Der Versuch wurde mit zwei Wiederholungen anhand der in Tabelle 3 aufgeführten Struktur der Varianten durchgeführt.

Tabelle 2: Beschreibung des verwendeten Düngungsmaterials

Düngungsmaterial	C [%]	N [%]	Trockensubstanz in der Frischmasse [%]
Weizenstroh luftgetrocknet und gemahlen auf 0,2 mm	41,7	0,3	86,0
Stallmist luftgetrocknet und gemahlen auf 0,2 mm	32,4	3,4	23,3

Tabelle 3: Erläuterung der Versuchsvarianten mit Abkürzungen

Standort	Düngung	Abkürzung	Wassergehalt [% der FK]			
			10	40	65	90
Müncheberg	ungedüngt	Mü 0				
	Weizenstroh	Mü Stroh	10	40	65	90
	Stallmist (Farmyard manure)	Mü FYM				
Bad Lauchstädt	ungedüngt	BL 0				
	Weizenstroh	BL Stroh	10	40	65	90
	Stallmist (Farmyard manure)	BL FYM				
Großbeeren	ungedüngt	Gb 0				
	Weizenstroh	Gb Stroh	10	40	65	90
	Stallmist (Farmyard manure)	Gb FYM				

Die Inkubationsversuche sind in Anlehnung an KUČERÍK ET AL. (2012) mit einer Anlage des Modells Respicond III von Nordgren Innovations AB (Bygdeå, Schweden) realisiert worden (Funktionsweise siehe NORDGREN 1988). Von den Standorten Bad Lauchstädt und Groß-

beeren wurde je 30 g Boden eingewogen. Für den Standort Müncheberg wurde die Einwaage auf 50 g erhöht, da aufgrund der niedrigeren Feldkapazität eine geringere CO₂-Freisetzung zu erwarten war. Die nachfolgende Düngergabe wurde mittels eines Überkopfschüttlers über 6 Stunden eingemischt, um eine möglichst gleichmäßige Verteilung des Düngers im Boden zu erreichen. Das durch Atmung der Bodenorganismen freigesetzte CO₂ wurde in den ersten vier Wochen jeweils stündlich, danach zweistündlich aufgezeichnet. Nach Abschluss der Versuche erfolgte eine Umrechnung in C-Umsatz pro m² bei 30 cm Bearbeitungstiefe.

3.4 Thermogravimetrische Analysen

Die Thermogravimetrische Bodenanalyse (TGBA) wird als Erweiterung der Glühverlustbestimmung mit modernen Thermowaagen beschrieben (SIEWERT 2004; GHABBOUR ET AL. 2014 und KUČERÍK ET AL. 2018). Mittels dieser erfolgt die Aufzeichnung von Masseverlusten im 4-Sekunden-Intervall bei Erwärmung von 25 auf 1000 °C mit einer Geschwindigkeit von 5 K / min unter einem konstanten Luftstrom (76 % relative Luftfeuchte bei 25 °C) und einer Durchflussmenge von 200 ml / min. Die Auswertung der Daten erfolgt über thermische Masseverluste (TMV) pro 10 K Temperaturerhöhung in spezifischen Temperaturbereichen. Die Gehalte an humifizierten (tonabhängigen) sowie biologisch umsetzbaren Komponenten, organischem Kohlenstoff und Stickstoff können dabei anhand von Indikatorwerten oder Proportionen zwischen Bestandteilen der OBS ermittelt werden (siehe SIEWERT 2004). Zur Vorbereitung der TGBA erfolgte nach abgeschlossener Inkubation die erneute Trocknung der Proben und Siebung auf 2 mm. Die gut durchmischten Bodenproben wurden in einem Exsikkator für mindestens zwei Wochen bei einer Luftfeuchtigkeit von 76 % konditioniert. Jeweils 0,5 – 1,0 g Boden wurde in Aluminiumoxid-Tiegeln zur Analyse in eine SDTGA 851^e-Thermowaage der Firma Mettler-Toledo (Zürich, Schweiz) gegeben. Jede Versuchsvariante ist mit mindestens zwei Wiederholungen analysiert worden.

3.5 Statistische Auswertung

Die Ergebnisse der Inkubationsversuche sowie Thermogravimetrischen Analysen wurden mithilfe darstellender Statistik in Microsoft Excel analysiert. Für die Analyse des C-Umsatzes wurden dreifaktorielle Varianzanalysen in R (Version 3.5.2 for Windows) unter Einbeziehung aller Faktoren und Wechselwirkungen durchgeführt.

4 Ergebnisse

4.1 Summarer C-Umsatz

Auf Grundlage der eingemischten organischen Zusätze sind in allen gedüngten Varianten theoretisch $2 \text{ kg C} / \text{m}^2$ ($20 \text{ t C} / \text{ha}$) bei 30 cm Bearbeitungstiefe enthalten.

Der summarere C-Umsatz zum Ende der Inkubationsexperimente ist in Abb. 1 dargestellt. Für jeden Standort sind jeweils die Mittelwerte der drei Düngungsvarianten abgebildet, aufgeschlüsselt in die vier untersuchten Feuchtigkeitsstufen.

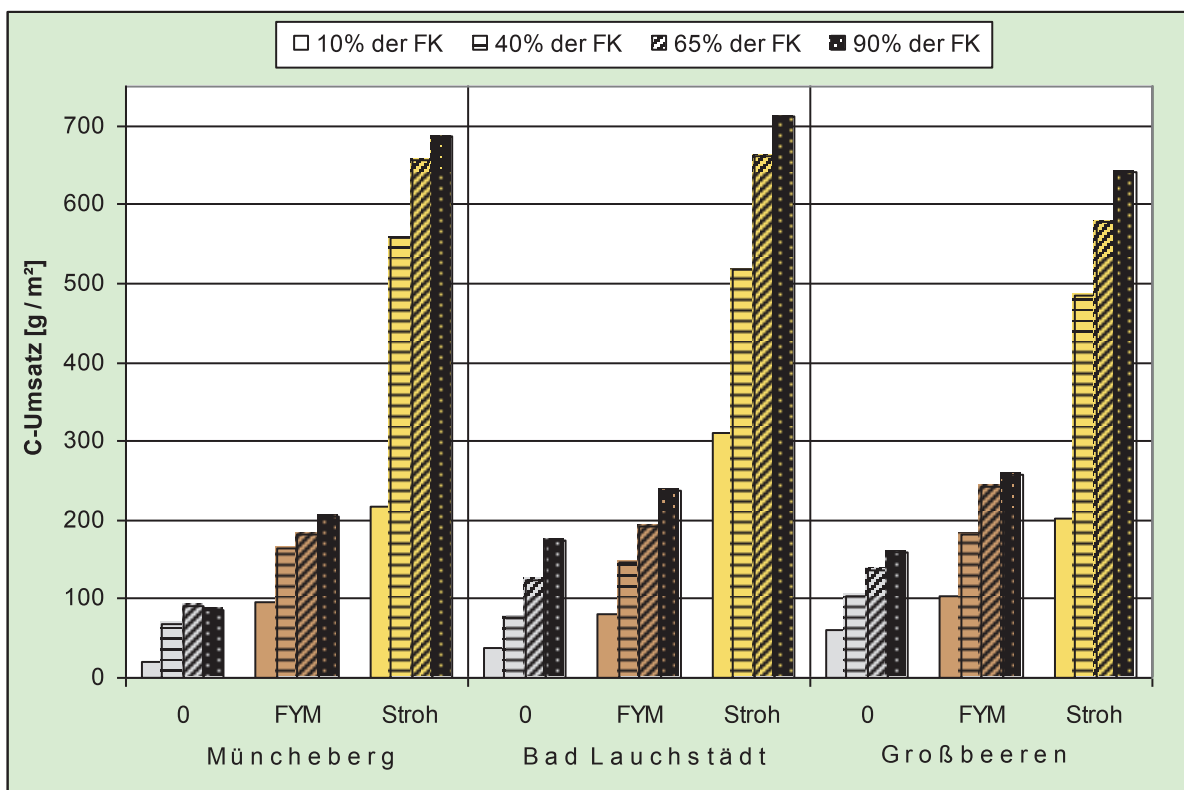


Abb. 1: Summarer C-Umsatz der Varianten im Inkubationsversuch

Anhand der Varianzanalyse des kumulierten C-Umsatzes zum Versuchsende (nach 85 Tagen, Tabelle 4) sind hochgradig signifikante Unterschiede hinsichtlich der Faktoren Wassergehalt und Düngung festzustellen. Ebenso sind die Wechselwirkungen zwischen diesen beiden Faktoren signifikant. Je höher folglich der Wassergehalt in den Proben ist, desto größer ist der verzeichnete C-Umsatz (Abb. 1). Alle Varianten ohne Düngersätze weisen einen geringeren C-Umsatz als mit Stallmistdüngung auf. In den Proben mit Strohdüngung

ist die umgesetzte C-Menge deutlich höher. Sie beträgt bei gleichem Wassergehalt mindestens das Doppelte im Vergleich zu Stallmist (Abb. 1).

Tabelle 4: Kumulierter C-Umsatz zu verschiedenen Zeitpunkten während der Inkubation: Signifikante Faktoren und Wechselwirkungen nach Varianzanalysen

Faktor / Wechselwirkung	5 Tage	20 Tage	35 Tage	85 Tage (Endwerte)
Wassergehalt	***	***	***	***
Standort		**		
Düngung	***	***	***	***
Wassergehalt * Standort	*			
Wassergehalt * Düngung	***	***	***	***
Standort * Düngung	***			*
Wassergehalt * Standort * Düngung				

Überschreitungswahrscheinlichkeit: *** 0,0001; ** 0,001; * 0,01

4.2 Dynamik des C-Umsatzes

In Abb. 2 ist die Entwicklung des kumulierten C-Umsatzes über die Inkubationsdauer im Mittel aller Standorte dargestellt. Als Beispiele sind die Varianten 10 und 65 % der FK abgebildet, unterschieden nach dem zugegebenen Düngungsmaterial. Auf Grundlage der Varianzanalysen ist ein hochgradig signifikanter Einfluss des Wassergehalts und der Düngung auf den C-Umsatz über die gesamte Inkubationsdauer festzustellen (Tabelle 4). In gleichem Maße sind die Wechselwirkungen zwischen Wassergehalt und Düngung signifikant. Zu Beginn der Inkubation (nach 5 Tagen) trifft dies auch auf die Wechselwirkungen zwischen Standort und Düngung zu. Temporär sind geringfügig signifikante Wechselwirkungen zwischen Standort und Düngung sowie Wassergehalt und Standort vorhanden.

Bei einem Wassergehalt von 65 % der FK ist während der ersten 5 Tage ein starker Anstieg des C-Umsatzes bei vorhandener Düngung zu verzeichnen. Der Umsatz in den Varianten mit Stallmist fällt im Vergleich zur Strohdüngung nach 5 Tagen bereits deutlich geringer aus (Abb. 2). Im weiteren Verlauf bleibt der C-Umsatz bei Stroh wesentlich intensiver und hebt sich von den übrigen Düngungsarten stark ab. Für die Varianten mit Stallmist ist ein

deutlich geringerer, aber kontinuierlicher C-Umsatz zu erkennen. Die Varianten ohne Düngerezusatz weisen eine ähnliche Dynamik auf, jedoch in abgeschwächter Form (Abb. 2 und 3).

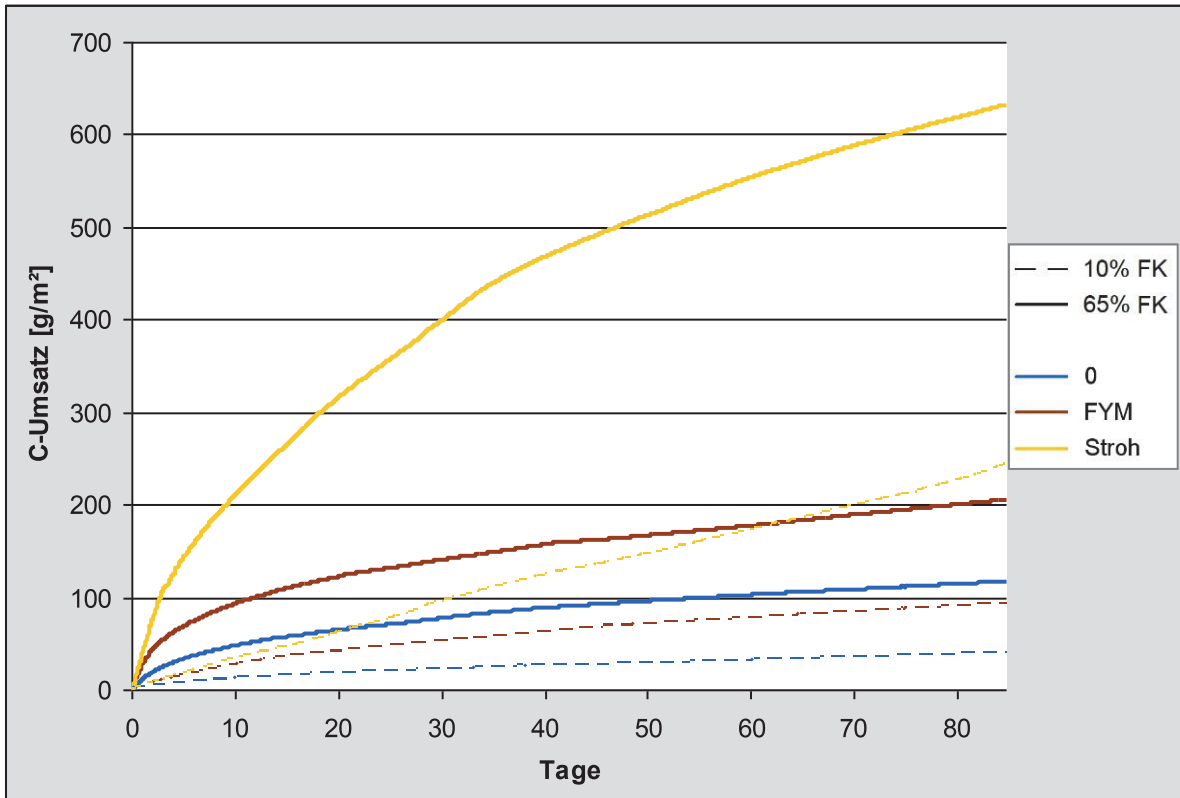


Abb. 2: Dynamik des C-Umsatzes im Inkubationsversuch bei 10 und 65 % der FK, unterschieden nach Düngungsvarianten im Mittel aller Standorte

In Abb. 3 sind die Effekte von Wassergehalt und Düngung zu verschiedenen Zeitpunkten der Inkubation anhand der Mittelwerte des kumulierten C-Umsatzes dargelegt und mit Konfidenzintervallen von 95 % gekennzeichnet. Daraus geht hervor, dass die Umsatzdynamik lediglich in der trockensten Variante von der Feuchtigkeit beeinflusst wird. Ebenso ist in Abb. 2 bei einem Wassergehalt von 10 % der FK eine deutlich geringere Zunahme des C-Umsatzes zu Inkubationsbeginn erkennbar. Nach 5 – 10 Tagen stellt sich in den Varianten mit Stallmist und ohne Zusätze eine mit den höheren Feuchtigkeitsstufen vergleichbare Dynamik ein. Bei Strohdüngung steigt der C-Umsatz jedoch im Gegensatz zu den feuchteren Versuchsvarianten nach 20 Tagen weiterhin an.

Unabhängig von der Düngungsvariante ist der C-Umsatz im gesamten Verlauf der Inkubation höher, je mehr Wasser im Boden enthalten ist. Dabei sind geringfügige Unterschiede zwischen 65 und 90 % der FK erst zum Ende der Inkubationsdauer sichtbar (Abb. 1 und 3). Folglich bestimmt der Wassergehalt die Umsetzung der organischen Düngemittel und biologisch abbaubaren Komponenten der OBS.

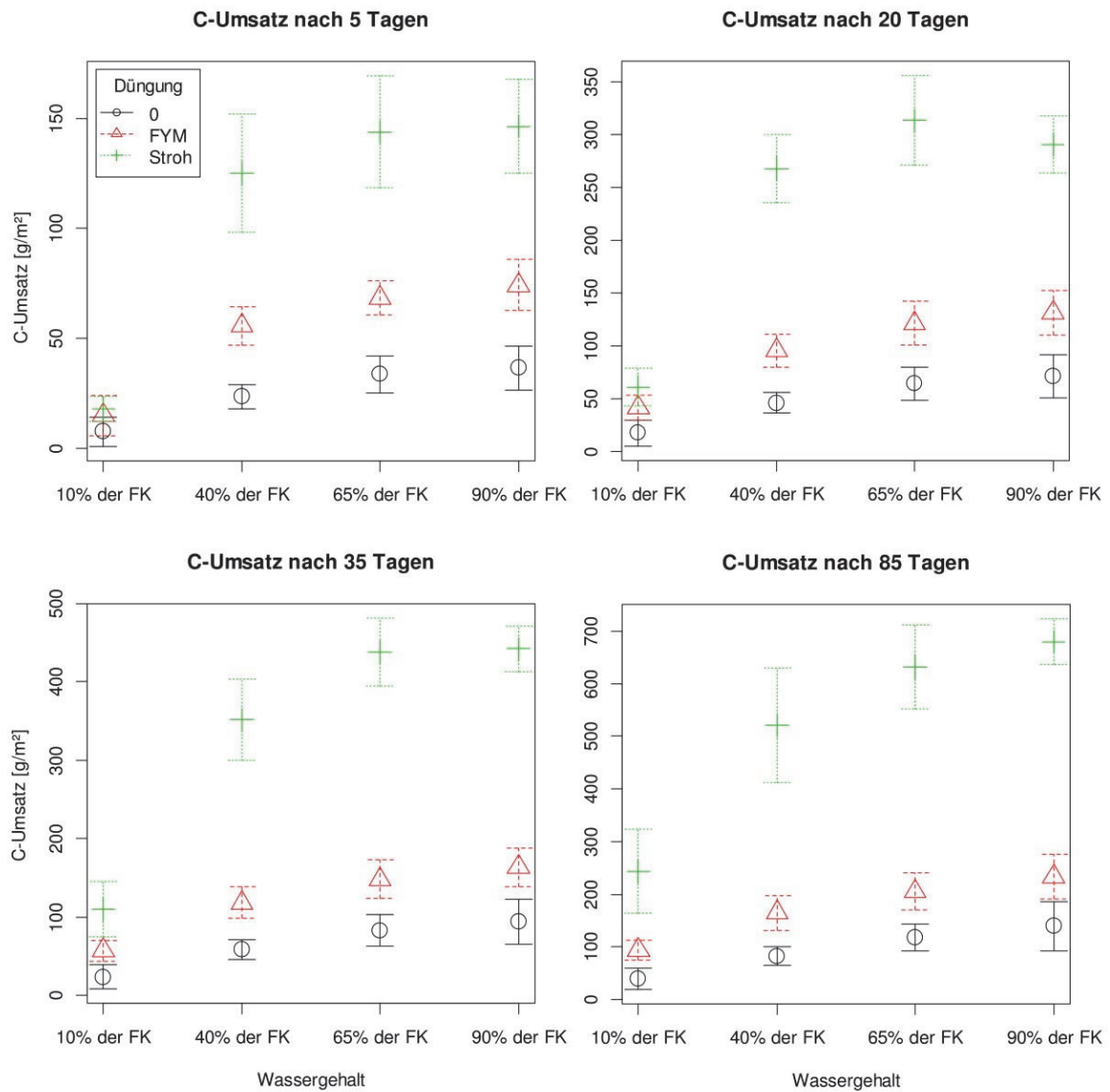


Abb. 3: Kumulierter C-Umsatz zu verschiedenen Zeitpunkten während der Inkubation: Wechselwirkung zwischen Düngung und Wassergehalt, vertikale Balken kennzeichnen Konfidenzintervalle von 95 %

4.3 Zusammenfassung Inkubationsexperimente

Die Ergebnisse der Inkubationsexperimente lassen sich folgendermaßen zusammenfassen: Je höher der Wassergehalt im Boden ist, desto größer fällt der C-Umsatz in der Inkubation aus. Somit bestimmt die Feuchtigkeit den Umsatz der organischen Dünger bzw. der biologisch umsetzbaren Komponenten der OBS. Der höchste C-Umsatz in Abhängigkeit von der Düngungsart wird bei der Zugabe von Stroh hervorgerufen. Unter Verwendung von Stallmist ist ein deutlich geringerer C-Umsatz festzustellen, der aber signifikant höher als ohne Düngerzusätze ist. Hinsichtlich der unterschiedlichen Standorte ist ein temporärer Einfluss auf den Umsatz der Düngemittel nachweisbar.

5 Diskussion

Aus den Ergebnissen der Inkubationsexperimente geht hervor, dass durch eine Erhöhung des Wassergehalts innerhalb der Feldkapazität die Bodenatmung und der damit einhergehende C-Umsatz gefördert wird. Dieser Effekt wurde bereits in den Untersuchungen von DAS ET AL. (2019) und DAVIDSON ET AL. (1998) festgestellt. Zurückzuführen ist dies auf die Lebensbedingungen aerober Mikroorganismen, die mit steigendem Wassergehalt im Boden zunächst günstiger werden. Dadurch erhöht sich die Aktivität der Organismen, die entsprechend mehr organische Substanz abbauen. Der Wassergehalt bestimmt infolgedessen auch die Umsetzung organischer Düngestoffe. Im Falle einer Wassersättigung würde jedoch zu wenig O₂ in den Boden gelangen, sodass die Aktivität der aeroben Organismen gehemmt wird. Gleichzeitig werden anaerobe Umsatzprozesse begünstigt (DAVIDSON ET AL. 1998; DAS ET AL. 2019). Da im durchgeführten Versuch lediglich Wassergehalte im Rahmen der Feldkapazität untersucht wurden, lagen in allen Varianten geeignete Feuchteverhältnisse für aerobe Mikroorganismen vor. Damit konnte die notwendige O₂-Zufuhr für den Abbau organischer Substanz sichergestellt werden (RÖBER & SCHACHT 2007). Allerdings ist der C-Umsatz bei einem Wassergehalt von 10 % der FK im Vergleich zu den feuchteren Varianten deutlich reduziert. Demnach schränken besonders trockene Bodenverhältnisse den Umsatz der organischen Substanz stark ein. Auf dem Feld kann unter diesen Bedingungen möglicherweise keine ausreichende Ernährung von Pflanzenkulturen erreicht werden.

Trotz Düngung gleicher C-Mengen hat die Anreicherung mit Stroh in allen Versuchsvarianten einen deutlich höheren Umsatz zur Folge als eine adäquate C-Zufuhr durch Stallmist. Um diese Unterschiede erklären zu können, muss die Umsetzbarkeit der organischen Düngemittel betrachtet werden. Stallmistdüngung ruft laut Literaturangaben eine hohe Reproduktionsleistung für Dauerhumus hervor, stellt aber auch eine wichtige Nahrungs- und Energiequelle für Bodenleben und Pflanzen dar. Die Mineralisierung des umsetzbaren Anteils von Stallmist dauert mindestens über drei Jahre kontinuierlich an. Gleichzeitig wird bis zu 45 % der Düngergabe durch weitere Transformationsprozesse in dauerhafte Humusformen umgewandelt. Dabei variiert je nach Tierart, Einstreumaterial im Stall und Lagerung die Zusammensetzung des Mistes (AICHER ET AL. 2004; RÖBER & SCHACHT 2007;

KNITTEL ET AL. 2012). Aufgrund der Verrottungs- und Aufschlussprozesse während der Lagerung wird Stallmist generell in stabilere organische Formen umgewandelt und ist damit schwerer umsetzbar (TOKARSKI ET AL. 2018). Weizenstroh weist dagegen eine leichtere Umsetzbarkeit auf (AICHNER ET AL. 2004). Jedoch wird wegen des weiten C/N-Verhältnisses zum Beginn der Abbauprozesse zunächst N gebunden, bevor nach 3 – 4 Wochen Inkubationsdauer eine Mineralisierung erfolgt (HADAS ET AL. 2004). Der Einfluss des Wassergehaltes auf die N-Verfügbarkeit bei Strohdüngung wurde von SCHERER & MENGEL (1983) unter Zugabe von Nitrat in Inkubationsversuchen genauer untersucht. Dabei konnte kurzfristig eine starke N-Immobilisierung bei hoher Bodenfeuchte festgestellt werden. Langfristig wurde analog zu den dargestellten Ergebnissen der Umsatz organischer Substanz durch Strohdüngung und höhere Bodenfeuchte gefördert.

In Tabelle 5 sind die an der C-Zufuhr gemessenen Umsatzraten der Düngungsmaterialien abzüglich des Umsatzes der Referenzvarianten je Standort und Bodenfeuchte aufgeführt. Anhand der Umsatzraten wird der höhere Abbau von Stroh in Relation zum Stallmist bestätigt. Der Einfluss des Wassergehalts auf den Umsatz des Düngers ist für Stroh deutlich erkennbar. Bei Stallmistdüngung sind nur geringfügige Unterschiede sichtbar. Zudem ist für Stallmist keine eindeutige Tendenz zu höheren Umsatzraten mittels Steigerung des Wassergehalts festzustellen. Hinsichtlich des C-Umsatzes einschließlich Nachlieferung aus dem Boden wurde dagegen ein entsprechender Trend mit signifikanten Unterschieden zu den ungedüngten Varianten nachgewiesen (Abb. 3). Somit wurde durch die Stallmistzufuhr offenbar eine Mobilisierung der im Boden vorhandenen Vorräte an OBS ausgelöst.

Tabelle 5: C-Umsatzrate der zugegebenen Düngermengen, unterschieden nach Standort und Wassergehalt

Düngung	Standort	Umsatzrate der zugegebenen C-Menge [%]			
		10 % der FK	40 % der FK	65 % der FK	90 % der FK
Stroh	Müncheberg	10	25	28	30
	Bad Lauchstädt	14	22	27	27
	Großbeeren	7	19	22	24
Stallmist	Müncheberg	4	5	5	6
	Bad Lauchstädt	2	4	3	3
	Großbeeren	2	4	5	5

Wie bereits in Tabelle 4 dargestellt, ist lediglich ein temporär signifikanter Einfluss des Standorts auf den C-Umsatz vorhanden. Unterschiede zwischen den Standorten sind in Abb. 1 und Tabelle 5 zwar sichtbar, jedoch ist kein signifikanter Einfluss auf den Umsatz der Düngemittel nachweisbar. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass für den Modellversuch ausschließlich Bodenproben aus ungedüngten Parzellen landwirtschaftlicher Dauerfeldversuche verwendet wurden. Somit bestehen keine standortbedingten Einflüsse aufgrund eines unterschiedlichen Düngungsmanagements der Parzellen. Des Weiteren wurden die Böden bei der Einmischung von Düngerzusätzen und Wasser vor der Inkubation unabhängig von der Bodenart gut durchlüftet. Damit war in allen Varianten eine ausreichende O₂-Verfügbarkeit für aerobe Mikroorganismen gewährleistet. Unter Feldbedingungen variiert diese in Folge verschiedener Bodenbearbeitung und hervorgerufener Verdichtungen (RÖBER & SCHACHT 2007). Mögliche Unterschiede der Transformation organischer Substanz aufgrund des Bodentyps und der Bodenart (RÖBER & SCHACHT 2007; KUČERÍK ET AL. 2015; STEMMER ET AL. 2000) wurden außerdem durch die Effekte des Wassergehalts und der Düngung überlagert. Diese hatten offensichtlich einen höheren Einfluss auf den C-Umsatz. Aus Sicht der Pflanzenernährung lassen diese Ergebnisse auf eine grundsätzliche Eignung aller untersuchten Standorte für verschiedene Pflanzenkulturen schließen, sofern eine bedarfsgerechte Zufuhr von Nährstoffen durch die organische Düngung sichergestellt werden kann. Dabei ist die Dynamik der Nährstoffaufnahme in Kombination mit dem Abbauverhalten der Düngestoffe zu beachten und für eine gute Durchlüftung des Bodens zu sorgen.

Inwiefern die Ergebnisse unter Verwendung von Bodenmaterial aus hoch gedüngten Parzellen reproduzierbar wären, ist auf Grundlage des durchgeführten Modellversuchs nicht prognostizierbar. Es sind keine Rückschlüsse auf die Humifizierungskoeffizienten der verwendeten organischen Zusätze möglich. Dadurch können keine Aussagen zum Abbau der organischen Substanz im Boden hoch gedüngter Parzellen getroffen werden. Es ist zu empfehlen, dies in weiteren Forschungsarbeiten zu untersuchen.

Unterschiede durch die Anreicherung mit organischen Düngern sowie Inkubation von Bodenproben sind auch anhand Thermogravimetrischer Bodenanalysen (TGBA) identifizierbar. Dies wurde beispielsweise in den Experimenten von SIEWERT ET AL. (2012), KUČERÍK ET AL. (2015) und TOKARSKI ET AL. (2018) festgestellt. In Abb. 4 – 6 sind am Beispiel des Standorts Müncheberg die ermittelten thermischen Masseverluste (TMV) für die jeweiligen Feuchtigkeitsstufen sowie nicht inkubierten Referenzvarianten (0 % FK) dargestellt. Zur Interpretation der Daten sind in Abb. 4 die charakteristischen Temperaturintervalle zur Verflüchtigung von gebundenem Wasser sowie biologisch umsetzbaren und humifizierten Komponenten der organischen Substanz nach SIEWERT (2004) angegeben.

Inkubationsbedingte Unterschiede bezüglich gebundenen Wassers (Höhepunkt der TMV bei 90 – 100° C) werden vor allem in den Varianten ohne Düngerzusätze sichtbar (Abb. 4). Die Masseverluste sind dabei nach der Inkubation höher als zuvor. Offensichtlich wird durch biologische Transformationsprozesse während der Inkubation eine stärkere Wasserbindung hervorgerufen. Nach der Zufuhr von Stallmist und Weizenstroh (Abb. 5 und 6) sind die TMV in diesem Intervall ebenfalls größer, da sich durch Einbringung von frischem organischen Material auch der Gehalt an gebundenem Wasser erhöht (KUČERÍK ET AL. 2015; TOKARSKI ET AL. 2018). Die Einmischung der organischen Düngemittel ist darüber hinaus in den charakteristischen TMV für biologisch umsetzbare (Maximum bei 280 – 300 °C) sowie humifizierte Komponenten (um 500° C) erkennbar. Bei Strohdüngung werden vergleichsweise hohe TMV im Bereich der umsetzbaren Bestandteile sichtbar, jedoch geringfügige Unterschiede hinsichtlich humifizierter organischer Substanz. Durch die Einbringung von Stallmist werden die TMV in beiden Intervallen erhöht. Zudem wird ein weiterer Peak zwischen 390 und 440° C sichtbar, der auf eine Erhöhung des N-Gehalts mittels Düngung hinweist (SIEWERT 2004; KUČERÍK ET AL. 2015; TOKARSKI ET AL. 2018).

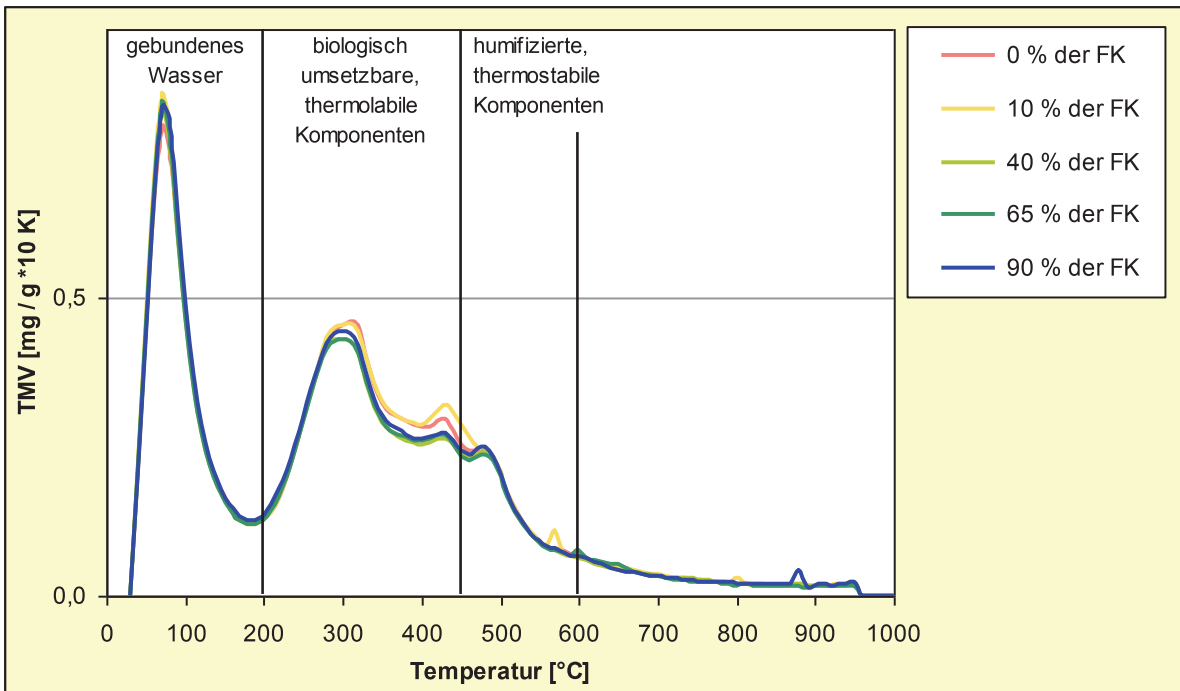


Abb. 4: Unterschiede in der thermischen Zerfallsdynamik nach Inkubation mit unterschiedlichem Wassergehalt – Bodenprobe Müncheberg **ohne Zusätze**

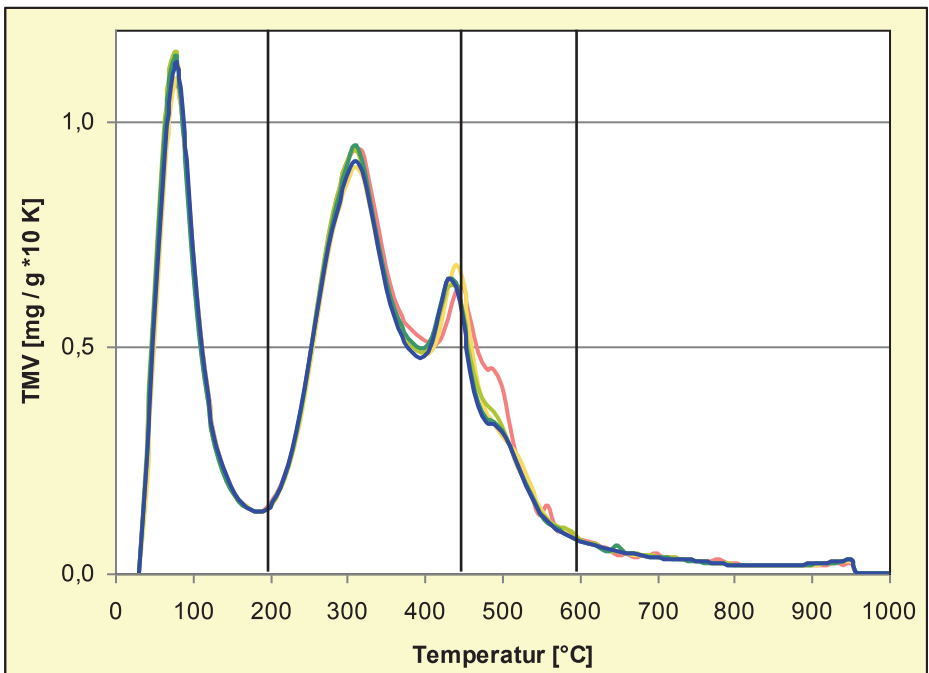


Abb. 5: Unterschiede in der thermischen Zerfallsdynamik nach Inkubation mit unterschiedlichem Wassergehalt – Bodenprobe Müncheberg **mit Stallmist**

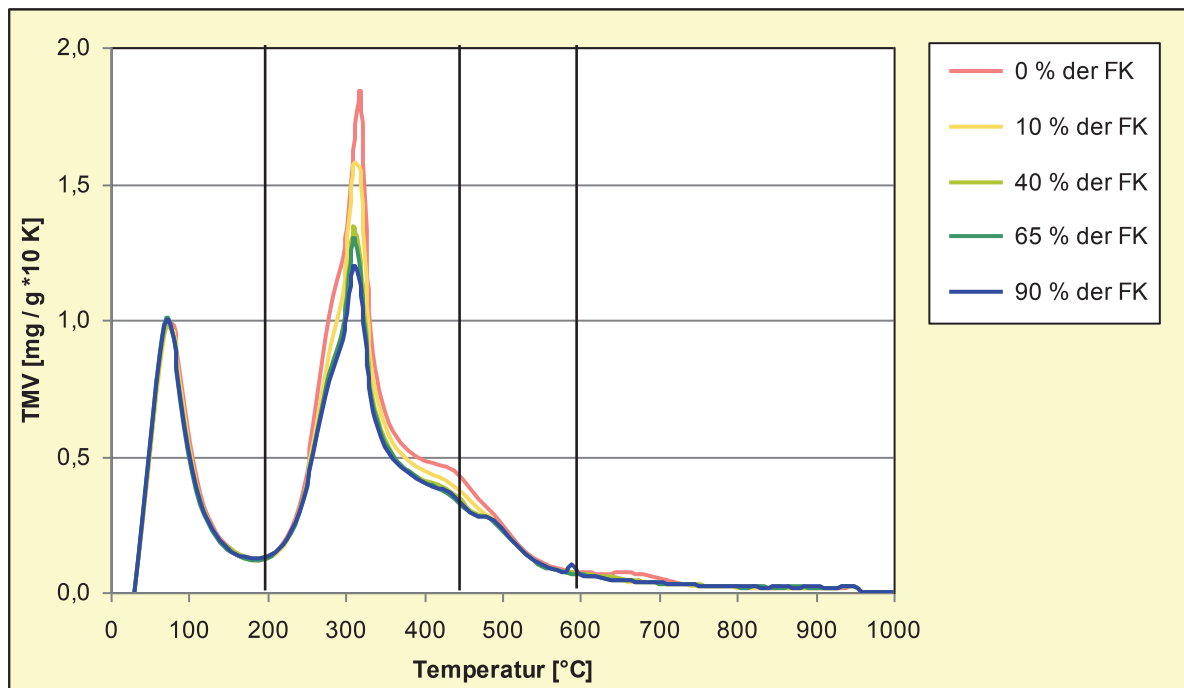


Abb. 6: Unterschiede in der thermischen Zerfallsdynamik nach Inkubation mit unterschiedlichem Wassergehalt – Bodenprobe Müncheberg mit Weizenstroh

Der inkubationsbedingte Abbau umsetzbarer Komponenten in Abhängigkeit vom Wassergehalt ist in erster Linie bei Strohdüngung erkennbar. Damit werden die Ergebnisse hinsichtlich des kumulierten C-Umsatzes bestätigt. So sind die TMV zwischen 200 und 450° C umso geringer, je höher die Bodenfeuchte in der Inkubation war. Teilweise ist dies auch hinsichtlich der Varianten ohne Zusätze und mit Stallmist festzustellen (Abb. 4 und 5). Dies gilt jedoch lediglich für den dargestellten Standort Müncheberg. Für die tonreicheren Standorte Bad Lauchstädt und Großbeeren (Kastenparzelle Löss) konnten in diesen Varianten keine analogen Unterschiede in der thermischen Verfallsdynamik nachgewiesen werden.

6 Fazit

Je höher der Wassergehalt ist, desto größer ist der Abbau organischer Substanz während der Inkubation. Da bis zur Wassersättigung des Bodens die Lebensbedingungen für aerobe Mikroorganismen günstiger werden, steigt mit deren Aktivität der C-Umsatz. Die Feuchtigkeit bestimmt damit die Umsetzung der organischen Dünger und der OBS. Durch besonders trockene Verhältnisse wird jedoch die Dynamik der Abbauprozesse stark abgeschwächt und verzögert. Der höchste Umsatz ist nach Zugabe von Weizenstroh zu verzeichnen. Unter Stallmistzufuhr fällt der Umsatz aufgrund stabilerer organischer Verbindungen deutlich geringer aus, ist aber signifikant höher als ohne Düngerzusatz. Im Gegensatz dazu sind Standorteffekte lediglich temporär nachweisbar. Unterschiede durch Bodenart und -typ werden dabei vom Einfluss des Wassergehalts sowie der Düngung überlagert. Im Zuge thermogravimetrischer Analysen sind Zufuhr sowie teilweise Umsetzung der organischen Dünger nachweisbar, insbesondere bei Weizenstroh.

Nicht geklärt ist, ob in Böden mit höherer Versorgung durch organische Substanz gleiche Ergebnisse erzielt werden können. Es wird empfohlen, dies in weiteren Forschungsarbeiten unter Verwendung von entsprechendem Probenmaterial zu untersuchen.

A Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius
C	Kohlenstoff
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
cm	Zentimeter
FK	Feldkapazität
FYM	Stallmist (Farmyard manure)
g	Gramm
ha	Hektar
K	Kelvin
kg	Kilogramm
m ²	Quadratmeter
mg	Milligramm
min	Minute
ml	Milliliter
mm	Millimeter
N	Stickstoff
OBS	organische Bodensubstanz
pF	dekadischer Logarithmus des Betrags der Bodenwasserspannung
TGBA	Thermogravimetrische Bodenanalyse(n)
TMV	Thermische Masseverluste
u. a.	unter anderem
UFZ	Umweltforschungszentrum

B Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bodenart und Feldkapazität der Dauerfeldversuchsstandorte, Probenahmetermine	3
Tabelle 2: Beschreibung des verwendeten Düngungsmaterials	4
Tabelle 3: Erläuterung der Versuchsvarianten mit Abkürzungen	4
Tabelle 4: Kumulierter C-Umsatz zu verschiedenen Zeitpunkten während der Inkubation: Signifikante Faktoren und Wechselwirkungen nach Varianzanalysen.....	8
Tabelle 5: C-Umsatzrate der zugegebenen Düngermengen, unterschieden nach Standort und Wassergehalt	13

C Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Summarer C-Umsatz der Varianten im Inkubationsversuch	7
Abb. 2: Dynamik des C-Umsatzes im Inkubationsversuch bei 10 und 65 % der FK, unterschieden nach Düngungsvarianten im Mittel aller Standorte.....	9
Abb. 3: Kumulierter C-Umsatz zu verschiedenen Zeitpunkten während der Inkubation: Wechselwirkung zwischen Düngung und Wassergehalt, vertikale Balken kennzeichnen Konfidenzintervalle von 95 %	10
Abb. 4: Unterschiede in der thermischen Zerfallsdynamik nach Inkubation mit unterschiedlichem Wassergehalt – Bodenprobe Müncheberg ohne Zusätze	16
Abb. 5: Unterschiede in der thermischen Zerfallsdynamik nach Inkubation mit unterschiedlichem Wassergehalt – Bodenprobe Müncheberg mit Stallmist	16
Abb. 6: Unterschiede in der thermischen Zerfallsdynamik nach Inkubation mit unterschiedlichem Wassergehalt – Bodenprobe Müncheberg mit Weizenstroh	17

D Literaturverzeichnis

- AICHNER, M.; DRAHORAD, W.; LARDSCHNEIDER, E.; MATINGER, H.; MATTEAZZI, A.;
MENKE, F.; RAIFER, B.; RASS, W.; STIMPF, E.; THALHEIMER, M.; ZÖSCHG, M. (2004):
Boden und Pflanzenernährung im Obstbau, Weinbau und Bioanbau. Land- und
Forstwirtschaftliches Versuchszentrum Laimburg; Südtiroler Beratungsring für
Obst- und Weinbau, Laimburg.
- DAVIDSON, E. A.; BELK, E.; BOONE, R. D. (1998): **Soil water content and temperature as
independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate
mixed hardwood forest.** *Global Change Biology*, Vol. 4 (1998), pp. 217-227. Black-
well Science Ltd.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e.V. (Hrsg., 2012): **DIN ISO 11274.** Bodenbeschaffen-
heit - Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens - Laborverfahren. Beuth Verlag,
Berlin.
- DAS, S.; RICHARDS, B. K.; HANLEY, K. L.; KROUNBI, L.; WALTER, M. F.; WALTER, M. T.;
STEENHUIS, T. S.; LEHMANN, J. (2019): **Lower mineralizability of soil carbon with
higher legacy soil moisture.** *Soil Biology and Biochemistry*, Vol. 130 (March 2019),
pp. 94-104. DOI: 10.1016/j.soilbio.2018.12.006.
- DIXON, G. R.; COLLIER, R. H.; BHATTACHARYA, I. (2014): **An assessment of the effects of
climate change on horticulture.** *Horticulture: Plants for People und Places*, Volume
2, pp. 817-857. DOI: 10.1007/978-94-017-8581-5_10. Springer Science+Business Medi-
a, Dordrecht.
- GHABBOUR, E. A.; DAVIES, G.; CUOZZO, N. P.; MILLER, R. O. (2014): **Optimized conditions
for determination of total soil organic matter in diverse samples by mass loss on
ignition.** *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, Vol. 177, No. 6, pp. 914-919.
Wiley-VCH Verlag, Weinheim.

- HADAS, A.; KAUTSKY, L.; GOEK, M.; KARA, E. E. (2004): **Rates of decomposition of plant residues and available nitrogen in soil, related to residue composition through simulation of carbon and nitrogen turnover.** *Soil Biology & Biochemistry*, Vol. 36 (2004), pp. 255–266. DOI: 10.1016/j.soilbio.2003.09.012.
- KANDELER, E.; SCHINNER, F.; ÖHLINGER, R.; MARGESIN, R. (Hrsg., 1993): **Bodenbiologische Arbeitsmethoden.** Zweite Auflage. Springer Verlag, Berlin und Heidelberg.
- KNITTEL, H.; ALBERT, E.; EBERTSEDER, T. (2012): **Praxishandbuch Dünger und Düngung.** AgriMedia-Verlag, Clenze.
- KÖRSCHENS, M. (2009): **Soil organic carbon (C_{org}) – importance, determination, evaluation.** *Archives of Agronomy and Soil Science*, Vol. 56, No. 4c, pp. 375–392.
- KUČERÍK, J.; ČTVRTNÍČKOVÁ, A.; SIEWERT, C. (2012): **Practical application of thermogravimetry in soil science. Part 1: Thermal and biological stability of soils from contrasting regions.** *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 113, No. 3, pp. 1103–1111. DOI: 10.1007/s10973-012-2849-6.
- KUCERIK, J.; SIEWERT, C. (2014): **Practical application of thermogravimetry in soil science. Part 2: modeling and prediction of soil respiration using thermal mass losses.** *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 116, pp. 563–570. DOI: 10.1007/s10973-013-3609-y.
- KUČERÍK, J.; SIEWERT, C.; DEMYAN, M. S. (2015): **Practical application of thermogravimetry in soil science. Part 4: Relationship between clay, organic carbon and organic matter contents.** *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 122, pp. 2441–2450. DOI: 10.1007/s10973-015-5141-8.
- KUČERÍK, J.; TOKARSKI, D.; DEMYAN, M. S.; MERBACH, I.; SIEWERT, C. (2018): **Linking soil organic matter thermal stability with contents of clay, bound water, organic carbon and nitrogen.** *Geoderma*, Vol. 316, pp. 38–46. DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.12.001.

- NORDGREN, A. (1988): **Apparatus for the continuous, long-term monitoring of soil respiration rate in large numbers of samples.** Soil Biology & Biochemistry, Vol. 20, No. 6, pp. 955-957. Pergamon Press, Oxford.
- RÖBER, R.; SCHACHT, H. (2007): **Pflanzenernährung im Gartenbau.** Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- SCHERER, H. W.; MENGEL, K. (1983): **Umsatz von ¹⁵N markiertem Nitratstickstoff im Boden in Abhängigkeit von Strohdüngung und Bodenfeuchte.** Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Ausgabe 146, S. 109–117.
- SIEWERT, C. (2004): **Rapid Screening of Soil Properties using Thermogravimetry.** Soil Science Society of America Journal, Vol. 68, September-October 2004, pp. 1656–1661.
- SIEWERT, C.; DEMYAN, M. S.; KUČERÍK, J. (2012): **Interrelations between soil respiration and its thermal stability.** Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 110, pp. 413–419. DOI: 10.1007/s10973-011-2099-z.
- STEMMER, M.; ROTH, K.; KANDELER, E. (2000): **Carbon mineralization and microbial activity in a field site trial used for ¹⁴C turnover experiments over a period of 30 years.** Biology and Fertility of Soils, Vol. 31, pp. 294–302. DOI: 10.1007/s003740050659
- TOKARSKI, D.; KUČERÍK, J.; KALBITZ, K.; DEMYAN, M. S.; MERBACH, I.; BARKUSKY, D.; RÜHLMANN, J.; SIEWERT, C. (2018): **Contribution of organic amendments to soil organic matter detected by thermogravimetry.** Journal of Plant Nutrition and Soil Science, Vol. 181, pp. 664-674. DOI: 10.1002/jpln.201700537.

E Anhang

Siehe beiliegende CD:

- Auswertungen aller Laboruntersuchungen
- Ergebnisse der statistischen Auswertungen
- Datenleser für Thermogravimetrische Bodenanalysen (TGBA DataReader)
- Primärdaten der Inkubationsversuche
- Primärdaten der Thermogravimetrischen Bodenanalysen