

Universität für Bodenkultur
Department für Wasser, Atmosphäre und Umwelt
Institut für Abfallwirtschaft



Verwertung von Gemüseabfällen- Vergleich der Kompostierung mit der mikrobiellen Carbonisierung

Masterarbeit
Zur Erlangung des akademischen Grades
Diplomingenieur

eingereicht von
Mathias Egger
Stud Kennz.: H 066 427/ Matr. Nr.: 01141373

Wien, 09.01.2019

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die Arbeit selbstständig angefertigt habe. Es wurden keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Formulierungen und Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Diese schriftliche Arbeit wurde noch an keiner Stelle vorgelegt.

A handwritten signature in black ink, reading "Mathias Egger". The signature is written in a cursive style and is positioned above a horizontal line.

Mathias Egger

Kurzfassung

Die Verwertung von organischen Abfällen gilt als große Herausforderung in modernen Abfallwirtschaftssystemen. Die exotherme, aerobe Kompostierung zählt dabei seit Jahren als etablierte Vorgehensweise, um ein stabiles, humusreiches Substrat zu erzeugen. Auch der mikrobiellen Carbonisierung nach Witte wird die Erzeugung (unter anoxischen Zuständen) eines kohlenstoff- und humusreichen Substrats nachgesagt. Das Ziel der Arbeit war es diese beiden Verfahren zu vergleichen und herauszufinden, welches Verfahren besser geeignet ist, um ein Substrat zur Nutzung auf landwirtschaftlichen Flächen zu erzeugen. Der Vorteil der Nutzung von Komposten/stabiler organischer Masse in der Landwirtschaft ist vielseitig, vor allem das Potential der Bereitstellung organisch gebundener Nährstoffe, die über weitere Mineralisationsprozesse im Boden langfristig pflanzenverfügbar gemacht werden können, ist zu erwähnen.

Das Monitoring beider Verfahren erfolgte hauptsächlich durch Porenluft- und Temperaturmessungen, sowie durch Untersuchungen von Feststoffproben im Labor. Nachweislich anaerobe Verhältnisse, geringere Huminsäuregehalte und eine höhere Atmungsaktivität am Ende des Versuchs (17 Wochen) sprechen zusammen mit anderen Untersuchungsparametern gegen die Eignung der mikrobiellen Carbonisierung zur Erzeugung eines stabilen Kompostsubstrats. Ein weiteres Ziel der Arbeit war es die Mitkompostierung höherer Mengen an Zwiebeln und deren Einfluss auf den Rotteprozess und die Kompostqualität zu untersuchen. Negative Auswirkungen der Zwiebelzumischungen auf die mikrobielle Aktivität und die Qualität konnten nicht festgestellt werden.

Abstract

The recovery of organic matter is considered to be a great challenge in modern waste management systems. The exothermic, aerobic composting process has counted for years as an established approach to produce a stable, humus-rich substrate. Also the microbial carbonization according to Witte is said to produce (under anoxic conditions) a carbon- and humus-rich substrate. The aim of the thesis was to compare these two methods and to find out which approach is better suited to produce a substrate for agricultural usage. The advantages of using composts/stable organic matter on agricultural fields are versatile. Especially the potential of the supply of organically bound nutrients, which are made available for plants in the long term by further mineralization processes in soils, is worth mentioning.

Both methods were monitored by pore air and temperature measurements and by examinations of solid samples in the laboratory. Clearly anaerobic conditions, lower humic acid contents, higher respiration rates and other substrate parameters at the end of the test (17 weeks) argue against the effective application of the microbial carbonization to produce a stable substrate. Another aim of the thesis was to determine impacts of a higher mass of added onions on the rotting process and the quality of the compost. Negative effects on the microbial process and compost quality could not be determined.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1 Das Projekt	1
1.2 Forschungsfragen	2
2. Stand des Wissens.....	2
2.1 Der Metabolismus	3
2.1.1 Energetische Betrachtung	3
2.1.2 Der Abbauprozess	4
2.1.3 Anaerober Stoffwechsel	5
2.1.4 Abbau von organischem Material	6
2.2 Mikrobiologie in der Kompostierung.....	7
2.2.1 Bakterien.....	7
2.2.2 Aktinomycceten	7
2.2.3 Pilze	8
2.3 Faktoren, Kenngrößen und Prozessparameter bei der Kompostierung	8
2.3.1 Gasaustausch.....	8
2.3.2 Wassergehalt.....	9
2.3.3 Rottetemperatur.....	10
2.3.4 pH-Wert	11
2.3.5 C/N – Verhältnis und Stickstoffumsatz	11
2.3.5.1 Ammonifikation und das Ammonium-Ammoniak Gleichgewicht	11
2.3.5.2 Nitrifikation und Denitrifikation	12
2.3.5.3 Immobilisierung.....	12
2.4 Huminstoffe	13
2.4.1 Unterteilung der Huminstoffe	13
2.4.2 Besonderheiten des Humus im Boden	14
2.4.3 Bildung von Humusverbindungen.....	14
2.5 Rechtliche Situation in Österreich	15
2.5.1 Kompostverordnung	15
2.5.2 Anforderungen und Qualitätsklassen des Komposts nach Kompostverordnung	15
2.5.3 Rechtliche Anforderungen bei der Anwendung von Kompost in der Landwirtschaft	16
2.5.4 Normen und Richtlinien	18
2.5.4.1 Kompost Anwendungsrichtlinie.....	18
2.5.4.2 ÖNORM S 2200 (2000): Gütekriterien für Komposte aus biogenen Abfällen	19
2.5.4.3 ÖNORM S 2202 (2014): Anwendungsrichtlinien für Kompost.....	20
2.5.4.4 ÖNORM S 2023 (1993): Untersuchungsmethoden und Güteüberwachung von Komposten	20
2.6 Die mikrobielle Carbonisierung	20
2.6.1 Ausgangsmaterialien einer MC-Miete	21
2.6.2 Das Aufsetzen einer MC-Miete.....	21
2.6.3 Abläufe einer MC-Miete	21
2.6.3.1 Chemoautotrophe Ernährungsweise	22
2.6.4 Eigenschaften und Verwendung eines MC-Komposts.....	23
2.6.5 Ökologischer Mehrwert eines MC-Komposts	23
3. Versuchsdurchführung und Analysemethoden	24
3.1 Ausgangsmaterialien.....	24
3.2 Versuchsaufbau	25
3.3 Vorgehensweise beim Aufsetzen.....	26
3.4 Probenahme	28
3.5 Laufende Untersuchungen vor Ort.....	31

3.5.1	Methanemissionsmessung mittels FID.....	31
3.6	Probenaufbereitung.....	31
3.7	Untersuchungsparameter.....	32
3.7.1	Wassergehalt.....	32
3.7.2	Ammoniumstickstoff.....	32
3.7.3	Nitratstickstoff.....	33
3.7.4	pH-Wert.....	33
3.7.5	Leitfähigkeit.....	34
3.7.6	Glühverlust.....	34
3.7.7	Gesamtkohlenstoff und -stickstoff.....	34
3.7.8	Huminsäuren.....	35
3.7.9	FTIR-Analyse.....	35
3.7.10	Atmungsaktivität.....	36
3.7.11	Niedere Carbonsäuren.....	36
3.7.12	Zusätzliche Untersuchungsparameter der Endproben.....	37
3.7.12.1	Phosphor-Gesamt (P_{GES}).....	37
3.7.12.2	Phosphor verfügbar (P_{CAL}).....	37
3.7.12.3	Gesamtnährstoffgehalte an Kalium (K), Magnesium (Mg) und Kalzium (Ca).....	37
3.7.12.4	Verfügbares Kalium (K_{CAL}).....	38
3.7.12.5	Wasserkapazität.....	38
3.7.12.6	Feuchtdichte.....	38
3.7.12.7	Kressetest.....	38
4.	Ergebnisse und Interpretation.....	39
4.1	Kubatur und Veränderung.....	39
4.2	Rottetemperaturen.....	40
4.3	Porenluftmessungen.....	43
4.3.1	FID Messungen.....	46
4.4	Zwiebelabbau und Endprobenahme.....	47
4.5	Laborergebnisse.....	51
4.5.1	Wassergehalt.....	51
4.5.2	pH-Wert.....	52
4.5.3	Leitfähigkeit.....	52
4.5.4	Ammonium- und Nitratstickstoff.....	54
4.5.5	Carbonsäuren.....	56
4.5.6	Organische Substanz (Glühverlust).....	58
4.5.7	Kohlenstoff- Stickstoffanalyse.....	59
4.5.8	Atmungsaktivität.....	60
4.5.9	Huminsäuren (HS).....	61
4.5.10	FTIR-Analysen.....	65
4.5.11	Endprobenanalysen.....	66
4.5.11.1	Wasserkapazität.....	66
4.5.11.2	Feuchtdichte.....	67
4.5.11.3	Überkorn.....	67
4.5.11.4	Nährstoffe.....	68
4.5.11.5	Kressetest.....	69
5.	Schlussfolgerung.....	70
6.	Literaturverzeichnis.....	72
7.	Anhang.....	74

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Überblick des aeroben Abbaus (nach Binner., 2002)	5
Abb. 2: Schematische Darstellung der beiden Vergleichsmieten mit den Abschnitten A, B, C und D	25
Abb. 3: Unterteilung des Abschnitts A der MC-Miete für die Entnahme der beiden Einzelproben während des Versuchsverlaufs	30
Abb. 4: Temperaturverlauf (MW) der Abschnitte A bis D der KK-Miete vor dem Umsetzungsvorgang	41
Abb. 5: Temperaturverlauf (MW) der Abschnitte A bis D der MC-Miete	42
Abb. 6: Temperaturverlauf (MW) der Abschnitte A bis D der KK-Miete 1 Stunde nach dem Umsetzungsvorgang	42
Abb. 7: Kohlenstoffdioxidkonzentrationen (MW) der Abschnitte A bis D der KK-Miete vor jedem Umsetzungsvorgang	43
Abb. 8: Methankonzentrationen (MW) der Abschnitte A bis D der KK-Miete	44
Abb. 9: Kohlenstoffdioxidkonzentrationen (MW) der Abschnitte A bis D der KK-Miete 1 Stunde nach dem Umsetzungsvorgang	44
Abb. 10: Kohlenstoffdioxidkonzentrationen (MW) der Abschnitte A bis D der MC-Miete	45
Abb. 11: Methankonzentrationen (MW) der Abschnitte A bis D der MC-Miete	46
Abb. 12: FID Messergebnisse der Abschnitte A bis D der KK-Miete	46
Abb. 13: FID Messergebnisse (ppm) der Abschnitte A bis D der MC-Miete	47
Abb. 14: pH-Wert-Verlauf (MW) der Abschnitte A beider Mieten	52
Abb. 15: Verlauf der Leitfähigkeit (MW) der Abschnitte A beider Mieten	53
Abb. 16: Ammoniumstickstoffverlauf (Einzelproben) der Abschnitte A beider Mieten	54
Abb. 17: Nitratstickstoffverlauf (Einzelproben) der Abschnitte A beider Mieten	54
Abb. 18: Ammoniumstickstoffgehalte der Endproben der Abschnitte A bis D beider Mieten	55
Abb. 19: Nitratstickstoffgehalte der Endproben der Abschnitte A bis D beider Mieten	56
Abb. 20: Verlauf des Glühverlustes (MW der Glühverluste) der Abschnitte A beider Mieten	58
Abb. 21: Atmungsaktivitätsverlauf der Abschnitte A beider Mieten	60
Abb. 22: Atmungsaktivität der Endproben der Abschnitte A bis D beider Mieten	61
Abb. 23: Huminsäurebestimmung - Vergleich der optischen Dichten der nasschemischen Analysen mit den Werten des Vorhersagemodells (% oTM) nach FTIR-Messung der Einzelproben des Abschnitts A der KK-Miete	62
Abb. 24: Huminsäurebestimmung - Vergleich der optischen Dichten der nasschemischen Analysen mit den Werten des Vorhersagemodells (% oTM) nach FTIR-Messung der Endproben der Abschnitte A bis D der KK-Miete	63
Abb. 25: Huminsäurenbestimmung - Vergleich der optischen Dichten der nasschemischen Analysen mit den Werten des Vorhersagemodells (% oTM) nach FTIR-Messung der Einzelproben des Abschnitts A der MC-Miete	63
Abb. 26: Huminsäurenbestimmung - Vergleich der optischen Dichten der nasschemischen Analysen mit den Werten des Vorhersagemodells (% oTM) nach FTIR-Messung der Endproben der Abschnitte A bis D der MC-Miete	64
Abb. 27: Verlauf der Infrarotspektren der MC-Miete	65
Abb. 28: Verlauf der Infrarotspektren der KK-Miete	65

Bilderverzeichnis

Bild 1: Karotten	24
Bild 2: Stallmist	24
Bild 3: Grün- und Strauchschnitt geschreddert	24
Bild 4: Zwiebel	24
Bild 5: Aufsetzen des Pferdemists auf den Grünschnitt	26
Bild 6: Hinzufügen der Karotten	26
Bild 7: Hinzufügen der Zwiebeln.....	27
Bild 8: Homogenisierung des Ausgangssubstrats durch Mischung mit dem Umsetzgerät.....	27
Bild 9: Bewässerung der Mieten mittels Güllefass	27
Bild 10: Aufschütten des Vorrotte-MC-Materials zu ca. 2 m hohen Trapezmiete	28
Bild 11: Verdichten der MC-Miete mittels Radlader	28
Bild 12: Entnahme der Einzelprobe aus der MC-Miete mittels Erdbohrer	30
Bild 13: Mietenporenluft- und Temperaturmessung mithilfe von Messlanzen	31
Bild 14: Nicht durchmisches Material am Mietenfuß	40
Bild 15: Zwiebelreste in Woche 13 in Abschnitt B und C	48
Bild 16: Zwiebelreste im Abschnitt D der KK-Miete	48
Bild 17: Öffnen der MC-Miete	49
Bild 18: Mietenabschnitt A der MC-Miete	49
Bild 19: Unzersetzte Organik innerhalb der MC-Miete	49
Bild 20: Reste an Zwiebeln in der MC-Miete	50
Bild 21: Reste an Zwiebeln in der MC-Miete	50
Bild 22: Reste an Zwiebeln in der MC-Miete (mit Markierungen)	50
Bild 23: Unkrautbewuchs der MC-Miete bei Versuchsende.....	50
Bild 24: Material größer 11,2 mm aus der MC-Miete	68

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Aufwandsmengen von Kompost nach Anwendungsbereich und Qualitätsklassen (nach Amlinger, 2006)	16
Tab. 2: Spannweite der Nährstoffgehalte von Komposten (nach AGES, 2010)	18
Tab. 3: Mischverhältnisse der Abschnitte A bis D	25
Tab. 4: Zusammenfassung des Versuchsverlaufs vor Ort.....	28
Tab. 5: Analysenergebnisse der untersuchten Ausgangsmaterialproben der Abschnitte A beider Mieten.....	39
Tab. 6: WG-Analysen (MW) über den Verlauf der Abschnitte A und der Endproben B bis D beider Mieten.....	51
Tab. 7: pH-Werte (MW) der Endproben der Abschnitte A bis D beider Mieten	52
Tab. 8: Leitfähigkeitswerte (MW) der Endproben der Abschnitte A bis D beider Mieten	53
Tab. 9: Carbonsäurewerte der Einzelproben der KK-Miete	57

Tab. 10: Carbonsäurenwerte der Einzelproben der MC-Miete	57
Tab. 11: Glühverluste (MW) der Endproben der Abschnitte A bis D beider Mieten	58
Tab. 12: Kohlenstoff- und Stickstoffverlauf (MW) des Abschnitts A der KK-Miete	59
Tab. 13: Kohlenstoff- und Stickstoffwerte (MW) der Abschnitte A bis D der KK-Miete.....	59
Tab. 14: Kohlenstoff- und Stickstoffverlauf (MW) des Abschnitts A der MC-Miete.....	59
Tab. 15: Kohlenstoff- und Stickstoffwerte (MW) der Abschnitte A bis D der MC-Miete.....	60
Tab. 16: Wasserkapazitätsanalysen (MW) der Endproben der Abschnitte A bis D beider Mieten.....	67
Tab. 17: Feuchtdichteanalysen (MW) der Endproben der Abschnitte A bis D beider Mieten.....	67
Tab. 18: Fraktion an Material > 11,2 mm Korngröße der Endproben aus Abschnitt A bis D beider Mieten	67
Tab. 19: Nährstoffgehalte (MW) der Endproben der Abschnitte A bis D der KK-Miete	68
Tab. 20: Nährstoffgehalte (MW) der Endproben der Abschnitte A bis D der MC-Miete	68
Tab. 21: Ergebnisse des Kressetests der KK-Miete	69
Tab. 22: Ergebnisse des Kressetests der MC-Miete.....	69

Abkürzungsverzeichnis

kg	Kilogramm
mg	Milligramm
l	Liter
z.B.	zum Beispiel
bzw.	beziehungsweise
ca.	zirka
MW	Mittelwert(e)
GV	Glühverlust
TOC	Total Organic Carbon (gesamter organischer Kohlenstoff)
TIC	Total Inorganic Carbon (gesamter anorganischer Kohlenstoff)
TC	Total Carbon (Gesamt-Kohlenstoff)
nn	nicht nachweisbar
OD	Optische Dichte
HS	Huminsäure
ppm	parts per million
TM	Trockenmasse
oTM	organische Trockenmasse
MC	mikrobielle Carbonisierung
KK	konventionelle Kompostierung

1. Einleitung

Wird über eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft gesprochen, führt kein Weg an einer sinnvollen Verwertung organischer Abfälle vorbei. Seit Jahren gilt die Kompostierung als fixer Bestandteil moderner Abfallwirtschaftssysteme. Nicht zuletzt nach der Einführung der getrennten Sammlung in Österreich 1995, wodurch eine möglichst schad- und ballaststoffarme Fraktion an organischem Material aus Haushalten und Industrie gewonnen und verwertet werden kann. Durch die Abtrennung biogener Stoffe aus gemischten Siedlungsabfällen kann einerseits eine Reduktion an klimaschädlichen Emissionen, die durch anaeroben Abbau des Abfalls in Deponien entstünden, sichergestellt werden. Andererseits wird die Erzeugung eines stabilen und pflanzenverträglichen Qualitätsprodukts gewährleistet.

Die Behandlung organischer Abfälle unter Sauerstoffzufuhr wird seit Jahrzehnten als verfahrenstechnisch wirksame und ökologisch wertvolle Technik angesehen, um eine klimaschonende Kreislaufführung zu garantieren.

Doch nicht nur durch die Kompostierung kann biogenes Material verwertbar gemacht werden. Eine andere konventionelle Methode, die zu einer Nutzbarmachung der Organik führt, ist beispielsweise die anaerobe Behandlung in Biogasanlagen. Wobei hier ein Gärrest entsteht, welcher wiederum einem Verwertungsprozess, wie zum Beispiel der Kompostierung, zugeführt werden kann.

Der Kompostierungsprozess stellt ein stabiles Ausgangsmaterial für die Anwendung in der Landwirtschaft her, in der es als Dünger oder Bodenverbesserungsmittel Verwendung findet. Doch neben der herkömmlichen Kompostherstellung haben sich über die Zeit auch andere Prozesse in den Fokus von WissenschaftlerInnen und AnwenderInnen gespielt. Eine davon ist die „Mikrobielle Carbonisierung“, deren Anwendung ein kohlenstoffreiches Ausgangssubstrat zur Verwendung in der Landwirtschaft liefern soll.

1.1 Das Projekt

Die Erzeugerorganisation Marchfeldgemüse GmbH (EOM) hat sich die Frage gestellt, welche der beiden zuvor erwähnten Behandlungsmethoden, als geeigneter zur Herstellung eines Substrats für die Landwirtschaft angesehen werden kann. Die EOM bildet einen Zusammenschluss von Landwirten in der Marchfeldregion, dessen Zweck die Produktion unterschiedlicher Gemüsesorten, auch im biologischen Anbau, ist, sowie die Abpackung und Vertrieb derer darstellt. Der Standort befindet sich in Raasdorf, Niederösterreich.

Durch die Tätigkeiten der EOM fallen Gemüsereste an, welche bislang in die Produktion von Biogas in Biogasanlagen eingespeist wurden. Da die Übergabe von Abfällen in Zukunft jedoch mit höheren Kosten verbunden sein wird und die Nutzung von Stallmist auf den landwirtschaftlichen Flächen in der Vergangenheit zu Problemen führte, sollte eine neue Lösung gefunden werden. Man entschied sich die Gemüsereste einer Form der biologischen Behandlung zuzuführen, um damit ein Bodenverbesserungssubstrat zu gewinnen und auf den eigenen Flächen auszubringen. Hierfür standen die zwei erwähnten Verfahren zur Debatte: die konventionelle Kompostierung und die mikrobielle Carbonisierung.

Die Idee der Verwendung der mikrobiellen Carbonisierung kam während eines Seminars der „grünen Brücke“ und steht aus Gründen der einfacheren Handhabung und der versprochenen Reduktion an umweltschädlichen Gasen, im Interesse.

Darüber hinaus soll eine weitere Fragestellung Thema der Untersuchung sein. Und zwar der mögliche negative Einfluss höherer Zugaben an Zwiebeln bzw. Zwiebelresten auf den Kompostierungsprozess. Dieser Verdacht liegt darin begründet, dass in der Vergangenheit durch die Ablagerung von Zwiebeln ein Rückgang bzw. ein Ausbleiben des Bewuchses auf den entsprechenden Flächen beobachtbar war. Dies könnte auf die antibakterielle und entzündungshemmende Wirkung der Zwiebel zurückzuführen sein, die man sich auch in zahlreichen Haushalten als natürliches Heilmittel zunutze macht.

Im Zuge der Feststellung des Potentials der beiden Verfahren, wandte man sich an das Institut für Abfallwirtschaft der Universität für Bodenkultur zur Durchführung der Analysen und bekam darüber hinaus eine Förderung der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG) zugesprochen (Zehetbauer B., 2018).

1.2 Forschungsfragen

Unter diesen Gesichtspunkten stellen sich nun folgende Fragen, die es im Zuge der Arbeit zu beantworten gilt.

- Welches der beiden zu untersuchenden Verfahren ist besser geeignet ein Substrat zur Nutzung auf landwirtschaftlichen Flächen herzustellen?
 - Welche Unterschiede prägen die Abbauprozesse beider Verfahren?
 - Welche Unterschiede ergeben sich in den Untersuchungsparameter zur Beurteilung von Reife und Stabilität?

Das Thema der Zwiebelzumischung soll durch die zweite Forschungsfrage beantwortet werden:

- Welchen Einfluss hat die Mitkompostierung von Zwiebeln auf den Rotteprozess?

2. Stand des Wissens

Ziel der Kompostierung ist die Produktion eines stabilen und huminstoffreichen Substrats für die Anwendung in unterschiedlichen Bereichen mit unterschiedlichen Qualitätsanforderungen. Definiert wird die Kompostierung in der Kompostverordnung als *„die gesteuerte exotherme biologische Umwandlung abbaubarer organischer Materialien in ein huminstoffreiches Material mit mindestens 20 Masseprozent organischer Substanz.“* (BGBl. II Nr. 292/2001) Durch die Rückführung von Nährstoffen, die Verwendung als Bodenverbesserungsmittel oder als Bestandteil von Pflanzensubstraten, zeigt sich bereits die vielseitige Verwendung und der ökologische Mehrwert von Komposten.

Im Folgenden wird auf grundsätzliche Abläufe der Kompostierung eingegangen und der aktuelle Stand des Wissens in diesem Forschungsfeld wiedergeben.

2.1 Der Metabolismus

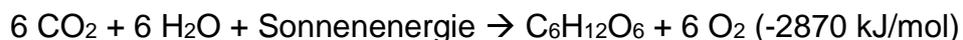
Der gesamte Stoffwechsel wird als Metabolismus bezeichnet und wird in die Prozesse Katabolismus und Anabolismus unterteilt. Der Abbau höhermolekularer Stoffe zu niedermolekularen Substanzen und die gleichzeitige Freisetzung von Energie, wird als Katabolismus bezeichnet. Beim Anabolismus wird das niedermolekulare Material durch den Einsatz von Energie dafür verwendet, um wiederum höhermolekulare Verbindungen aufzubauen. Bei der Kompostierung erfolgt dies durch heterotrophe, genauer durch organotrophe Organismen, die den Kohlenstoff und ihre Energie aus organischen Verbindungen beziehen (Krogmann, 1994). In der Kompostierung können vier wichtige Hauptgruppen an organischen Naturstoffen unterschieden werden:

- Kohlenhydrate, wie Zucker, Stärke oder Zellulose. Diese sind vor allem in Pflanzen vorhanden
- Fette, Wachse und Öle, welche in Fleisch, Pflanzen, Samen und Wurzeln wiederzufinden sind
- Proteine: wesentlicher Bestandteil von Fleisch, Fisch und Gemüse
- und Lignine: Bestandteil von Holz, Pflanzenfasern und Rinde

2.1.1 Energetische Betrachtung

Um mikrobiologische Stoffwechselprozesse zu garantieren, sind Energieflüsse notwendig, die es den Organismen ermöglichen Arbeit zu verrichten.

Als Energiequelle und somit als Ursprung allen Lebens, dient die Strahlung der Sonne. Phototrophe Organismen nutzen die Sonnenergie, um Wasser (H₂O) in Wasserstoff und Sauerstoff zu spalten und die Energie der Sonneneinstrahlung in chemische Energie umzuwandeln. Wasserstoff (H) wird dabei an Kohlenstoff (C), der in Form von Kohlendioxid der Atmosphäre entnommen wird, gebunden und organische Verbindungen können entstehen. Die durch die Sonneneinstrahlung bereitgestellte Energie ist nun in der Organik gespeichert, wobei der Energiehaushalt der entstandenen Produkte höher ist, als jene der Ausgangsstoffe und die Reaktion somit als endotherm zu verstehen ist (Slonczewski und Foster, 2009). Zur Veranschaulichung des Vorgangs wird oft als Beispiel die Bildung von Glucose herangezogen:



Die durch die Photosynthese gewonnenen organischen Verbindungen werden im fortlaufenden, natürlichen Energiefluss von heterotrophen Organismen verwendet, um Energie für den eigenen Stoffwechsel zu gewinnen (Bidlingmeier, 2000). Als Grundlage dafür gilt die Oxidation. Organismen, die ihre Energie aus Reduktions-Oxidations-Reaktionen beziehen, werden gemeinhin als chemotrophe Organismen bezeichnet (Slonczewski und Foster, 2009). Da die in der Organik gespeicherte Energie von heterotrophen Organismen nicht vollständig genutzt werden kann, wird ein Teil der Energie in Form von Enthalpie (Wärme) frei.

Mikroorganismen nutzen nicht unmittelbar die gesamte gespeicherte Energie, sondern gewinnen diese in kleineren Schritten aus den organischen Verbindungen. Würde die Energie nicht schrittweise gewonnen werden, würde die Zelle verbrennen. Entscheidend hierbei ist Abgabe und Aufnahme von Wasserstoffatomen (Krogmann, 1994). Diese werden stückweise auf Elektronenakzeptoren, wie zum Beispiel dem

NAD⁺ (Nicotinamidadenindinukleotid), aufgenommen, transportiert und schlussendlich bis zum Sauerstoff übertragen.

Eine besonders große Rolle in der Speicherung und Übertragung von Energie innerhalb der Zelle spielt das ATP (Adenosintriphosphat). Dieses Molekül besitzt drei Phosphatreste, welche sich durch hohe Energiegehalte definieren und durch Hydrolyse und durch Bildung von ADP (Adenosindiphosphat) freigesetzt werden können.



Bei der Reaktion wird eine Energie von 30,5 kJ/mol frei (Lehninger, 1982; zit. bei Bidlingmeier, 2000).

2.1.2 Der Abbauprozess

Organismen, die die gespeicherte Energie aus anorganischen Wasserstoffdonatoren nutzen können, werden litotroph genannt, jene die Wasserstoff aus organischen Verbindungen beziehen, organotroph (Hartmann, 1982; zit. bei Krogmann, 1994).

Der Abbau von organischem Material wird von zahlreichen Organismen bestimmt, wobei der Abbau aus mehreren ineinandergreifenden, enzymatischen Prozessen besteht. Hydrolytische und oxidative Prozesse beherrschen dabei den gesamten Vorgang, wobei makromolekulare Stoffe zu einfacheren Verbindungen zerlegt werden, wie zum Beispiel Stärke in Glucose oder Proteine in Aminosäuren. Diese Substanzen dienen als Kohlenstoff-, Nährstoff- und Energiequelle für die Organismen, wodurch schlussendlich im aeroben Milieu CO₂ und H₂O als Endprodukte übrig bleiben. Makromoleküle, welche wasserunlöslich sind, wie zum Beispiel Cellulose, werden nicht unmittelbar in die Zelle aufgenommen, sondern müssen zuerst durch extrazelluläre Enzyme in mono- bzw. dimere Verbindungen zerlegt werden, die wasserlöslich sind (Moo-Young, 1983; zit. bei Krogmann, 1994).

Gebundene Mineralstoffe werden entweder gelöst oder von Mikroorganismen direkt aufgenommen. Der in der Biomasse enthaltene Stickstoff wird speziell am Anfang vermehrt in die Biomasse der Mikroben eingebaut. Durch das dabei entstehende CO₂ wird auch das C/N-Verhältnis über die Zeit enger. Auf diesen Umstand wird im späteren Kapitel noch näher eingegangen (Scheffer und Schachtschabel, 2011).

Der Abbau von organischen Verbindungen ist prinzipiell auf zwei Arten möglich, dem aeroben und anaeroben Weg. Steht den Mikroorganismen während der Degradation elementarer Sauerstoff für die Oxidation zur Verfügung, wird vom aeroben Abbau gesprochen. Anaerobe Organismen spalten organische oder anorganische Verbindungen auf und nutzen diese für den Stoffwechsel, wobei Elektronendonatoren und –akzeptoren aus der gleichen Nährstoffquelle stammen. Als Energiequelle aller aeroben Mikroorganismen dient die bei der Assimilation vollständig genutzte und produzierte Potentialdifferenz zwischen Wasserstoff und Sauerstoff. Beim anaeroben Abbau fällt diese bedeutend geringer aus (Bidlingmeier, 2000).

Wie zuvor bereits angemerkt, kommt es bei der Kompostierung durch aerobe Verhältnisse zur Übertragung von Elektronen auf Sauerstoff (Elektronenakzeptor), wodurch das organische Material teilweise zu CO₂ und H₂O abgebaut wird.

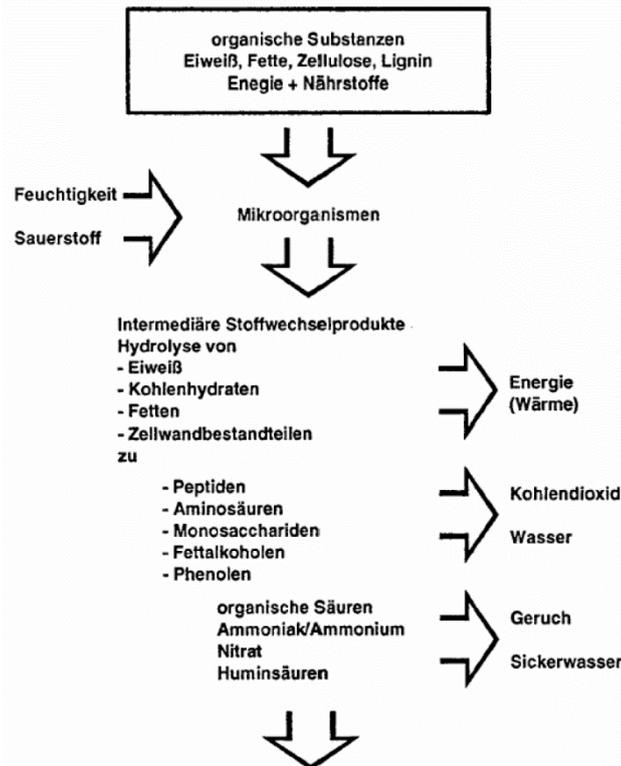


Abb. 1: Überblick des aeroben Abbaus (nach Binner,, 2002)

Abb. 1 liefert einen Überblick über die aeroben Abbauewege. Es zeigt sich, dass im Zuge des aeroben Stoffwechsels auch Carbonsäuren, wie zum Beispiel Essigsäure, Propionsäure oder Buttersäure entstehen, die auch zur Beurteilung des Rotteprozesses herangezogen werden können.

2.1.3 Anaerober Stoffwechsel

Im anaeroben Stoffwechsel ist kein freier Sauerstoff vorhanden, weshalb andere Elektronenakzeptoren notwendig sind, um eine Zersetzung des Ausgangssubstrats zu gewährleisten. Diese Elektronenakzeptoren können aus Kohlenstoff-, Stickstoff- oder Schwefelquellen stammen. Dabei werden sie mittels Wasserstoffatomen zu Methan (CH_4), NH_3 (Ammoniak) oder H_2S (Schwefelwasserstoff) reduziert. Zusätzlich wird auch CO_2 gebildet, das aus dem im organischen Material enthaltenen Sauerstoff entsteht.

Grundsätzlich gilt, je reduzierter das Substrat, das für den Abbau der Mikroorganismen zur Verfügung steht, ist, also je geringer die Oxidationszahl des Kohlenstoffs, desto mehr Methan entsteht aus dem Abbau. Somit gilt, dass der Ertrag von Methan aus der anaeroben Zersetzung von fett- oder eiweißhaltigen Substanzen höher ist (kann bis zu 75 % betragen), als jener aus kohlenstoffhaltigen Materialien (Kranert, 2017).

Der anaerobe Abbauprozess lässt sich in vier Schritte unterteilen:

- Hydrolyse
- Versäuerung
- Acetogenese und
- Methanogenese

Bei der Hydrolyse kommt es wie beim aeroben Abbau zur Spaltung von Makromolekülen durch die Wirkung von Exoenzymen. Dabei werden zum Beispiel Kohlenhydrate zu Monosaccharide, Eiweiß zu Aminosäuren oder Fette zu langkettigen Fettsäuren aufgespalten.

In der Versäuerung, auch acidogene Phase genannt, werden die gebildeten Monomere von Bakterien als Substrat verwendet und es bilden sich kurzkettige organische Säuren, wie die Ameisen-, Essig-, Propion-, Butter- und Valeriansäure, Alkohole, H_2 und CO_2 .

Bei der Versäuerung wird durch den Abbau von Proteinen NH_4^+ und H_2S gebildet (Krogmann, 1994).

Methanbakterien können nur Essigsäure, H_2 und HCO_3^- direkt verwerten, deshalb kommt es in der acetogenen Phase zur Umwandlung der Fettsäuren mit mehr als drei Kohlenstoffatomen zu Essig- oder Ameisensäure (C1 bzw. C2 Verbindungen). Auch hier wird Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid gebildet.

Schlussendlich kann in der Methanogenese Methan auf zwei Wegen erzeugt werden: durch die Oxidation des in der acetogenen Phase erzeugte H_2 mit CO_2 (ca. 30 % des Methans werden so erzeugt) oder durch die Spaltung der Essigsäure in CH_4 und CO_2 (ca. 70 % CH_4 werden dadurch gebildet) (Kranert, 2017).

2.1.4 Abbau von organischem Material

Der Abbau von organischem Material kann wie erwähnt aerob oder anaerob stattfinden. Der komplette Abbau von beispielsweise ligninhaltigem Material benötigt jedoch die Anwesenheit von aeroben Mikroorganismen, wie Pilzen oder aeroben Bakterien. Die teilweise Zersetzung von Lignin kann jedoch auch durch anaerobe Bakterien erfolgen, wird jedoch hauptsächlich bei Pilzen und aeroben Bakterien beobachtet (Berg und McClaugherty, 2014).

Bestimmte Makromoleküle lassen sich aufgrund ihrer chemischen Eigenschaften schwerer abbauen als andere, allen voran aromatische Verbindungen wie beispielsweise Lignin. Prinzipiell kann folgende Stabilitätsreihe organischer Pflanzeninhaltsstoffe abgeleitet werden: Zucker, Stärke, Proteine < Cellulose < Lignin, Wachs, Harze, Gerbstoffe (Scheffer und Schachtschabel, 2011).

Hinsichtlich ligninhaltiger Biomasse herrscht gemeinhin wissenschaftlicher Konsens, dass eine Zersetzung nur im aeroben Milieu möglich sei. Wird der Abbau von anaeroben Verhältnissen bestimmt, werden lediglich niedermolekulare Bestandteile oder Vorstufen des Lignins angegriffen. Auch in anaeroben Bereichen können ähnliche Produkte entstehen wie in aeroben, hierfür sind jedoch andere Elektronenakzeptoren (= Oxidationsmittel) notwendig, wie zum Beispiel NO_3^- (Nitrat) oder SO_4^{2-} (Sulfat). Der Zersetzungsprozess verläuft jedoch langsamer, ist meistens unvollständig und bildet, wie bereits erwähnt, organische Stoffe mit niedermolekularen Verbindungen, CH_4 (Methan), H_2S (Schwefelwasserstoff), Wasserstoff oder Fettsäuren (Scheffer und Schachtschabel, 2011).

Die Degradierung ligninhaltiger Substrate ist nach wie vor Gegenstand vieler wissenschaftlicher Forschungen, in denen exakte Ergebnisse weiterhin schwierig zu detektieren sind, aufgrund der hohen Anzahl enzymatischer Vorgänge. Kommt es zu einem Ligninabbau durch Weißfäulepilz, zeigen Untersuchungen, dass hierbei anfangs eine Kombination von Hydroxylierung und Demethylierung den Prozess

bestimmt und nachfolgend die aromatischen Ringe oxidativ gespalten werden (Eriksson et al. 1990; zit. bei Berg und McClaugherty, 2014).

2.2 Mikrobiologie in der Kompostierung

In der Natur zersetzen viele verschiedene Mikroorganismen, zum Beispiel Cellulose oder Hemicellulose. Diese Organismen produzieren extrazelluläre hydrolytische Enzyme, die entweder an der Außenseite der Zelle gebunden sind oder in die Umwelt abgegeben werden (Berg und McClaugherty, 2014).

Die Zusammensetzung der mikrobiellen Populationen kann aufgrund verschiedenster Eigenschaften der Umwelt variieren, seien es beispielsweise unterschiedliche Temperatur, Nährstoffgehalte oder pH-Werte. Obwohl auch Regenwürmer für den Abbau organischer Substanz wichtig sind, spielt die Mikrobiologie die größte Rolle in der Zersetzung von Organik. Persson et al (1980; zit. bei Berg und McClaugherty, 2014) schätzte, dass mindestens 95 % des Energieflusses durch mikrobiellen Abbau bedingt ist.

Jene Mikroorganismen, die bei der Kompostierung eine wesentliche Rolle beim Abbau organischer Substanz spielen, sind:

- Bakterien
- Aktinomyceten
- Pilze

Grundsätzlich werden Mikroorganismen in psychrotolerante, mesophile und thermophile Mikroorganismen eingeteilt, abhängig vom tolerierten Temperaturbereich. Dabei werden Mikroben als psychrotolerant bezeichnet, wenn der optimale Temperaturbereich zwischen -4 und 20 °C liegt. Von mesophilen Mikroorganismen spricht man bei Temperaturen zwischen 15 und 42 °C und bei thermophilen zwischen 45 und 75 °C. Die drei Temperaturbereiche können auf die Aktivität von unterschiedlichen Mikroorganismen zurückgeführt werden. Bakterien sind die einzigen Organismen die in jeder Phase der Kompostierung vorkommen können. Schimmelpilze sind in psychrophilen Bereichen aktiv, während in der mesophilen Phase Aktinomyceten bzw. im thermophilen Bereich mesophile bis thermotolerante Pilze gemeinsam mit Bakterien Aktivität zeigen (Amlinger, 2005).

2.2.1 Bakterien

Bakterien sind Prokarioten, welche weniger entwickelt sind als Eukarionten und keinen echten Zellkern besitzen. Sie können in verschiedensten Größen auftreten, meist zwischen 0,5 und 5 µm, und unterschiedliche Formen aufweisen, wie kugel-, zylinder- oder spiralförmig oder gekrümmt. Aufgrund ihrer im Vergleich zu anderen Mikroorganismen hohen spezifischeren Oberfläche, besitzen Bakterien auch die höchste Stoffwechselaktivität (Bidlingmaier, 2000).

In dynamischen Rotteverfahren wirkt die ständige Bewegung des Substrates hemmend auf Pilze und Aktinomyceten, während sie auf Bakterien keinen Einfluss zeigt (Müller und Ritter, 1972; zit. bei Krogmann, 1994).

2.2.2 Aktinomyceten

Aktinomyceten bilden fadenförmige Gebilde, sogenannte Filamente, mit vernetztem Mycel. Physiologisch sind sie unregelmäßig, stäbchenartig mit einem

durchschnittlichen Durchmesser von ca. 1,5 µm, geformt (Bidlingmaier, 2000). Die Strahlenpilze spielen besonders am Beginn der thermophilen und in der darauffolgenden mesophilen Phase eine große Rolle. Charakteristisch ist der weiße Überzug den sie oft auf den äußeren Bereich von Kompostmieten hinterlassen.

Aktinomyceten sind überdies imstande schwer abbaubare Substanzen, wie Cellulose oder Chitin abzubauen und auch beim Ab- und Aufbau von Humusstoffen beteiligt.

2.2.3 Pilze

Pilze sind Eukarionten und besitzen deshalb einen echten Zellkern. Mit Größen zwischen 10 und 50 µm sind ihre Zellkörper im Vergleich größer als jene von Bakterien und Aktinomyceten. Der Vegetationskörper (Thallus) besteht aus Fäden (Hyphen) die in der Gesamtheit als Mycel bezeichnet werden. Charakteristisch für Pilze ist ihre wollige Erscheinungsform.

Bezeichnend für Pilze ist ihre hohe Artenvielfalt. Grob können sie in Schimmelpilze und Hefe eingeteilt werden, wobei Schimmelpilze ein aerobes Milieu benötigen und Hefen unter aeroben oder anaeroben Bedingungen überleben können.

Pilze bevorzugen im Wesentlichen trockenes Milieu, da sie für ihren Stoffwechsel kein freies Wasser benötigen. Hinzu kommt ihre Toleranz gegenüber saureren Bereichen. Durch ihre Fähigkeit schwer abbaubare Stoffe zersetzen zu können, leisten sie zum Beispiel beim Abbau von Lignin einen wichtigen Beitrag. Darüber hinaus spielen Pilze durch das Bilden von antibiotischen Produkten bei der Hygienisierung des Kompostsubstrats eine wichtige Rolle (Bidlingmaier, 2000).

2.3 Faktoren, Kenngrößen und Prozessparameter bei der Kompostierung

Die Abbaumechanismen während der Kompostierung werden von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Über diese Faktoren kann der mikrobiologische Abbau organischer Substanzen gelenkt und gesteuert werden.

2.3.1 Gasaustausch

In der Kompostierung sind zwei Arten der Belüftung geläufig, die natürliche und die zwangsweise Belüftung, wobei in beiden Systemen die Belüftung die gleichen, vielfältigen Funktionen erfüllt.

Durch den permanenten Gasaustausch wird eine konstante Versorgung der Mikroorganismen mit O₂ sichergestellt und eine gleichzeitige Abführung des gebildeten CO₂ garantiert. Der im Wasser gelöste Sauerstoff ist in der Regel nach wenigen Sekunden aufgebraucht, weshalb ein stetiger Gasaustausch eine hohe Bedeutung besitzt. Darüber hinaus fördern die konvektiven Strömungen den Austrag an überschüssigen Wasser, welches zu einer Verstopfung der Luftporen führen könnte, und somit zu einer Trocknung des Rotteguts. Ein gleichmäßiger Gasaustausch verhindert ebenfalls einen Wärmestau, der zu einer Inaktivierung der Mikroorganismen führen kann (Kranert, 2017).

Eine Voraussetzung für den Erhalt eines geeigneten Luftporenvolumens und des Gasaustauschs bildet die Strukturstabilität der Ausgangsmaterialien. Der optimale Einsatz an zerkleinerten, strukturreichen Materialien, wie zum Beispiel gehäckselter Strauchschnitt, hängt vor allem vom Hauptrotteverfahren und den Wassergehalten und Struktureigenschaften der anderen Ausgangssubstrate ab. Besitzt der Mietenkörper

einen hohen Querschnitt, ist auch von einer großen Auflast auszugehen, der Einfluss auf die Konvektion oder einer eventuellen Zwangsbelüftung hat (Amlinger et. al, 2005).

Der Luftaustausch in der Kompostmiete ergibt sich einerseits durch das regelmäßige Umsetzen des Substrates, andererseits durch Konvektionsvorgänge. Diese werden durch die Selbsterhitzung des Materials bzw. die dadurch hervorgerufene Temperaturunterschiede innerhalb und außerhalb der Miete vorangetrieben. Zusätzlich kommt es zu einem Luftaustausch durch Diffusionsvorgänge.

Im Zusammenhang mit dem Gasaustausch ist auch der Respirationskoeffizient zu erwähnen, welcher das Verhältnis zwischen dem erzeugten Kohlendioxid und dem Sauerstoffverbrauch in Bezug auf die Molekülmasse angibt. Da die Produktion von Kohlendioxid und der Sauerstoffverbrauch der Mikroorganismen im direkten Verhältnis stehen, ist bei einer Messung der Konzentrationen der Mietenluft davon auszugehen, dass die Summe an CO₂ und O₂ kleiner 21 Vol% sein muss, sofern der Abbau der organischen Masse unter aeroben Bedingungen erfolgt. Ist dem nicht so, liegt die Summe also über 21 Vol% und ist der Respirationskoeffizient somit > 1, so kann von bereichsweisen anaeroben Bedingungen innerhalb der Miete ausgegangen werden (Amlinger et. al, 2005).

Der Respirationskoeffizient ist abhängig vom Ausgangsmaterial und von den aktuellen Milieubedingungen innerhalb des Rottekörpers. Der Bedarf der Mikroorganismen an Sauerstoff wird von Nährstoffsituationen, Rottetemperaturen und Wassergehalten beeinflusst (Glathe et al., 1985; zit. nach Bidlingmaier, 2000). Beachtet man, die speziell während der ersten Phase der Kompostierung hohen Sauerstoffverbrauch der Mikroorganismen, ist eine konstante Luftzufuhr unabdinglich.

Ist die Sauerstoffversorgung unzureichend bzw. ist der Luftporenanteil in der Miete zu gering, um einen Gasaustausch zu fördern, kann dies zur Entstehung von Fettsäuren oder anderen niedermolekularen organischen Säuren beitragen. Die veränderten Milieubedingungen führen zu einer Verschiebung des pH-Werts in den sauren Bereich, was verstärkte Geruchsemissionen und ein erhöhtes Korrosionspotential der Abluft und des Sickerwassers zur Folge hat. Außerdem kann es unter anaeroben Bedingungen zur Bildung von Methan kommen (Kranert, 2017).

Es zeigt sich, dass der Gasaustausch wesentlichen Einfluss auf den Rotteprozess hat. Darüber hinaus kann die Atmungsaktivität der am Abbau beteiligten Mikroorganismen als Parameter für die Ermittlung des Rottegrades und biologischer Stabilität des Substrats verwendet werden, da damit der Sauerstoffverbrauch über eine bestimmte Zeit ermittelt wird.

2.3.2 Wassergehalt

Das Vorhandensein an ausreichend Wasser ist für die Kompostierung ein grundlegendes Kriterium. Da Transportvorgänge von Mikroorganismen nur über semipermeable Membranen stattfinden können, sind sie nur im Stande aus wässrigen Lösungen Sauerstoff und Nährstoffe aufzunehmen und Stoffwechselprodukte aus der Zelle auszuscheiden (Kranert, 2017). Jedoch steht die Versorgung mit ausreichend Wasser und die Nachlieferung an Sauerstoff in gegenseitiger Konkurrenz, weshalb dem freien Porenvolumen im Rottegut umso mehr Bedeutung zukommt. Der optimale Wassergehalt nimmt über den Rotteverlauf, aufgrund der Abnahme der organischen Masse, ab (Amlinger et. al, 2005). Der Optimalgehalt an Wasser bei der Kompostierung von Bioabfall wird zwischen 45 % und 65 % angegeben, abhängig vom Wasserhaltevermögen bzw. der Struktur des Rottegutes. Wird ein Wassergehalt von

etwa 25 % unterschritten, bewirkt dies einen starken Rückgang der mikrobiellen Aktivität. Bei unter 10 % ist ein Stillstand der Mikroorganismen zu erwarten. Neben der Versorgung mit Sauerstoff, ist somit auch der Wassergehalt ein entscheidender Faktor, um einen optimalen Rotteprozess zu gewährleisten (Bidlingmaier, 2000).

2.3.3 Rottetemperatur

Wie bereits erwähnt, wird die in der organischen Masse gespeicherte Energie von Mikroorganismen zum Großteil in Form von Wärme freigesetzt. Wieviel Wärme entsteht, ist von verschiedenen Parametern, wie Menge und Art des Substrates, der Belüftung und dem Wassergehalt, abhängig (Krogmann, 1994). Die Rottetemperatur hat eine große Bedeutung im Rotteprozess, sie gibt Auskunft über den aktuellen Abbauzustand des Rotteprozesses und dient zeitgleich als Steuerungsparameter. Je nach Temperaturzustand im Rottegut kann auf die unterschiedlichen Rottephasen geschlossen werden:

1. Intensivrotte (Hauptrotte)
2. Nachrotte und
3. Reifephase

Der Beginn der Rotte ist mit einem starken Wirken von mesophilen Mikroorganismen gekennzeichnet und endet im Optimalfall innerhalb von 24 Stunden. Diese mesophile Phase wird stark vom pH-Wert des Ausgangsmaterials beeinflusst. Ein niedriger pH-Wert führt zu einer Verzögerung der mikrobiologischen Abbauprozesse (= lag-Phase) (Amlinger, 2005).

Nach der Startphase ist in der Regel ein starker Anstieg der Temperatur zu verzeichnen, wobei es entweder zum Absterben der mesophilen Mikroorganismen kommt oder diese Dauerformen, wie Sporen, bilden. An Stelle der mesophilen nehmen thermophile Bakterien und auch Aktinomyceten ihre Stoffwechselaktivität bei Temperaturen bei zum Teil mehr als 60 °C auf. Bei weiterer Temperaturzunahme beginnt ab ca. 75 °C die Denaturierung des Eiweißes, wodurch biologische Prozesse zum Erliegen kommen. Die Intensivrotte zeichnet sich durch den Abbau von leicht verfügbaren Kohlenstoffquellen unter Bildung von intermediären Stoffwechselprodukten und der angesprochenen hohen Energiefreisetzung aus. Die hohen Temperaturen (> 55 °C) spielen eine wichtige Rolle für die Abtötung von pathogenen Keimen und Unkrautsamen. Durch hohe Temperaturen über mehrere Tage wird die Hygienisierung des Komposts garantiert. Die Intensivrotte ist dann beendet, wenn die Temperaturen dauerhaft 40 °C nicht mehr übersteigen.

Nach der Intensivrotte ist eine deutliche Abnahme der Rottetemperatur wahrnehmbar, da die leicht abbaubaren organischen Substanzen bereits von den Mikroorganismen veratmet wurden und die Zersetzung von schwer abbaubaren Verbindungen, wie Lignin oder Cellulose, einsetzt. Mesophile Organismen nehmen dabei wieder den Platz an Stelle der Thermophilen ein. Die nun vorhandenen mittel und schwer abbaubaren Substanzen bewirken eine Reduktion der mikrobiologischen Aktivität, so dass es zu einer Abnahme der Rottetemperatur kommt. Die Nachrotte beginnt, sobald 40 bis 45 °C unterschritten werden und führt über Stabilisierungs- und Humifizierungsprozesse zu einer Erzeugung von Reif- oder Fertigkomposten. Die Stabilisierungsphase spielt neben den Temperaturen über 55 °C auch eine wichtige Rolle in der Inaktivierung von pathogenen Keimen. Ab Temperaturen unter 60 °C bildet sich je nach verwendeten Ausgangssubstrat eine Mischpopulation aus Bakterien, Aktinomyceten und Pilzen (Amlinger, 2005).

2.3.4 pH-Wert

In der Kompostierung kommt es zu Beginn zumeist zu einem Absinken des pH-Wertes aufgrund der Bildung von organischen Säuren und der Produktion von Kohlendioxid. Organische Säuren können sich aufgrund von Sauerstoffmangel bilden oder durch einen hohen Gehalt an leicht abbaubaren Substanzen, aus denen sie im aeroben Stoffwechsel als Zwischenprodukte erzeugt werden (Golueke, 1977; zit. bei Krogmann, 1994). In Folge der Abbauprozesse der organischen Säuren durch säuretolerante Mikroorganismen steigt der pH-Wert im weiteren Verlauf der Kompostierung.

2.3.5 C/N – Verhältnis und Stickstoffumsatz

Kohlenstoff und Stickstoff zählen neben Phosphor und Kalium zu den Makronährstoffen. Das Verhältnis des verfügbaren Kohlenstoffs zum verfügbaren Stickstoff hat dabei direkte Auswirkungen auf die Abbaurate des Ausgangsmaterials. Ist beispielsweise zu viel an mobilisierbaren Stickstoff in den Ausgangsmaterialien vorhanden, kann es während des Rotteprozesses zu hohen Verlusten an Stickstoff in Form von Ammoniak kommen. Ein C/N-Verhältnis zwischen 25:1 und 40:1 im Ausgangssubstrat gilt für die mikrobiologische Aktivität als günstig (Bidingmaier, 2000). Zu hohe Gehalte an C oder N können den Abbau des Substrats beeinflussen. Ist ein hohes C/N-Verhältnis gegeben, bedeutet dies ein Mehrgehalt an Kohlenstoff im Ausgangsmaterial. Mehrere mikrobiologische Lebenszyklen werden zur Reduktion des Verhältnisses benötigt und der Abbau des Rotteprozess verlängert sich. Der gesamte verfügbare Stickstoff wird von den Mikroorganismen inkorpiert und steht erst nach Absterben dieser von anderen zum Abbau zur Verfügung. Der Kohlenstoff wird nur zu einem Drittel inkorporiert, die anderen zwei Drittel werden in Form von CO₂ frei (Golueke, 1997; zit. bei Krogmann, 1994).

In Laufe der Mineralisierung entsteht Kohlenstoffdioxid, wodurch es zu einer relativen Anreicherung des Stickstoffs und somit zu einer Verengung des C zu N Verhältnisses kommt. Huminstoffe besitzen beispielsweise ein C/N-Verhältnis von ca. 10. Ein hoher Gehalt an leicht verfügbarem Stickstoff im Ausgangssubstrat kann von den Mikroorganismen nicht verwertet werden, Stickstoffverlust in Form von Ammoniak, Lachgas oder elementarem Stickstoff, sind die Folge (Amlinger et. al, 2005)

Durch den Abbau organischer Verbindungen mit darin enthaltenem Stickstoff, kommt es zum Teil zur Bildung von Ammonium, der überwiegend von Mikroorganismen assimiliert wird oder im Zuge der Nitrifikation über Nitrit zu Nitrat oxidiert wird. Dementsprechend ist im Laufe der Kompostierung eine Zunahme des Nitratgehalts erkennbar, welcher im weiteren Verlauf ebenfalls wieder abgebaut wird, während Ammoniumgehalte mit der Zeit abnehmen. Wird am Ende der Kompostierung ein hoher Ammoniumwert detektiert, so ist von einer geringen Stabilisierung auszugehen (Kranert, 2017).

Ein hoher Gehalt an NH₄ im Kompostierungsprozess zeugt von Instabilität des Materials. In Khalid Iqbal et al. (2010) wird das Verhältnis von NH₄ zu NO₃ kleiner als 1 als ein Indikator für die Kompostreife gesehen. Dazu ist zu erwähnen, dass ein stabiler, huminstoffreicher Kompost geringere Werte von sowohl Ammonium, als auch Nitrat aufweist.

2.3.5.1 Ammonifikation und das Ammonium-Ammoniak Gleichgewicht

Jene Mikroorganismen, die für die Ammonifikation verantwortlich sind, sind zugleich in der Lage sich auf unterschiedliche Milieubedingungen einzustellen. Die

Ammonifikation von Stickstoff ist der vollständige Prozess für den Abbau von Proteinen und findet über mehrere Stufen statt (Insam et al., 2002).

Zuerst werden Proteine bzw. Peptide durch die Proteolyse (enzymatische Hydrolyse von Proteinen durch Peptidasen) in Polypeptide, Oligopeptide oder Aminosäuren fragmentiert. Katalysiert wird die Zersetzung durch die Protease (Schlegel und Schmidt, 1985; zit. bei Insam et al., 2002)

Im zweiten Schritt (Deaminierung) spaltet sich die Aminogruppe von der Aminosäure ab, wodurch Ammonium oder Ammoniak produziert wird (Falbe und Regitz 1989; zit. bei Insam, 2002).

Ammonium und Ammoniak befinden sich in der wässrigen Phase über Ammonium-Hydroxide (NH_4OH) in einem chemischen Gleichgewicht. Unter Bedingungen mit basischen pH-Werten und hohen Temperaturen, verschiebt sich das Gleichgewicht in Richtung Ammoniak, welches als Gas in die Atmosphäre gelangen kann (Fenn et al., 1981; zit. bei Insam et al., 2002).

2.3.5.2 *Nitrifikation und Denitrifikation*

Wird Ammonium in Nitrat umgewandelt, spricht man von der Nitrifikation. Diese besteht aus zwei Oxidationsschritten, die von zwei autotrophen Bakteriengruppen bestimmt werden. Zunächst wird Ammonium in Nitrit (NO_2^-) durch Nitrosomonasbakterien oxidiert. Danach erfolgt die Metabolisierung des Nitrits zu Nitrat, ebenfalls durch Oxidation von Nitrobacterbakterien.

Die Optimaltemperatur der Nitrifikation liegt zwischen 20 und 30 °C, der optimale pH-Wert bei 8,5. Im sauren Milieu (pH-Wert < 6) ist die Nitrifikation schwach. Der Prozess verlangt eine konstante Sauerstoffzufuhr, da die Umwandlung sonst gehemmt werden kann.

Die mikrobielle Reduktion von Nitrat über Nitrit zu gasförmigen Verbindungen, wie NO, N_2O (Lachgas) und N_2 wird als Denitrifikation bezeichnet. Diese wird von fakultativen Anaerobiern, wie den Pseudomonas oder Achromobactern, vorangetrieben und findet dann statt, wenn der Bedarf an Wasserstoffakzeptoren nicht durch O_2 gedeckt werden kann. In diesem Falle wird NO_3^- als Wasserstoffakzeptor von den Mikroorganismen zur Energieproduktion genutzt. Die gasförmigen Zwischenprodukte wie NO und N_2O können aus dem Umwandlungsprozess austreten bevor eine weitere Reduktion stattfindet.

Die wichtigste Anforderung für die Denitrifikation ist eine Sauerstoffkonzentration, die niedriger ist als 1-5 Vol%. Höhere Konzentrationen hemmen Denitrifikationsenzyme. Ab einer Temperatur von ca. 5 °C kann der Umwandlungsprozess stattfinden und nimmt mit steigender Temperatur zu. Das Optimum liegt zwischen 18 und 30 °C. Der optimale pH-Wert zwischen 6 und 7 (Insam et al., 2002).

2.3.5.3 *Immobilisierung*

Die Umsetzung von anorganischen zu organischen Stickstoffverbindungen wird Immobilisierung genannt. Während der Rotte werden, wie in allen biologischen Prozessen mikrobielle Proteine aus Ammonium geformt. Ist Ammonium für die Synthese nicht direkt verfügbar, kann zuerst Nitrat oder Nitrit umgeformt werden. Auch Huminstoffe binden stickstoffhaltige Bestandteile, wobei die Bindungsform und die chemische Struktur dieser Bestandteile noch unzureichend erforscht sind. Sie ähneln jedoch Proteinen und Aminosäuren. Üblicherweise macht ein großer Teil des Abfalls in der Kompostierung das Lignin aus, welches wenig Stickstoff beinhaltet. Während

der Kompostierung jedoch wird Lignin teilweise umgewandelt und ist so in der Lage N-Bestandteile zu binden (Insam et al., 2002).

Studien zeigen, dass während der Kompostierung bis zu 20-70% des im Ausgangsmaterial vorhandenen Stickstoffs durch Ammoniak Ausgasung, Auswaschung oder Abfluss verloren gehen kann. Verluste an Stickstoff führen zu einer Wertminderung des Komposts und können zu Umweltbelastungen führen (Insam et al., 2002). Neben der Kompostierung entstehen Ammoniakemissionen zum größten Teil durch Stickstoffdüngung in der Landwirtschaft und in der Viehhaltung. Zusammen mit anderen Stoffen, wie Stickoxiden oder flüchtigen organischen Verbindungen, spielt die Ammoniakausgasung eine wesentliche Rolle bei der Versäuerung von Böden, Eutrophierung von Gewässern und Ökosystemen, sowie bei der Bildung von bodennahem Ozon und sekundärer Partikel (Feinstaub) (Anonym, 2010).

2.4 Huminstoffe

Der vollständige Abbau organischer Substanzen zu CO₂ und H₂O wird als Mineralisierung bezeichnet, wohingegen man bei der Umwandlung und Bindung von Organik in stabilere Produkte von Humifizierung spricht.

Nach Scheffer und Schachtschabel (2010) zeichnen sich Huminstoffe durch ihre hochmolekularen organischen Verbindungen aus. In ihrem Aufbau lassen sich zahlreiche funktionelle Gruppen, wie Carboxy-, Carbonyl-, Hydroxy- oder Aminogruppen wiederfinden. Charakteristisch sind jedoch die zumeist dunkle Farbe und die besonders große spezifische Oberfläche, wodurch Huminstoffen besondere Eigenschaften zugesprochen werden.

Die Anwendung von instabilen Komposten kann auch zu negativen Effekten für das Pflanzenwachstum führen. Instabiler Kompost kann die Keimung des Saatguts hemmen oder das Pflanzenwachstum aufgrund der Toxizität von wasserlöslichen organischer Säuren oder Ammoniak verringern. Darüber hinaus kann es zu Pflanzenschädigungen aufgrund von Sauerstoffkonkurrenz führen (Brewer und Sullivan, 2003).

In Laufe der Kompostierung entstehen Huminstoffe dann, wenn reaktionsfähige Spaltprodukte nach dem Abbau der organischen Substanz vorliegen und neue stabile organische Verbindungen aufgebaut werden. In weiterer Folge kommt es zur Bildung von Tonhumuskomplexen (Amlinger, 2005). Es existieren jedoch verschiedene Theorien zur Bildung von Huminstoffen. Eine davon findet in Kapitel 2.4.3 Erwähnung.

2.4.1 Unterteilung der Huminstoffe

Eine Einteilung der Huminstoffe erfolgt nach ihrer Löslichkeit, wodurch sie in Huminsäuren, Fulvosäuren und Humine klassifiziert werden. Humine sind im gesamten pH-Wertbereich unlöslich. Huminsäuren fällen durch Behandlung mit Säuren aus, während sich Fulvosäuren durch Ansäuern in der Lösung befinden (Gerzabek et. al, 1993).

Ein hoher Anteil an stabiler Organik (= Huminstoffe) bestimmt die Qualität von Komposten. Um eine hohe Humifizierung zu erreichen ist neben der Prozessführung, das Inputmaterial ausschlaggebend. Untersuchungen zeigen, dass der Anteil an stabilen organischen Verbindungen in Komposten umso höher ausfällt, je vielfältiger die Ausgangssubstratmischung aus leicht (Obst, Gemüse etc.), mittel und schwer (Cellulose, Holz etc.) abbaubaren Komponenten zusammengesetzt ist. Um den

Humifizierungsgrad festzustellen, können Huminsäureanteile entweder nasschemisch extrahiert, oder einer Beurteilung mittels Infrarotspektroskopie unterzogen werden.

2.4.2 Besonderheiten des Humus im Boden

Nach Scheffer und Schachtschabel (2010) ist Humus die Gesamtheit der toten organischen Substanz des Bodens. Die Definition beinhaltet demnach Huminstoffe, sowie unzersetztes organisches Material aus Pflanzenresten.

Die große Bedeutung des organischen Materials im Boden kann vor allem auf dessen Nährstofflieferungspotential für Pflanzen zurückgeführt werden. Stabile organische Verbindungen zeichnen sich durch langsame Abgabe der Nährstoffe durch erschwerten Abbau des Substrats aus, wodurch den Pflanzen eine schrittweise Nutzbarmachung der Nährstoffe ermöglicht wird. Besonders in der biologischen Landwirtschaft wurde man sich in den letzten Jahren der Bedeutung der organischen Substanz im Boden bewusst. Demnach herrscht Konsens, dass ein niedriger Gehalt an organischer Masse zu wesentlichen Verlusten des Bodens an wichtigen Produktions- und Schutzfunktionen verliert (Amlinger et al., 2006).

Weitere positive Effekte des Humus ergeben sich durch die Einflüsse auf biologische und physikalische Eigenschaften des Bodens.

Ein schnelles Eindringen von Wasser in den Boden führt zu starken Aggregatzerstörungen durch Quellung und Luftspregung, wodurch die Infiltration in den Boden verringert und somit die Wassererosion gefördert wird. Durch Stabilisierung der Aggregate von hochmolekularen Huminstoffen und durch Verringerung der Infiltrationsrate durch die organische Masse wird der Aggregatzerfall im Boden reduziert (Amlinger et al., 2006).

Huminstoffe zeichnen sich insbesondere durch ein hohes Adsorptionsvermögen aus. Zahlreiche Nährstoffe liegen in Böden als Kationen vor, die von Huminstoffen gebunden werden können. Die Fähigkeit Kationen zu binden und bei Bedarf wieder abzugeben, wird als Kationenaustauschkapazität (KAK) bezeichnet.

Neben einer verbesserten KAK, bieten Huminstoffe auch die Möglichkeit anorganische und organische Schadstoffe zu binden. Durch die Anlagerung von schädlichen Stoffen an das organische Material, wird die Bioverfügbarkeit und somit auch die Persistenz dieser gesteuert. Folglich können schädliche Wirkungen auf Organismen unterbunden werden und eine Verlagerung von Schadstoffen in tiefere Bodenhorizonte oder in das Grundwasser vermindert werden.

Eine besonders wichtige Eigenschaft von Humus ist dessen Fähigkeit Wasser zu speichern. Dabei kann ca. das 3 bis 5-fache des eigenen Gewichts an Wasser aufgenommen werden. Wie bereits angesprochen weisen Huminstoffe eine eher dunkle Färbung auf. Dadurch werden Oberböden in kälteren Gebieten im Frühjahr besser erwärmt, wodurch auch die Vegetationszeit verlängert werden kann (Scheffer und Schachtschabel, 2010).

2.4.3 Bildung von Humusverbindungen

Zu der Bildung von Humusverbindungen existieren unterschiedliche Theorien. Eine davon wird nachfolgend erklärt.

Humifizierung wird jener Prozess genannt, bei dem Pflanzenrückstände nicht vollständig zu CO₂ und H₂O mineralisiert werden, sondern bei welchem organische Zwischenprodukte in Huminstoffe umgewandelt wird. Dieser Prozess inkludiert Abbau-

, Umwandlungs- und Neubildungsphasen, welche nicht nur im Boden sondern auch während der Kompostierung stattfindet. Beim Prozess der Humifizierung bilden Polyphenole eine äußerst wichtige Vorläufersubstanz für Huminstoffe. Diese sind in aromatischen Stoffen, wie Lignin vorhanden. Polyphenole werden dementsprechend auch beim Abbau von Lignin frei oder können auch von Mikroorganismen, hier hauptsächlich von Pilzen, gebildet werden. Bei der Bildung von Huminstoffen werden jene Polyphenole durch Polyphenoloxidasen zu Chinonen oxidiert, die wiederum untereinander oder mit unterschiedlichen Aminogruppen zu Huminstoffen kondensieren. Die daraus entstehenden Moleküle bilden das Zentrum der Huminstoffe, an die andere Spaltprodukte aus dem Abbau von Proteinen, Peptiden oder Zucker oder andere Moleküle gebunden werden. Eine weitere wichtige Rolle bei der Bildung und für den inneren Zusammenhalt der Huminstoffe, spielen freie Radikale (Stahr et al., 2016).

2.5 Rechtliche Situation in Österreich

Dieses Kapitel bietet eine Zusammenfassung wichtiger rechtlicher Grundlagen, bezüglich der Regelung, Anwendung und Untersuchung von Komposten.

2.5.1 Kompostverordnung

Die Kompostverordnung (BGBl. II Nr. 292/2001) stellt in Österreich die wichtigste Regelung der Verwendung, Kennzeichnung und In-Verkehr-Bringen von Komposten dar. Die Verordnung regelt das Ende der Abfalleigenschaft, wodurch Kompost rechtlich als Produkt angesehen werden kann (§1).

Nach Kompostverordnung Paragraph 3 Ziffer 10 definiert sich das „In-Verkehr-Bringen“ als *„das Einführen, das Befördern und das Vorrätighalten zum Verkauf, das Feilhalten, das Verkaufen und jedes sonstige Überlassen im geschäftlichen Verkehr (wie zB kostenlose Übergabe); das In-Verkehr-Bringen umfasst auch die Direktabgabe sowie die Bereitstellung zur Eigenanwendung einschließlich der Abgabe in Genossenschaften oder sonstigen Personenvereinigungen für deren Mitglieder.“*

Auch die Möglichkeit nicht der Kompostverordnung zu unterliegen, existiert. Dies trifft zu wenn:

- Die Ausgangsmaterialien nach AWG §2 Abs. 1 und 2 keine Abfälle sind
- Eine gewisse Maximalmenge an produzierten Kompost nicht überschritten wird (§2 Abs. 2)

Dem ersten Punkt ist hinzuzufügen, dass Landwirte, nur dann nicht von der Verordnung erfasst werden, wenn die Verwendung des Komposts zulässig ist, also wenn gemäß Bodenschutz- und Wasserrecht vorgegangen wird. Die verwendeten Ausgangsmaterialien können beispielsweise Grün- oder Strauchschnitte, Mist oder Ernterückstände sein. Der Kompost darf dabei nur aus Materialien eigener Erzeugnis oder aus Materialien anderer Betriebe hergestellt werden und auch nur auf eigenen oder auf anderen landwirtschaftlichen Flächen ausgebracht werden (Amlinger, o.J.).

2.5.2 Anforderungen und Qualitätsklassen des Komposts nach Kompostverordnung

Komposte werden je nach Ausgangsmaterialien und Grenzwerten in verschiedene Qualitätsklassen (A+, A und B) unterteilt. §4 der Kompostverordnung regelt die allgemeinen Anforderungen an Komposte. So sind zum Beispiel in Anlage 1 der

Verordnung alle Ausgangsmaterialien für die Herstellung von Qualitätskompost (Teil 1 und 2) aufgelistet nach denen der Kompost herzustellen ist.

Anlage 2 der Kompostverordnung beschäftigt sich unter anderem mit den Schwermetallgrenzwerten, die für die unterschiedlichen Qualitätsklassen einzuhalten sind. Ebenfalls in Anlage 2 der Kompostverordnung sind die einzelnen Anforderungen für die seuchenhygienische Unbedenklichkeit für verschiedene Verwendungsmöglichkeiten der Komposte dargestellt. In der Landwirtschaft, dem Landschaftsbau und der Landschaftspflege sind nur Komposte erlaubt, die mehr als 20 % TM an organischer Substanz aufweisen.

2.5.3 Rechtliche Anforderungen bei der Anwendung von Kompost in der Landwirtschaft

Werden Komposte in der Landwirtschaft eingesetzt müssen zusätzlich zu den allgemeinen Anforderungen an Komposte (§4 Abs. 1-5), zusätzliche Anforderungen beachtet werden. So sind Komposte, die in diesen Anwendungsbereich fallen nur von jenen Ausgangsmaterialien herzustellen, wie sie in Anlage 1 Teil 1 oder Teil 2 beschrieben sind. Des Weiteren müssen sie die Anforderungen der Qualitätsklasse A oder A+ aufweisen. Einen Überblick über die Aufwendungsmengen von Komposten, unter anderen in der Landwirtschaft, wird in Tabelle 1 gegeben.

Tab. 1: Aufwandsmengen von Kompost nach Anwendungsbereich und Qualitätsklassen (nach Amlinger, 2006)

Anwendungsbereich		Qualitätsklasse		
		Qu-Klasse A+	Qu-Klasse A	Qu-Klasse B
Landwirtschaft	Düngung	max. 8 t / ha und Jahr im Durchschnitt von 5 Jahren		ausgeschlossen **
	Rekultivierung; Erosionsschutz	max. 160 t TM / ha innerhalb von 20 Jahren *		
Hobbygarten		nicht mehr als 10 Liter pro m ² und Jahr		ausgeschlossen
Pflanzungen (Pflanzenlöcher)		nicht mehr als 40 Vol%		ausgeschlossen **
Landschaftsbau (Rekultivierung) / Rekultivierung auf Deponien		> 400 t TM / ha innerhalb von 10 Jahren	≤ 400 t TM / ha innerhalb von 10 Jahren *	≤ 200 t TM / ha innerhalb von 10 Jahren *
Landschaftspflege (Düngung)		Pflege: > 40 t TM / ha innerhalb von 3 Jahren	Pflege: ≤ 40 t TM / ha innerhalb von 3 Jahren *	Pflege: ≤ 20 t TM / ha innerhalb von 3 Jahren *

* Werden im Rahmen einer landwirtschaftlichen Rekultivierung mit Kompost als Produkt nach Kompostverordnung diese Höchstmengen ausgeschöpft, dürfen in einem Zeitraum von 20 Jahren keine weiteren Kompostanwendungen erfolgen.

* Werden innerhalb eines Zeitraumes von 10 Jahren die angegebenen Höchstmengen für Rekultivierung ausgeschöpft, so dürfen keine weiteren Pflegedüngungen in diesem Zeitraum erfolgen

** Grundsätzlich kann eine landesrechtliche Regelung auch die Aufbringung höherer Mengen bzw. von Kompost der Qualitätsklasse B in der Landwirtschaft zulassen. Für die Verwertung ist der Verwertungsgrundsatz des Bundesabfallwirtschaftsplanes zu berücksichtigen

Neben der Verwendung von 8 Tonnen pro ha und Jahr im fünfjährigen Durchschnitt, existiert ebenfalls eine Begrenzung von 160 t TM pro ha innerhalb von 20 Jahren für einmalige Rekultivierungs- oder Erosionsmaßnahmen (Tab. 1). Diese bedürfen jedenfalls eines wasserrechtlichen Bewilligungsverfahrens.

Der § 32 im Wasserrechtsgesetz 1959 Abs. 2 regelt die bewilligungspflichtigen Maßnahmen auf die Gewässerbeschaffenheit. Darin heißt es in Punkt F, dass jene Maßnahmen, die „das Ausbringen von Handelsdünger, Klärschlamm, Kompost oder anderen zur Düngung ausgebrachten Abfällen, ausgenommen auf Gartenbauflächen, soweit die Düngergabe auf landwirtschaftlichen Nutzflächen ohne Gründüngung 175 kg Stickstoff je Hektar und Jahr, auf landwirtschaftlichen Nutzflächen mit Gründüngung einschließlich Dauergrünland oder mit stickstoffzehrenden Fruchtfolgen 210 kg Stickstoff je Hektar und Jahr übersteigt“, einer Bewilligung bedürfen. Dabei ist jene Menge an Stickstoff in feldfallender Wirkung anzurechnen, die gemäß einer Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über das Aktionsprogramm zum Schutz der Gewässer vor Verunreinigung durch Nitrat aus landwirtschaftlichen Quellen (§ 55p) in zulässiger Weise durch Wirtschaftsdünger ausgebracht wird. (WRG 1959 §32 (f)).

Im Zusammenhang mit der Kompostverwendung auf landwirtschaftlichen Flächen darf die „Verordnung über das Aktionsprogramm zum Schutz der Gewässer vor Verunreinigung durch Nitrat aus landwirtschaftlichen Quellen (Nitrat-Aktionsprogramm-Verordnung – NAPV)“ (BGBl. II Nr. 385/2017) nicht unerwähnt bleiben. Das Aktionsprogramm wurde im Zuge der Nitratrichtlinie (91/676/EWG) der EU eingeführt und hat den Schutz der Gewässer vor Verunreinigungen durch Nitrate aus der Landwirtschaft zum Ziel. Das Programm sieht regelmäßige Nitratberichte vor, der letzte erschien 2016. Darin wird ebenfalls die Ausbringung von Komposten und Wirtschaftsdüngern geregelt. Unter dem Kapitel „Aktionsprogramm Nitrat - Maßnahmen“ wird die Ausbringung von Stallmist, Kompost und Klärschlammkompost im Zeitraum von 30. November bis 15. Februar des Folgejahres verboten. Jedoch ist bei frühanzubauenden Kulturen (Durumweizen, Sommergerste, Gründüngungen mit frühem Stickstoffbedarf, Feldgemüse unter Vlies) eine Düngung bereits ab 1. Februar zulässig. Weiters darf auf Ackerflächen nach Ernte der letzten Hauptfrucht bis zum Beginn des jeweiligen Verbotszeitraums und auf Dauergrünland und Wechselwiese im Zeitraum 1. Oktober bis zum Beginn des Verbotszeitraums maximal 60 kg Stickstoff in feldfallender Wirkung pro Hektar ausgebracht werden. Der Nitratbericht beziffert auch eine Höchstgrenze von 175 kg Stickstoff pro Hektar und Jahr aus Wirtschaftsdüngern, Komposten und anderen Handelsdüngern auf landwirtschaftlichen Nutzflächen ohne Gründüngung und 210 kg auf Flächen mit Gründüngung, einschließlich Dauergrünland mit stickstoffzehrender Fruchtfolge (BGBl. II Nr. 385/2017).

Das Düngemittelgesetz 1994 regelt das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln. Komposte aus tierischen Ausscheidungen, Stroh und ähnlichen Reststoffen aus der pflanzlichen Produktion zählen zu den bearbeitenden Wirtschaftsdüngern und sind unter bestimmten Voraussetzungen verkehrsfähig (BGBl. Nr. 513/1994).

2.5.4 Normen und Richtlinien

Normen und Richtlinien bilden eine wichtige Grundlage bei der Erzeugung, Anwendung und Untersuchung von Komposten. Einige wichtige werden nachfolgend genannt und wichtige Inhalte wiedergegeben. Auf relevante Informationen, vor allem zu den Untersuchungsmethoden, wird in Kapitel 3 näher eingegangen werden.

2.5.4.1 Kompost Anwendungsrichtlinie

Eine wichtige Richtlinie für die Verwendung von Kompost und der Beurteilung der Kompostqualität bildet die Kompost Anwendungsrichtlinie. Die Richtlinie hat eine Optimierung der pflanzenbaulichen Wirkungen von Komposten zum Ziel. Gleichzeitig soll eine Minimierung schädlicher Wirkungen auf Mensch und Naturhaushalt, sowie auf Böden garantiert werden (AGES, 2010).

In der Richtlinie werden wichtige Qualitätsmerkmale erwähnt, welche bei der Anwendung von Komposten besondere Bedeutung finden. Einige wichtige werden im Weiteren näher erläutert.

Die Umwandlung der organischen Substanz während der Kompostierung in stabile Verbindungen und deren positive Wirkungen auf den Boden, wurde bereits im Kapitel Huminstoffe erwähnt. Nach der Richtlinie weisen Komposte zumeist einen Anteil zwischen 30 und 40 % der TM an organischer Substanz auf, wobei Gehalte über 15 % anzustreben sind. Bei einem Gehalt unter 15 % wird von Erden gesprochen (AGES, 2010).

Das Vorhandensein an Pflanzennährstoffen in Komposten unterliegt starken Schwankungen, die abhängig sind von den verwendeten Ausgangsstoffen. Beispielsweise weisen Komposte aus Biotonnenmaterialien oft höhere Werte an Stickstoff, Phosphor oder Kalium auf, als Komposte aus reinem Grünschnitt.

Tab. 2: Spannweite der Nährstoffgehalte von Komposten (nach AGES, 2010)

Pflanzennährstoff	% TM
Gesamt – Stickstoff (N)	0,6 – 2,3
Gesamt – Phosphat (P₂O₅)	0,3 – 1,9
Gesamt – Kaliumoxid (K₂O)	0,5 – 3
Gesamt – Magnesiumoxid (MgO)	1 – 5,4
Gesamt – Calciumoxid (CaO)	2,4 - 19

Gemäß der Richtlinie der sachgerechten Düngung (2006) liegt Stickstoff bei Stallmistkomposten vorwiegend in organisch gebundener Form vor (> 99 %). Da die gebundene Form von Stickstoff in Komposten nicht direkt für die Pflanzen verfügbar ist, wird dementsprechend die Stickstoffwirkung oft in kurzfristige und langfristige Wirkung unterschieden. In der kurzfristigen Wirkung wird auf die mineralischen N-Komponenten des Kompostes geachtet, wobei bei Komposten der Gesamtstickstoff zwischen 1 und 2 % der TM liegt und die Gehalte an Ammonium und Nitrat bei stabilen

Komposten kleiner 0,01 % der TM liegen. Demnach wird an dem Jahr der Anwendung mit einer Düngerwirksamkeit von weniger als 10 % des Gesamtstickstoffs ausgegangen. Die langfristige Stickstoffwirkung des Komposts hängt von der Mineralisationsrate ab, welche wiederum von standortspezifischen Parametern, pflanzenbaulichen Maßnahmen und Witterungseinflüssen abhängt. Eine genaue Prognose der langfristigen Düngewirkung wird dadurch erschwert. In den Folgejahren wird zumeist von einer Stickstoffverfügbarkeit von mindestens 3-5 % pro Jahr ausgegangen.

Wird nun eine höchstmögliche dem Wasserrechtsgesetz legitimierte, bewilligungsfreie Menge an Kompost in der Landwirtschaft eingesetzt, ergibt sich automatisch eine zu geringe Menge an Stickstoff für ein ausreichendes Pflanzenwachstum. Daher muss in der Praxis die Kompostgabe so bemessen werden, dass noch ausreichend Spielraum für eine zusätzliche Stickstoffdüngung in besserer verfügbarer Form (Gülle, Mineraldüngung etc.) möglich ist (AGES, 2010).

Wie beim Stickstoff sind auch Phosphor und Kalium nicht direkt für die Pflanzen verfügbar. Die Verfügbarkeit hängt von Parametern, wie Aufbringungszeitpunkt, Witterung und biologischer Aktivität in Böden ab. Aus diesem Grund wird oft der verfügbare Anteil an Phosphor und Kalium, welcher durch die CAL Extraktion ermittelt werden kann, zur Bewertung der Verfügbarkeit angegeben.

Die Nährstoffwirkung einer P und K Düngung durch Kompost unterliegt, wie bei Stickstoff, aufgrund unterschiedlicher Ausgangsmaterialien bei der Kompostierung, aber auch aufgrund bestimmter Eigenschaften des Bodens, sowie Klimaverhältnissen und Kulturarten, bestimmten Schwankungen. Gemeinhin wird davon ausgegangen, dass der Großteil der ausgebrachten Phosphor- und Kaliummengen auch für Pflanzen mittelfristig verfügbar sind (AGES, 2010).

Wie schon in Tabelle 3 ersichtlich, kann der Gehalt an Kalzium und Magnesium in Komposten stark schwanken. Carbonate der beiden Elemente bedingen jedoch den meist höheren pH-Wert von Komposten (höher als 7,5), womit dem Kompost auch eine Kalkwirkung zugesprochen werden kann (AGES, 2010).

Das Kohlenstoff zu Stickstoff Verhältnis, welches bereits im Kapitel 2.3.5 angeführt wurde, spielt auch in der Anwendung des Komposts eine wichtige Rolle. Sollen Komposte mit noch höheren C/N-Verhältnissen verwendet werden, muss auf diesen Umstand geachtet werden. Kompost unterliegt im Boden noch weiteren Umbauprozessen (Humusaufbau), weshalb der Stickstoff bei weiterer biologischer Umsetzung des kohlenstoffhaltigen Kompostmaterials benötigen wird und somit nicht direkt pflanzenverfügbar ist und gleichzeitig auch nicht ausgewaschen werden kann. Werden jene Komposte auf Flächen ausgebracht, kann gleichzeitig eine Verwendung anderer Wirtschaftsdünger angedacht werden, um eine raschere N-Verfügbarkeit zu garantieren.

2.5.4.2 ÖNORM S 2200 (2000): Gütekriterien für Komposte aus biogenen Abfällen

Die ÖNORM S 2200 befasste sich mit der Beurteilung von Komposten aus Bioabfällen aus der getrennten Sammlung und gab darüber hinaus Auskunft über die Überwachung der Kompostgüte. Die Norm wurde mit Inkrafttreten der Kompostverordnung im Jänner 2002 zurückgezogen. Grundsätzlich wurde in dieser Norm zwischen zwei Anwendungstypen (A und B) unterschieden. Bei Anwendungstyp A handelt es sich um Komposte, die als Bodenverbesserungsmittel auf Ackerflächen, Grünland oder im Gartenbau verwendet werden können oder als Mischkomponente für Kultursubstrate bzw. als organische Düngemittel Verwendung finden können. Der

Anwendungstyp B wird durch einen höheren Anteil an organischer Substanz definiert, wonach eine weitere Mineralisation in den Boden verlagert wird. Diese ÖNORM gibt unter anderem Informationen über die Gehalte an organische Substanz (GV, TOC) der beiden Anwendungstypen, sowie über Nährstoffe, Pflanzenverträglichkeit, Schadstoffen und Seuchenhygiene (ÖNORM S 2200).

2.5.4.3 ÖNORM S 2202 (2014): Anwendungsrichtlinien für Kompost

Die Anwendungsspezifische Eigenschaften, wie sie in der ÖNORM angeführt werden, kommen auch Großteils in der AnwendungsRL Kompost vor. Unter anderem finden in der Norm das C/N-Verhältnis, die biologische Stabilität (Verwendung des Kompostsubstrats nach Abschluss der Hauptrotte), physikalische Eigenschaften (Wasserkapazität, Luftporenvolumen) und Schadstoffe Erwähnung. Ebenfalls wird der Salzgehalt von Komposten angeführt, welcher auch in der Kompostverordnung als Qualitätsparameter angeführt wird. In der Norm wird erläutert, dass ein zu hoher Salzgehalt die Keimung und die Wurzelfunktion von Pflanzen beeinträchtigen kann, weshalb der Gehalt an Salzen bei Komposten bis zu 3 mS/cm beschränkt ist. Das Salz ist zumeist in Form von Chloriden und Sulfaten (Alkali- Erdalkalimetalle) im Kompost enthalten und wird von Pflanzen zum Teil aufgenommen, im Boden gebunden oder kann durch Sickerwasser ausgewaschen werden.

Die ÖNORM S 2202 bietet Anwendungsempfehlungen in verschiedenen landwirtschaftlichen Bereichen (Feldgemüsebau, Ackerbau, Grünland etc.) und nennt Anwendungsbeschränkungen nach bestimmten Vorgaben (Nitratrichtlinie, Kompostverordnung etc.).

2.5.4.4 ÖNORM S 2023 (1993): Untersuchungsmethoden und Güteüberwachung von Komposten

Die ÖNORM S 2023 stellte die wichtigste Grundlage für die Untersuchung von Komposten dar. Um die Analytik von Komposten zu verbessern, wurden mit ihr die Methoden für die Untersuchung von Komposten vereinheitlicht. Die Norm wurde am fünften Jänner 2002 zurückgezogen, wobei die Inhalte größtenteils in der Kompostverordnung wiederzufinden sind. Ein besonderes Augenmerk wird dabei auf die Entnahme von Proben, die Probenaufbereitung und auf Untersuchungsmethoden der selbigen gelegt. Auf den genauen Inhalt zur Analyse von Kompostmethoden wird in Kapitel Material und Methoden eingegangen.

2.6 Die mikrobielle Carbonisierung

Die Theorie der mikrobiellen Carbonisierung wurde von Walter Witte postuliert. Laut der Theorie der mikrobiellen Carbonisierung (MC) steht nicht der aerobe Abbau organischer Materialien im Vordergrund, sondern vielmehr die Zersetzung und Umbau von Organik durch Organismen unter reduzierenden Verhältnissen. Mikroorganismen sind nach Witte auf überwiegend anoxische Verhältnisse angewiesen, um Nährstoffe pflanzenverfügbar zu machen. Der Begriff Humus ist für ihn zu spärlich in der Wissenschaft formuliert und müsste neu definiert werden, um eindeutige Feststellungsmerkmale zu liefern. Seine Antwort wird nicht in den bisher diskutierten Humusproduktionstheorien gesucht, sondern vielmehr aus einer Kombination von anoxischen Prozessen und dem Zusammenspiel dessen mit phototrophen Organismen. Energie wird dabei durch die photolytischen Eigenschaften von Mikroorganismen bereitgestellt.

Nach Witte werden Huminstoffe dann gebildet, wenn polyphenolische Verbindungen nicht durch Pilze abgebaut werden und diese somit als Grund- und Ausgangsstoffe für die Humifikation zur Verfügung stehen. Der Unterdrückung der Sauerstoffzufuhr kommt daher besonderer Bedeutung zu, da dadurch garantiert wird, dass polyphenolische Verbindungen nicht durch höhere Pilze abgebaut werden können.

2.6.1 Ausgangsmaterialien einer MC-Miete

Für eine MC-Miete, sollen unterschiedliche Ausgangssubstanzen verwendet werden. Dabei unterscheidet Witte zwischen Grund- und Cosubstrat. Als Grundsubstrat werden jene Materialien bezeichnet, die während des Prozesses an der Humusbildung beteiligt sind. Darunter werden ligninhaltige Stoffe verstanden, wie beispielsweise Holz, Stroh oder Rinden. Das Grundsubstrat soll Hauptanteil einer MC-Miete ausmachen mit Gehalten zwischen 60 und 80 %. Ob Volumen- oder Masseprozent wird in der Literatur nicht erwähnt.

Das Cosubstrat soll aus proteinreichen Verbindungen bestehen. Darunter zählen zum Beispiel Harn, Klärschlamm, Fruchtfleisch oder Biotonnenmaterialien. Beide Ströme sollten zuvor zerkleinert werden, um für die nachträgliche Nutzung eine geeignete Korngröße aufzuweisen. Darüber hinaus soll das Ausgangsmaterial vor dem Aufsetzen zur Vorrotte noch keinem biologischen Abbauprozess unterlegen sein.

2.6.2 Das Aufsetzen einer MC-Miete

Die Bakterien benötigen für das bakterielle Wachstum eine bestimmte Zelldichte, um in die "exponentielle Wachstumsphase" (log-Phase) einzutreten. Aus diesem Grund ist vor dem Aufsetzen der Miete eine Vorrotte mit der fertigen Mischung erforderlich, die das Auflösen der Zellstrukturen (Mazeration) der Biomassen einleiten soll und gleichzeitig die lag-Phase der Bakterien verkürzen soll.

Erst nach kurzer Vorrotte des Materials, kann das gut gemischte Ausgangsmaterial aufgesetzt werden. Dabei kann das Material in Form einer Tafelmiete entweder auf befestigtem oder bewachsenem Untergrund platziert werden. In diesem Zusammenhang sind die baulich-technischen Mindestanforderungen für die Durchführung einer Hauptrotte auf offenem Mutterboden nach Stand der Technik zu erwähnen. Dies ist bis zu einer Verarbeitungsmenge von maximal 300 m² pro Jahr begrenzt und standortbezogen dürfen nur 100 m² gelagert werden.

Das Material soll nach Aufsetzen eine Höhe von ca. 2 bis 2,5 m aufweisen und verdichtet sein. Dies kann beispielsweise durch Anpressen mit einer Radladerschaufel sichergestellt werden. Nach der Verdichtung soll innerhalb von 24 Stunden ein Sauerstoffgehalt von < 1 Vol% in der Mietenporenlufte nachweisbar sein. Der Wassergehalt des MC-Komposts soll zwischen 35 und 50 % liegen. Eine Abdeckung der Miete ist nicht vorgesehen, da dies zu wesentlichen Einschränkungen der Organismen an der Oberfläche der Miete führen würde.

2.6.3 Abläufe einer MC-Miete

Die Temperaturen innerhalb der Miete sollen einen Wert von 55 °C nicht übersteigen, da dies sonst ein Indiz dafür wäre, dass mehr Sauerstoff als nötig in der Miete vorhanden ist oder durch Kaminzugeffekt nachgeliefert wird. Ein weiteres Merkmal in der mikrobiellen Carbonisierung ist der hohe Gehalt an Wasserstoff der nach zwei bis drei Tagen innerhalb der Miete nachweisbar ist. Die Konzentration kann hier bei über 2000 ppm liegen.

Anstatt des Sauerstoffs sind andere Gase in den Poren der Miete festzustellen, wie zum Beispiel Methan, Kohlendioxid, Wasserstoff, Kohlenmonoxid, Ammoniak oder Schwefelwasserstoff. Nach Witte dürfen die Gase die Miete nicht verlassen, was durch das Verdichten der Miete gewährleistet wird. Diese Gase sind für den Humifizierungsvorgang essentiell und werden für die Prozesse innerhalb der Miete benötigt.

Zur Wasserstoffproduktion in der Miete kommt es durch die Tätigkeit von Archaeen. Einerseits wird an der Oberfläche der MC-Miete Photosynthese betrieben, andererseits im Inneren Chemosynthese. Neben H wird für die Tätigkeit der Archaeen auch Kohlendioxid benötigt. Als Wasserstoffspender gelten anorganische Verbindungen, wie Schwefelwasserstoff (H_2S) oder Ammoniak (NH_3). Energie für die Mikroorganismen wird durch die Oxidation dieser Verbindungen sichergestellt. Als wichtigster Wasserstoffspender gilt jedoch freies H_2O , das durch Enzyme zu Wasser- und Sauerstoff gespalten wird. Wie bereits erwähnt wird Energie an der Oberfläche durch Sonneneinstrahlung bereitgestellt, im Inneren durch die Gewinnung von ATP.

Neben Enzymen zur Spaltung von Wasser, bilden fakultative Anaerobier auch das Coenzym NADP, welches den gebildeten Wasserstoff aufnimmt. Durch den Abbau der proteinreichen Fraktion werden Stoffe, wie HS und NH_2 gebildet, welche durch das gebildete NADPH weiter reduziert werden zu NH_3 und H_2S . Diese Verbindungen bilden wichtige Reaktionsstoffe in der mikrobiellen Carbonisierung.

Ein weiterer wichtiger Prozess innerhalb der MC-Miete ist die Reaktion von CO_2 zur Ameisensäure (HCOOH), welche nach Witte den Grundbaustein für die Humusentstehung bildet. Zusätzlich findet nach Witte auch Milchsäuregärung in den Mieten statt.

2.6.3.1 *Chemoautotrophe Ernährungsweise*

Als Chemolithotrophie wird jene Energiegewinnung bezeichnet, in der reduzierte Mineralien als Elektronendonatoren dienen können. Dadurch unterscheidet sie sich zur Organotrophie, bei der Energie aus dem Abbau organischer Verbindungen gewonnen wird. Lithotrophe Mikroorganismen (v.a. Bakterien und Archaeen) sind nicht auf organische Kohlenstoffquellen angewiesen, sondern bauen Biomasse durch die Fixierung von CO_2 auf (Insam, 2002).

In der mikrobiellen Carbonisierung erfolgt eine chemolithotrophe Ernährung im Inneren der Miete durch Archaeen, wobei Kohlendioxid (CO_2) und Schwefelwasserstoff (H_2S) zu organischen Verbindungen synthetisiert (Ameisensäure) werden. Die Energie erhalten die Mikroorganismen durch die Abspaltung des Wasserstoffs vom Schwefel. Durch den im MC-Kompost ebenfalls vorkommenden Schwefel, soll in der Anwendung auch eine Resistenz der Pflanzen gegenüber pathogenen Pilzen oder Blattläusen sichergestellt werden.

Nach Witte (o.J.a) ist im Mieteninneren auch Nitrat (NO_3) nachweisbar. Der Sauerstoff hierfür wird durch die Spaltung von Wasser zur Verfügung gestellt. Neben Nitrat reichert sich auch Ammoniak an. NH_3 soll im Zuge der Chemosynthese ebenfalls oxidiert werden, wodurch wiederum Nitrat und elementarer Stickstoff (N_2) entstehen. Darüber hinaus führt der Ammoniak durch die Bildung von Amidstickstoff (NH_2) zur Bildung von Aminosäuren, die wiederum an der Huminstoffbildung beteiligt sind.

Nach Witte (o.J.a) zeichnet sich der MC-Kompost durch hohe Kohlenstoffgehalte (TC) aus, da Kohlenstoffmonoxid, Kohlenstoffdioxid und Methan von Bakterien innerhalb der Miete assimiliert werden und somit der Kohlenstoff in gebundener Form vorliegt.

2.6.4 Eigenschaften und Verwendung eines MC-Komposts

Die in der MC-Miete gebildeten Huminstoffe gelten als auswaschbar. Huminstoffe sind nach Witte in dem aus den Mieten austretenden Sickerwasser vorhanden. Durch die Ausbringung auf landwirtschaftlichen Flächen, geht der MC-Humus schnell Verbindungen mit der Bodenmatrix ein.

Soll der MC-Kompost ausgebracht werden, haben sich nach den Erfahrungen von Witte ca. 20 t MC-Kompost pro ha auf Böden mit durchschnittlicher Qualität bewährt. Die Ausbringungsmenge ist dabei immer abhängig von den unterschiedlichen Standortbedingungen und der Qualität des Komposts. Der aufgebrauchte Kompost soll hierbei raschest mit einem Grubber bei ca. 15 cm in den Boden eingearbeitet werden.

Der größte Unterschied zu herkömmlicher Kompostanwendung ergibt sich bei der Verwendung von MC-Kompost dadurch, dass nach der Einarbeitung, genauso wie bei der Herstellung des MC-Komposts, reduktive Verhältnisse sichergestellt werden müssen. Durch die abrupte Luftzufuhr in den Boden würden Nährstoffe oxidiert und stünden dadurch nicht mehr für das Pflanzenwachstum zur Verfügung. Es kann zu einem oxidativen Stress kommen, der zu Schädigungen bzw. Mangelerscheinungen bei Kulturpflanzen führen kann. Nach Witte ist deshalb ein Walzen des Bodens nach dem Einbringen des MC-Komposts notwendig. Das Argument der Entstehung von Lachgas bzw. molekularem Stickstoff durch Denitrifikation, was durch die anoxischen Rahmenbedingungen gegeben ist, ist für Witte bei der Verwendung des MC-Komposts nicht geltend zu machen, da ausreichend Reduktionskraft in Form von NADPH gegeben ist, um Nitrat zu Ammonium zu reduzieren. Die mikrobielle Carbonisierung, die damit verbundene Bildung von Carbonylgruppen und Reduktionskraft (NADPH), führen nach Witte dazu, dass ein Überschuss an Stickstoff mikrobiell gebunden wird und somit nicht ins Grundwasser abfließt. Durch diesen Nährstoffanstieg kommt an den Grenzflächen des A- zu B-Horizonts zu einer vielfältigen Ansammlung verschiedenartigster Mikroorganismenarten. Besonders gefördert werden jene Organismen, die keinen Sauerstoff benötigen, sondern ihre Energie aus Nitrat nutzen und dadurch die Auswaschung verhindern. Besagte Mikroorganismen werden in jenen Bodentiefen nicht von photosynthetischen Stoffwechselprodukten versorgt und sind aus diesem Grund auf Nährstoffe, wie Aminosäuren, Ameisensäuren oder Formiate, aus dem Sickerwasser angewiesen (Witte, o.J.b).

Nach Witte kann aus den Ergebnissen der durchgeführten Versuche mit der MC-Kompostierung, auf eine neue Definition von Humus geschlossen werden, die aber bisher wissenschaftlich nicht verifiziert wurde: *„Humus ist eine Form des Kohlenstoffs, die auf eine rein pflanzliche Entstehung zurück geht und unter anoxischen Bedingungen von Bodenbakterien als cometabolischer Reststoff von Biomassen gebildet wird.“* (Witte, o.J.a)

2.6.5 Ökologischer Mehrwert eines MC-Komposts

Nach Witte kann die mikrobielle Carbonisierung als Basis für eine ökologische Nahrungsmittelproduktion gesehen werden, die ein gesundes Pflanzenwachstum mit höheren Erträgen in der Landwirtschaft bieten kann. Durch den Einsatz des MC-Komposts wird der Gebrauch von Chemikalien reduziert und die Verwendung von Mineraldünger ist nicht mehr erforderlich. Die MC-Kompostierung ist seiner Meinung nach als effiziente Maßnahme zur erfolgreichen Verwertung organischer Abfallstoffe anzusehen. Sie ist eine Alternative zur gängigen Biomasseverwertungen, wie der konventionellen Kompostierung. Die mikrobielle Carbonisierung kann nach Witte als Gegenmodell für Verfahren gesehen werden, die eine starke Mineralisierung biogener

Masse unter starker Freisetzung von Energie fördern. Durch die Nutzung von frei lebenden Boden-Mikroorganismen soll das Material in ein stabiles, kohlenstoffreiches Material übergeführt werden. Hauptziele des Verfahrens sind die Verbesserung der physikalischen und chemischen Eigenschaften der Böden, höhere Wasserspeicherkapazität und bessere Nährstoffverfügbarkeiten (Witte, o.J.b).

3. Versuchsdurchführung und Analysemethoden

Nachfolgend werden die Versuchsdurchführung, sowie die zur Analyse des Rottegutes angewendeten Untersuchungsmethoden beschrieben. Anfangs wird auf die Vorgehensweise beim Aufbau der Mieten eingegangen. Danach werden die laufenden Entnahmen der Kompostproben, sowie die Untersuchungen vor Ort erläutert. Darauffolgend finden sich Kapiteln mit der Probenaufbereitung und der Beschreibung der Laboranalysen wieder.

3.1 Ausgangsmaterialien

Wie in Kapitel 1.1 bereits erläutert, standen für die Versuchsdurchführung verschiedene Ausgangsmaterialien zur Verfügung (Bild 1 bis 4). Dabei handelte es sich um:

- Karotten
- Stallmist
- Grün-/Strauchschnitt
- und Zwiebeln



Bild 1: Karotten



Bild 2: Stallmist



Bild 3 Grün- und Strauchschnitt geschreddert



Bild 4: Zwiebel

Diese Ausgangsmaterialien sind in bestimmten Mischverhältnissen (Tab. 3) aufgesetzt worden, um v.a. den Einfluss der Zwiebel auf den Rotteprozess und Kompostqualität zu ermitteln.

Tab. 3: Mischverhältnisse der Abschnitte A bis D

	Abschnitt A		Abschnitt B		Abschnitt C		Abschnitt D	
	m ³	Vol%						
Grünschnitt	4,5	43	4,5	43	4,5	43	1,1	11
Pferdemist	4,5	43	4,5	43	4,5	43	4,5	44
Karotten	1,5	14	1,5	14	1,5	14	2,3	22
Zwiebel	-	-	1,1	10	2,3	18	2,3	22
Summe	10,5	100	11,6	110	12,8	118	10,1	100

3.2 Versuchsaufbau

Das Aufsetzen der beiden zu vergleichenden Mieten erfolgte am 17. April 2018. Die Dimensionen (Höhe ca. 1,3 m; Breite Mietenfuß ca. 1,5 m) der konventionellen Kompostmiete (KK-Miete) ergaben sich aus dem zur Verfügung stehenden Umsetzgerät. Die Veränderung der Mietenhöhe wird in Kapitel 4 erläutert. Die „mikrobielle Carbonisierungsmiete“ (MC-Miete) wurde entsprechend den Angaben von Witte aufgesetzt. Die Mieten bestanden aus jeweils 4 Abschnitten mit der oben beschriebenen Zusammensetzung.

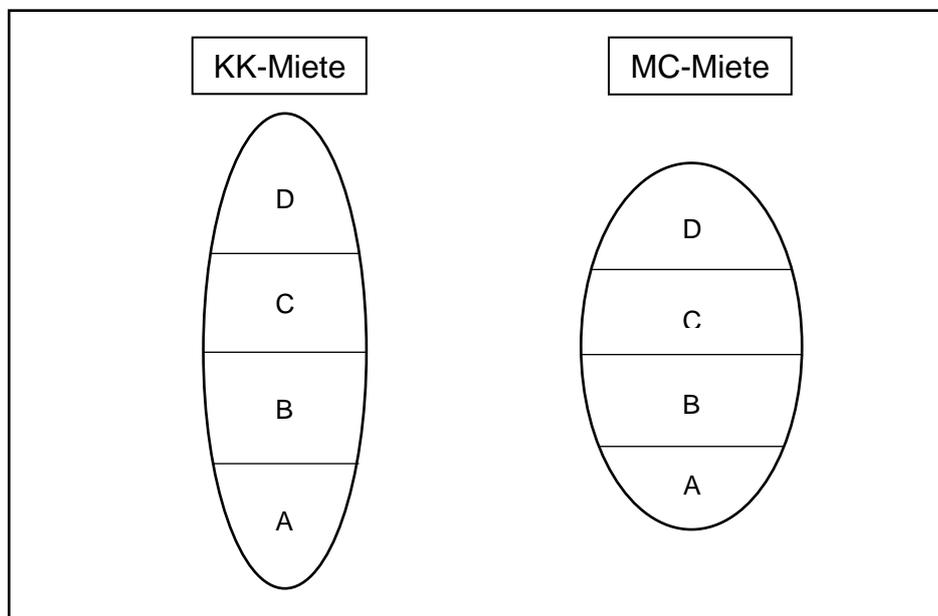


Abb. 2: Schematische Darstellung der beiden Vergleichsmieten mit den Abschnitten A, B, C und D

Zusätzlich zu den willkürlich gewählten Mischungsverhältnissen (0, 10, 18 % Zwiebeln) in den Abschnitten A, B und C wurde auf Wunsch ein zusätzlicher Abschnitt (D mit 22 % Zwiebeln) hinzugefügt. Grund dafür war das Anliegen, ein Mischverhältnis zu

wählen, welches erlaubt die gesamte anfallende Zwiebelmenge mit einem Minimum an zusätzlich aufzuwendenden Materialien zu verarbeiten. Dementsprechend wurde den Mieten ein weiterer Abschnitt (D) mit möglichst geringen Anteilen an Grün- und Strauchschnitt hinzugefügt.

Die Versuche fanden am Standort der Zehetbauer Fertigrasen GmbH & Co KG in 2301 Probstdorf, Niederösterreich statt.

3.3 Vorgehensweise beim Aufsetzen

Am 17. April 2018 fand das Aufsetzen der Abschnitte für die KK-Miete und MC-Miete statt. Die drei Abschnitte der MC-Miete wurden zunächst noch nicht zur fertigen MC-Miete, das heißt zu einer zirka zwei Meter hohen Trapezmiete aufgesetzt und verdichtet, da eine bestimmte Zelldichte der am Prozess beteiligten Mikroorganismen zu gewährleisten ist. Dadurch befindet sich „die Mikrobiologie“ in der "exponentiellen Wachstumsphase" (log - Phase). Diese Phase der Vorrotte soll das Auflösen der Pflanzenzellstrukturen, einleiten. Um den Vorgang zu fördern und einen günstigen Wassergehalt zu gewährleisten, wurden alle Abschnitte mit insgesamt drei Güllefässern (insgesamt rund 15 m³) Wasser befeuchtet. Eine Zerkleinerung der Ausgangssubstrate, wie von Witte empfohlen, konnte nicht bewerkstelligt werden und würde unter Praxisbedingungen am Standort auch nicht durchgeführt werden.

Am 18. April 2018 wurden die drei zur Vorrotte aufgesetzten Abschnitte der MC-Miete nochmals mit einem Güllefass Wasser bewässert, um die Mazeration zu begünstigen und den erforderlichen Wassergehalt zu erreichen.

Folgende Bilder sollen einen Überblick über die Vorgehensweise beim Aufsetzen der Mieten geben.



Bild 5 zeigt das Hinzufügen des Pferdemists auf die erste Schicht Grün- und Strauchschnitt.

Bild 5: Aufsetzen des Pferdemists auf den Grünschnitt



Nach dem Pferdemist wurden entsprechend dem Mischverhältnis die Karotten hinzugefügt.

Bild 6: Hinzufügen der Karotten



Auf dem Bild 7 ist die Zugabe von Zwiebeln auf den jeweiligen Abschnitten (B und C) zu erkennen.

Bild 7: Hinzufügen der Zwiebeln



Bild 8 zeigt die Vermischung der Ausgangsmaterialien durch das Umsetzgerät, um eine geeignete Homogenisierung des Kompostrohsubstrats zu gewährleisten. Auch die MC-Abschnitte wurden zu Beginn durchmischt. Danach wurden sie bis zum Aufsetzen zur fertigen MC-Miete liegen gelassen.

Bild 8: Homogenisierung des Ausgangssubstrats durch Mischung mit dem Umsetzgerät



Die Bewässerung der Mieten wurde mit einem Güllefass durchgeführt.

Bild 9: Bewässerung der Mieten mittels Güllefass

Am 20. April 2018 wurde das Aufsetzen der MC-Miete abgeschlossen. Dabei wurde das Vorrottematerial nochmals mit einem Güllefass Wasser befeuchtet. Nach dem Aufsetzen der fertigen MC-Mietenabschnitte, fand eine erste Messung der Mietenporenluft statt, um sicherzustellen, dass sich ein O_2 -Gehalt von unter 2 Vol% in der Miete einstellt. Der Sauerstoffgehalt lag dabei nach rund einer halben Stunde nach Aufsetzen bei 1,1 Vol%, der Kohlendioxidgehalt bei 16 Vol%.

Bild 10 und 11 zeigen das Aufschütten und Verdichten der MC-Mietenabschnitte mithilfe eines Radladers.



Bild 10: Aufschütten des Vorrotte-MC-Materials zu ca. 2 m hohen Trapezmiete



Bild 11: Verdichten der MC-Miete mittels Radlader

Am selben Tag wurden auch die Abschnitte D aufgesetzt. Die Fertigstellung dieses Abschnittes zu einer MC-Miete (von Vorrotte auf Aufschüttung + Verdichtung) fand am 5. Mai statt.

3.4 Probenahme

Tabelle 4 liefert eine Übersicht über den Versuchsverlauf (Probenahmen, Messungen vor Ort, Um- bzw. Aufsetzen, Bewässerung und Erhöhung der Mietenabschnitte mittels Radlader).

Tab. 4: Zusammenfassung des Versuchsverlaufs vor Ort

Tag	Woche	Probenahme	Messungen	Um-/Aufsetzen	Bewässerung	Erhöhung der Mietenabschnitte	Anmerkungen
17.04.18	0			x	x		Beginn des Versuchs; aufsetzen der Mieten
18.04.18	0	x	x	x	x		Beprobung: jeweils zwei Mischproben aus den Abschnitten A der Mieten

20.04.18	0		x	x	x		Aufschütten und Verdichten der MC-Abschnitte (A, B & C)+ aufsetzen der Abschnitte D
23.04.18	1		x	x			
25.04.18	1	x	x	x	x		
04.05.18	2	x	x	x	x		Aufschütten und Verdichten des MC-Abschnitts D
09.05.18	3	x	x	x			
18.05.18	4	x	x	x	x		
23.05.18	5		x	x	x		
30.05.18	6			x	x		Messgerät für Porenluft defekt
07.06.18	7	x	x	x		x	Mietenabschnitte der konv. Miete wurden mittels Schaufel erhöht
13.06.18	8		x	x		x	Mietenabschnitte der konv. Miete wurden mittels Schaufel erhöht
21.06.18	9		x	x	x	x	ab diesem Tag wurden die Mietenabschnitte immer mittels Radlader erhöht
27.06.18	10	x	x	x	x	x	
04.07.18	11		x	x	x	x	zusätzlich FID Messung
10.07.18	12			x		x	
18.07.18	13	x	x	x	x	x	
	14						
01.08.18	15		x	x	x	x	
	16						
13.08.18	17	x	x				Endmessungen; jeweils zwei Mischproben beider Mieten aus Abschnitten A, B und C und eine Mischprobe aus Abschnitten D

Am 18. April wurden aus dem Ausgangssubstrat beider Mieten jeweils zwei Mischproben entnommen. Sowohl Ausgangs- als auch Zwischenproben wurden nur aus den Abschnitten A der beiden Mieten entnommen. Anfangs wurden wöchentlich,

später in größeren Zeitabständen, jeweils 3 Einzelproben aus der KK-Miete entnommen. Um die Milieubedingungen in der MC-Miete möglichst wenig zu stören, wurden aus dieser im Abstand von ca. 3 Wochen nur jeweils zwei Einzelproben entnommen.

Das Umsetzen der KK-Miete erfolgt jeweils nach den Probenahmen bzw. nach den Temperatur- und Porenluftmessungen mithilfe eines gezogenen Umsetzgeräts. Zusätzlich erfolgten Temperatur- und Porenluftmessungen jeweils eine Stunde nach jedem Umsetzvorgang. Falls erforderlich wurde vor dem Miete bewässert, wobei gleichzeitig auch eine Bewässerung der MC-Miete erfolgte.

Die Proben aus der konventionellen Miete wurden mithilfe einer Hacke aus dem Mieteninneren entnommen und zum Transport in einen ca. 10 Liter fassenden Kunststoffkübel abgefüllt

Aufgrund der starken Verdichtung der MC-Miete, bzw. um deren Milieubedingungen möglichst wenig zu stören, wurden die Entnahmen der Einzelproben mittels Erdbohrer durchgeführt. Hierfür wurde der Abschnitt A der Miete nochmals in drei vertikale Abschnitte unterteilt. Die ersten beiden Einzelproben wurden dann zunächst aus dem linken Abschnitt entnommen, die zweiten Einzelproben aus dem rechten Abschnitt und die dritte Beprobung aus dem mittleren Abschnitt. Die erste Einzelprobe wurde dabei oberhalb der zweiten entnommen (Abbildung 3 und Bild 12).

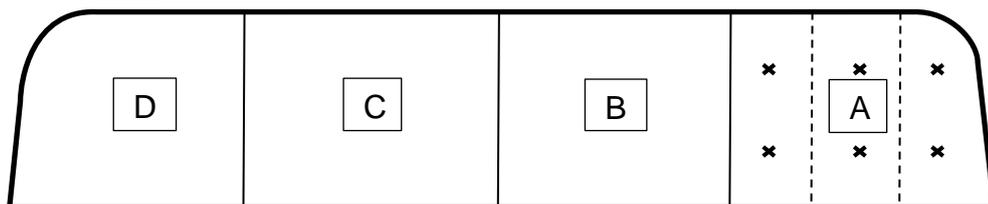


Abb. 3: Unterteilung des Abschnitts A der MC-Miete für die Entnahme der beiden Einzelproben während des Versuchsverlaufs



Bild 12: Entnahme der Einzelprobe aus der MC-Miete mittels Erdbohrer

Zu Versuchsende wurden, wie bei den Anfangsproben, jeweils zwei Mischproben aus den einzelnen Abschnitten A, B und C beider Mieten entnommen. Aus den D-Abschnitten wurde jeweils nur eine Endmischprobe entnommen.

3.5 Laufende Untersuchungen vor Ort

Über die gesamte Versuchsdauer wurden in allen Abschnitten die Rottetemperatur und die Mietenporenluftzusammensetzung gemessen. Dabei wurden pro Abschnitt an drei verschiedenen Stellen eines Abschnitts eine Temperaturmess- und eine Gasprobenentnahmelanze platziert. Durch das Ansaugen der Mietenporenluft wurden Sauerstoffkonzentrationen elektrochemisch, Kohlendioxid- und Methankonzentrationen mittels Infrarot bestimmt.

Bild 13 zeigt den Einsatz der beiden Messlanzen. Durch den Verbindungsschlauch wird die Mietenluft über die Lanze in den Detektor des Messgerätes geleitet.



Bild 13: Mietenporenluft- und Temperaturmessung mithilfe von Messlanzen

3.5.1 Methanemissionsmessung mittels FID

Zur Abschätzung der aus den beiden Mieten austretenden Methanemissionen, wurde an einem Tag eine Methanmessung an der Mietenoberfläche mittels Flammenionisationsdetektor (FID) durchgeführt. Dabei wurde über einen Messtrichter die Mietenabluft unmittelbar über der Materialoberfläche angesaugt und mit einem Trägergasstrom zu einer Knallgasflamme geleitet, wo es zu einer thermischen Ionisierung kommt. Die dabei entstehenden Elektronen werden aufgefangen und über einen Detektor analysiert. Da der Elektronenstrom direkt proportional zur Methankonzentration ist, kann durch die Detektion direkt auf die Konzentration geschlossen werden. Dies erlaubt einen qualitativen Vergleich der beiden Verfahren.

3.6 Probenaufbereitung

Die Proben wurden zunächst auf eine Korngröße von < 20 mm geshreddert. An der frischen Laborprobe wurden alle Parameter bestimmt für die keine vorherige Trocknung erlaubt ist (Trocknen würde die Ergebnisse verfälschen). Die frischen

Laborproben wurden zur Stabilisierung eingefroren, sofern eine sofortige Analyse nicht möglich war.

Neben der Ermittlung des Wassergehalts der Probe bei 105°C, wurde bei der Anlieferung der Probe auch eine Laborprobe zur Lufttrocknung angesetzt. Danach erfolgte die Zerkleinerung und Homogenisierung des Materials. Da die Proben auf Huminsäuregehalt analysiert werden sollten, wurden die luftgetrockneten Proben mithilfe einer Scheibenschwingmühle gemahlen und auf < 0,63 mm gesiebt. Das Mahlen mit der Scheibenschwingmühle hat den Vorteil, dass die Temperaturen bei der Zerkleinerung niedriger gehalten werden können, als beispielsweise bei der Schneid- oder Zentrifugalmühle. Darüber hinaus besteht keine Gefahr der Kontamination der Proben durch Metallwerkzeuge.

3.7 Untersuchungsparameter

Folgende Parameter wurden nach den Analysemethoden des Instituts für Abfallwirtschaft analysiert.

3.7.1 Wassergehalt

Wie bereits erwähnt, wird zur Bestimmung des Wassergehalts (WG) die frische Laborprobe bei 105 °C getrocknet, solange bis keine Gewichtsreduktion der Probe mehr feststellbar ist. Für die Bestimmung werden 500 – 1000 g der Frischprobe auf eine zuvor ausgewogene Aluminiumtasse gefüllt. Die Auswertung erfolgt nach folgender Formel:

$$WG \text{ (in \% FM)} = 100 * \frac{(\text{Einwaage}_{\text{feucht}} - \text{Einwaage}_{\text{trocken}})}{\text{Einwaage}_{\text{feucht}}}$$

Das Ergebnis wird in Prozent Feuchtmasse angegeben. Beim gegenständlichen Versuch wurde eine Einzelbestimmung jeder Probe durchgeführt.

3.7.2 Ammoniumstickstoff

Die Aufbereitung der Probe für die Messung des Ammoniumstickstoffs erfolgt zunächst durch Herstellung eines Eluats aus der Frischprobe. Dabei werden 100 g Frischprobe (darf zur Stabilisierung eingefroren werden, wenn keine unmittelbare Elution erfolgen kann) mit einem Liter Deionat für zwei Stunden auf dem Überkopfschüttler eluiert. Danach erfolgt die Filtration von 50 – 100 ml des Extrakts durch ein Faltenfilter. In dem hergestellten Eluat wird auch der pH-Wert gemessen.

Die Bestimmung des Ammoniumstickstoffs wird photometrisch nach DEV 38406 Teil 5 (Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung – Kationen (Gruppe E) – Bestimmung des Ammonium-Stickstoffs) durchgeführt. Für die Messung ist zunächst eine Kalibrationsgerade (siehe Anhang) mit Standardlösungen und daraus resultierenden Extinktionen zu bestimmen.

Bei der Durchführung der NH₄-N Bestimmung werden 25 ml des Eluats mit 2ml Salicylat-Citrat-Lösung und 2 ml NaOH-Reagenz gemischt und nach einer Stunde photometriert. Durch die Reaktion der Lösungen entsteht ein smaragdgrüner Farbstoff, der bei 655 nm (VIS) photometriert wird. Bei hohen Ammoniumkonzentrationen müssen die Proben entsprechend verdünnt werden. An Hand der Extinktion der

Probenlösung kann durch Vergleich mit der Kalibrationskurve die Konzentration an $\text{NH}_4\text{-N}$ berechnet (unter Berücksichtigung der gewählten Verdünnung) werden. Die Berechnung des Ammoniumstickstoffs erfolgt nach folgender Formel:

$$\text{NH}_4 - \text{N} \left[\frac{\text{mg}}{\text{kg}} \text{TM} \right] = \frac{c \left[\frac{\text{mg}}{\text{l}} \right] * V * 100000}{\text{EW} * (100 - \text{WG})}$$

c...Konzentration $\text{NH}_4\text{-N}$

V...Verdünnung

EW...Feuchtmasseneinwaage (= 100 g)

TM...100-WG

Jede Probe wird doppelt bestimmt.

3.7.3 Nitratstickstoff

Die $\text{NO}_3\text{-N}$ Bestimmung erfolgt im gleichen Extrakt, wie die Ammonium-Stickstoff Bestimmung. Dabei wird nach der DEV D9 DIN 38405 Teil 9 (Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Anionen (Gruppe D) - Teil 9: Photometrische Bestimmung von Nitrat) vorgegangen.

Für die Bestimmung werden 1 ml (verdünnt) des Probenextrakts in einem 25 ml Erlenmeyerkolben pipettiert und mit einer kleinen Spatelspitze Amidosulfonsäure vermischt, wodurch es zur Zerstörung von Nitrit kommt. Danach werden 8 ml Säuremischung (Schwefelsäure mit Phosphorsäure) und 1 ml Dimethylphenollösung beigelegt und nach 10 Minuten in Quarzküvetten bei 324 nm (UV) photometriert. Anhand der Extinktionen kann mithilfe einer Kalibrationsgerade (Anhang) auf die Konzentration geschlossen werden. Die Formel zur Berechnung der $\text{NO}_3\text{-N}$ Konzentration lautet:

$$\text{NO}_3 - \text{N} \left[\frac{\text{mg}}{\text{kg}} \text{TM} \right] = \frac{c \left[\frac{\text{mg}}{\text{l}} \right] * V * 10000}{\text{EW} * \text{TM}}$$

c...Konzentration $\text{NO}_3\text{-N}$

V...Verdünnung

EW...Feuchtmasseneinwaage (100 g)

TM...100-WG

Jede Probe wird doppelt bestimmt.

3.7.4 pH-Wert

Der pH-Wert wird wie erwähnt in der Extraktionslösung aus der Nitrat- und Ammoniumstickstoff Bestimmung durchgeführt. Dafür wird ein pH-Meter (WTW 531) verwendet, das automatisch auf 20 °C kompensiert. Zur Verwendung des Geräts muss eine Zweipunktkalibration bei neutralem (7) und basischem (9) pH-Wert bzw. bei sauren Lösungen bei neutralem (7) und saurem (4) pH-Wert durchgeführt werden. Danach erfolgt die Messung des pH-Werts des Extrakts. Jede Probe wird einfach bestimmt.

3.7.5 Leitfähigkeit

Die Leitfähigkeitsmessung erfolgt nach der ÖNORM S 2023 mit der luftgetrockneten, gemahlene Probe. Dabei sind mindestens 10 g der Probe in einem Verhältnis von 1:10 mit Deionat zu mischen und nach dreistündigem Über-Kopf-Schütteln zu filtrieren. Die Messung der Leitfähigkeit erfolgt mittels Konduktometer WTW LF 95. Jede Probe wird einfach bestimmt. Das Messgerät kompensiert die Temperatur automatisch auf 25 °C. Daher muss für eine Kompensation auf 20 °C das Ergebnis mit einem Faktor von 0,905 multipliziert werden.

3.7.6 Glühverlust

Die Bestimmung des Glühverlusts erfolgt nach der ÖNORM S 2023. Etwa 10 g der luftgetrockneten und gemahlene Analyseprobe werden in Porzellantiegeln nach langsamem Aufheizen im Muffelofen bei einer Temperatur von 550 °C verglüht. Dadurch wird die gesamte organische Substanz „verbrannt“. Vor dem Verglühen wird der Restwassergehalt der Proben durch dreistündiges Trocknen bei 105 °C im Trockenschrank bestimmt. Die Tiegel werden vor dem Wiegen sowohl nach der Restwassergehaltsanalyse, als auch nach dem Verglühen im Muffelofen in einem Exsikkator auf Raumtemperatur abgekühlt. Dadurch wird eine Feuchtaufnahme der Proben über die Luft vermieden. Jede Probe wird doppelt bestimmt. Der Glühverlust errechnet sich nach folgender Formel:

$$GV [\% TM] = \frac{(Einwaage\ trocken - Einwaage\ verglüht) * 100}{Einwaage\ trocken}$$

Falls es bei der Doppelbestimmung zu einer Abweichung eines Einzelwerts von mehr als $\pm 2,5\%$ vom Mittelwert kommt, ist die Analyse zu wiederholen.

3.7.7 Gesamtkohlenstoff und -stickstoff

Die Bestimmung des gesamten Kohlenstoffs (TC) wird mit dem CNS-Analysator VARIO-MAX durchgeführt. Dabei wird gleichzeitig der Gesamtstickstoff (TN) analysiert und zwar nach dem Verfahren nach Dumas.

Bei der Verwendung des VARIO-MAX wird die luftgetrocknete und gemahlene Analysenprobe bei 900 °C einer vollständigen trockenen Verbrennung unterzogen. Dabei wird der Zuluftstrom, bestehend aus Sauerstoff für die Verbrennung und Helium als Trägergas, mit Phosphorpentoxid getrocknet und von CO₂ befreit. Die Probe wird über einen automatischen Probengeber in den Verbrennungsraum eingebracht. Die Gase, die bei der Verbrennung der Probe entstehen und schlussendlich zur Detektion von C_{GES} und N_{DUMAS} verwendet werden, werden über ein Reduktionsrohr bei 830 °C gereinigt bzw. reduziert (NO_x zu N₂). Für die Reduktion des Gases enthält das Rohr Korundkugeln, die das Gas gleichmäßig verteilen, Wolframgranulat und Kupferoxid, die eine vollständige Verbrennung ermöglichen, einen Kupferdraht, mit dem das Gas reduziert wird und Silberwolle, die saure Nebenprodukte der Verbrennung bindet.

Nach der Reduktion wird das Verbrennungsgas zu einem CO₂-Absorber und einem Wärmeleitfähigkeitsdetektor (WLD) geleitet. Zunächst kommt es zur Detektion von Stickstoff. Danach wird der CO₂-Absorber auf 250 °C erhitzt, damit CO₂ desorbiert wird und ebenfalls mit dem WLD detektiert wird. Die Auswertung erfolgt über eine Steuerungssoftware, bei der die Ergebnisse von C und N in Prozent der TM angegeben werden. Insgesamt werden pro Probe 2 Wiederholungen durchgeführt, wobei die Abweichung vom Mittelwert nicht mehr als 5 % betragen darf.

Zur Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC), wird der anorganische Kohlenstoff (TIC), der durch Verbrennung des Glührückstands aus dem Muffelofen ermittelt wurde, vom TC subtrahiert. Die Formel zur Berechnung lautet:

$$TOC[\% TM] = TC[\% TM] - \frac{TIC \text{ im Glührückstand}[\%] * Glührückstand[\%]}{100}$$

3.7.8 Huminsäuren

Die Analyse von Huminsäuren wird durch die Extraktion von Humin- und Fulvosäuren nach der modifizierten Methode nach Danneberg durchgeführt (Gerzabek et. al, 1993).

Für die Bestimmung werden 10 g der Probe mit 50 ml einer 0,1 molaren Natriumpyrophosphatlösung über Nacht auf dem Überkopfschüttler extrahiert. Zur Herstellung des Ausgangsextrakts werden die 250 ml Behälter am nächsten Tag 20 Minuten bei 4.500 Upm zentrifugiert. Der Überstand wird danach noch einmal bei 13.500 Upm für 15 Minuten zentrifugiert. Der Überstand bildet das Ausgangsextrakt, welches in 100 ml Messkolben überführt und mit deionisiertem Wasser aufgefüllt wird.

Zur Bestimmung der Fulvosäurenfraktion (FS) werden 25 ml des Ausgangsextrakts mit 0,5 ml einer 37 prozentigen HCl-Lösung versehen und für fünf Minuten bei 8.000 Upm zentrifugiert, wodurch Huminsäuren (HS) durch den geringen pH-Wert ausfällen. Der Überstand wird in einen 50 ml Messkolben gefüllt und mit 0,6 ml einer 40 prozentigen NaOH-Lösung auf pH-Wert >10 angehoben. Der Messkolben wird danach mit einer Pufferlösung bis zur Marke aufgefüllt.

Die beiden Extraktionen (FS- und Ausgangsextrakt) werden bei 400 nm (VIS) photometriert und die optische Dichte ermittelt. Zur besseren Vergleichbarkeit werden die optischen Dichten auf 1 g organische Trockenmasse bezogen, weshalb der Restwasser- und Organikgehalt zur Berechnung erforderlich sind.

Die HS-Fraktion in der Probe wird rechnerisch ermittelt durch Subtraktion der Extinktion der FS-Fraktion von jener des Ausgangsextrakts.

Das Prozedere wird für jede Probe an 4 aufeinander folgenden Tagen durchgeführt, um eine möglichst vollständige Extraktion der Huminstoffe sicherzustellen (Gerzabek et. al, 1993).

3.7.9 FTIR-Analyse

Die Fourier Transform Infrarot (FTIR) Spektroskopie, dient zur Ermittlung funktioneller Gruppen von Molekülen und basiert auf der Wechselwirkung der Infrarotstrahlung mit Materie. Die funktionellen Gruppen werden dabei durch die Strahlung in Schwingung versetzt, wodurch Energie absorbiert wird. Die benötigte Energie kann durch Reflexionsbanden in einem Spektrum sichtbar gemacht werden. Durch die Infrarotspektren ist es möglich mithilfe von multivariater statistischer Verfahren (Modell InfraHUM des ABF-BOKU) den Huminsäurenanteil in der organischen Trockenmasse vorherzusagen (Böhm, 2009).

Das Vorhersagemodell InfraHUM beruht auf der Durchführung einer Regressionsanalyse. Dabei wurde die Beziehung zwischen der abhängigen Variable (den Huminsäuren) und einer oder mehreren Variablen (den Datenpunkten des Infrarotspektrums) durch die Auswertung von 360 Proben bestimmt (Meissl et. al, 2007).

3.7.10 Atmungsaktivität

Die Atmungsaktivität wird mithilfe eines Sapromats bestimmt. Die Untersuchung erfolgt an der Frischprobe < 20 mm. Zur Stabilisierung kann die Probe tiefgefroren (-22 °C) werden. Die gefrorene Probe wird über Nacht im Kühlschrank schonend aufgetaut und am nächsten Tag befeuchtet und über mehrere Stunden in Alu-Tassen an der Raumluft stehengelassen. Mikroorganismen können sich dadurch an die neuen Bedingungen adaptieren.

Der Sapromat besteht aus mehreren Komponenten:

- Steuergerät
- Wasserbad
- Messeinheit (Reaktionsgefäß, Sauerstofferzeuger und Schaltmanometer) und
- PC mit Auswertesoftware

Prinzip

Die Messanordnung befindet sich in einem 20 °C temperierten Wasserbad. Zur Analyse werden 30-40 g FM der Proben in das Reaktionsgefäß platziert. Die mikrobielle Stoffwechselaktivität innerhalb der Probe führt zum Verbrauch von O₂ und der Erzeugung eines äquivalenten Volumens an CO₂, welches im CO₂-Absorber durch darin befindliche NaOH-Plätzchen absorbiert wird. Dadurch entsteht ein Unterdruck, welcher von der Messeinheit detektiert werden kann. Das Reaktionsgefäß ist an einen Sauerstofferzeuger angeschlossen, dessen Aufgabe es ist eine Sauerstofffreisetzung aus der darin befindlichen CuSO₄-Lösung zu bewirken bis der Unterdruck ausgeglichen ist. Bei Unterdruck steigt die im Steigröhrchen befindliche Schwefelsäure an und schließt den Kontakt zwischen den Elektroden. Dadurch kommt es zur O₂-Erzeugung bis der Kontakt durch Druckausgleich aufgehoben wird. Je nach Reaktivität der Probe kann die Stromstärke je Impuls durch unterschiedliche O₂-Faktoren angepasst werden.

Aus der Probenmenge, der Stromeinschaltdauer (Impulszahl) und der Stromstärke (O₂-Faktor) kann das Steuergerät die Atmungsaktivität der Proben in mg O₂/l berechnen. Die Daten werden an die Auswertesoftware am PC übertragen und in EXCEL als Sauerstoffverbrauchskurven und Zahlenwerte angezeigt. Wichtig ist die Miteinberechnung von eventuell auftretenden lag-Phasen der Mikroorganismen (Adaptionsphasen) durch entsprechende Verlängerung der Versuchsdauer.

Jede Proben wird doppelt bestimmt. Kommt es zu einer Abweichung der Einzelwerte um mehr als 10 % vom Mittelwert, so ist der Versuch zu wiederholen oder der höhere Wert anzugeben.

3.7.11 Niedere Carbonsäuren

Aus dem Eluat, welches auch für die pH-Wert, Ammonium- und Nitratmessungen verwendet wird, sind 10 ml in ein Fläschchen zu pipettieren und zur Stabilisierung mit 2 ml 40 %-iger Phosphorsäure zu versehen. Das Fläschchen ist dadurch für einen längeren Zeitraum im Kühlschrank haltbar. Mittels Gaschromatographie (GC) wird die Probe auf niedere Carbonsäuren analysiert.

Dabei wird die Probe 1:20 verdünnt und ein kleiner Teil davon in ein Autosamplerfläschchen gefüllt. Zusätzlich wird ein Standard mit bekannten Carbonsäurekonzentrationen mitanalysiert. Durch Vergleich der Peakflächen von Standard und Proben erfolgt die Auswertung. Hierfür wird der Quotient aus der

Standardkonzentration und der Peakfläche gebildet und der Faktor zur Kalibration genutzt. Es erfolgt eine dreifach Bestimmung, worauf der Mittelwert in folgende Formel eingesetzt wird:

$$\text{Carbonsäure [mg/kg TM]} = \frac{1000}{100 - WG} * \left(\frac{6}{5}\right) * c[\text{mg/l}]$$

c...Messwert aus dem GC

Bestimmt werden: Essigsäure, Propionsäure, Buttersäure, Iso-Buttersäure, Iso-Valeriansäure und Valeriansäure.

3.7.12 Zusätzliche Untersuchungsparameter der Endproben

Zusätzlich zu den bereits erwähnten Untersuchungsparametern wurden bei den Endproben noch folgende Parameter untersucht.

3.7.12.1 Phosphor-Gesamt (P_{GES})

Für den Gesamtphosphoraufschluss werden ca. 0,7 g der luftgetrockneten und gemahlene Probe in Aufschlussgläser eingewogen und danach mit ca. 5 g Kaliumsulfat, 15 ml konzentrierter Schwefelsäure und 2 ml Quecksilbersulfakatalysator versehen. Die Aufschlussgläser werden daraufhin auf einem Heizblock drei bis vier Stunden bei rund 400 °C gekocht. Für jede Probe wird ein Doppelaufschluss hergestellt.

Aus dem daraus gewonnenen Aufschluss wird der Phosphorgehalt durch Photometrie (600 nm) bestimmt. Zur Feststellung der Konzentration ist eine Kalibrationsgerade (Anhang) notwendig. Berechnet wird der Phosphorgehalt mit der Formel (gilt für P_{CAL} und P_{GES}):

$$P [\% TM] = \frac{c \left[\frac{mg}{l}\right] * Vd * 10}{EW * TM}$$

c...errechnete Konzentration der Probe aus der Photometeranalyse

Vd...Verdünnung

EW...Feuchtmasseeinwaage in g FM/l

TM...Trockenmasse = 100 - Rest WG

3.7.12.2 Phosphor verfügbar (P_{CAL})

Für die Ermittlung des pflanzenverfügbaren Phosphors wird eine CAL (Calcium-Acetat-Lactat-Auszug)-Extraktionslösung hergestellt. Dabei werden 5 g der Probe eingewogen und 100 ml der CAL-Lösung zugegeben. Danach wird das Extrakt 2 Stunden lang durch "Überkopfschütteln" eluiert und danach filtriert. Die photometrische Analyse erfolgt analog zu P_{GES} .

3.7.12.3 Gesamtnährstoffgehalte an Kalium (K), Magnesium (Mg) und Kalzium (Ca)

Für die Ermittlung der Gesamtgehalte an K, Mg und Ca wird ein Königswasseraufschluss nach ÖNORM S 2023 bzw. nach Kompostverordnung durchgeführt. Dabei werden 2 g der Probe in Glaskolben (250 ml) eingewogen und mit Salzsäure (HCl) und Salpetersäure (HNO₃) im Verhältnis von 3:1 versetzt. Zusätzlich

werden Siedeperlen hinzugefügt. Auf die Glaskolben werden Rückflusskühler und Kühlfallen mit verdünnter Salpetersäure aufgesetzt und über Nacht stehen gelassen, damit die Probe ausreagiert. Am nächsten Tag wird die Probe unter Rückflusskühlung 2 Stunden gekocht. Ist der Aufschluss abgekühlt, wird er in Messkolben durch einen Faltenfilter filtriert und auf 100 ml aufgefüllt. Für jede Probe werden 2 Aufschlüsse hergestellt.

Die nachfolgende Ermittlung der Gesamtgehalte erfolgt mittels Ionenchromatographie (IC). Jeder Königswasseraufschluss wird doppelt bestimmt. Da auch jede Probe bereits zwei Mal aufgeschlossen wurde, werden diese durch die Detektion in der IC schlussendlich vierfach bestimmt. Die Konzentrationen der Nährstoffgehalte im Probenaufschluss werden durch die IC-Analyse in mg/l angegeben.

Angegeben werden die Nährstoffe in % TM. Die Berechnung lautet:

$$K, Mg, Ca [\% TM] = \frac{c \left[\frac{mg}{l} \right]}{EW * TM}$$

c...Konzentration aus der IC-Analyse

EW...Feststoffeinwaage

TM...100 – Rest-WG

3.7.12.4 *Verfügbares Kalium (K_{CAL})*

Verfügbares Kalium wird ebenfalls in einer CAL-Lösung (ÖNORM S 2023) durch die IC ermittelt. Jede Probe wird doppelt bestimmt. Die Berechnung in % TM lautet:

$$K_{CAL} [in \% TM] = \frac{c \left[\frac{mg}{l} \right]}{5 * TM}$$

c...Konzentration aus der IC-Analyse

5...Einwaage in CAL Lösung

TM...100 – Rest-WG

3.7.12.5 *Wasserkapazität*

Die Wasserkapazität wird nach der Hausmethode des ABF-BOKU durchgeführt und in % TM angegeben. Die Analyse erfolgt mit der frischen Kompostprobe und wird doppelbestimmt. Die Abweichungen von Mittelwert darf nicht mehr als 2,5 % betragen.

3.7.12.6 *Feuchtdichte*

Die Bestimmung der Feuchtdichte erfolgt nach der Kompostverordnung. Die Angabe erfolgt in kg FM/l. An jeder Probe wird einer Doppelbestimmung durchgeführt. Die Abweichung vom Mittelwert darf nicht höher als 5 % sein.

3.7.12.7 *Kresstest*

Der Kresstest wurde an acht ausgesuchten Endproben durchgeführt. Dabei wird nach der ÖNORM S 2023 vorgegangen. Die Frischprobe wurde auf kleiner 11,2 mm abgesiebt, wobei gleichzeitig auch die Masseanteile bestimmt wurden.

Pro Probe werden jeweils drei Parallelansätze mit einmal 15 % und einmal 30 % Probenanteil im Vergleichssubstrat durchgeführt. Diese werden mit drei Vergleichssubstratsansätze verglichen. Die maximale Abweichung der Pflanzenfrischsubstanz vom Mittelwert darf maximal $\pm 15\%$ betragen.

Folgende Ergebnisse werden angegeben:

- Keimrate in %, bezogen auf das Vergleichssubstrat
- Verzögerung der Keimdauer in Tagen, bezogen auf das Vergleichssubstrat
- Pflanzenfrischsubstanz (Biomasse) in %, bezogen auf die ermittelte Biomasse im Vergleichssubstrat

4. Ergebnisse und Interpretation

Tab. 5 zeigt die wichtigsten Parameter der beiden Ausgangsmischproben (Abschnitt A) beider Mieten. Die Proben wurden, wie bereits erwähnt, am Tag nach dem Aufsetzen genommen (18.04.1018) und zeigen, dass die Ausgangswerte (mit einer herkömmlichen Schwankungsbreite aufgrund der Materialheterogenität) vergleichbare Ergebnisse aufweisen

Tab. 5: Analysenergebnisse der untersuchten Ausgangsmaterialproben der Abschnitte A beider Mieten

Parameter	Dimension	KK-Miete		MC-Miete	
		Probe 1	Probe 2	Probe 1	Probe 2
Wassergehalt	[% FM]	45,2	49,1	52,0	49,7
pH-Wert	[-]	7,5	7,7	7,1	7,0
Essigsäure	[mg/kg TM]	240	2.000	3.000	2.200
Propionsäure	[mg/kg TM]	n.n.	1.200	n.n.	n.n.
Isobuttersäure	[mg/kg TM]	75	n.n.	n.n.	n.n.
Ammoniumstickstoff	[mg/kg TM]	240	270	360	230
Glühverlust	[% TM]	71,8	69,0	61,7	68,9
Organ. Kohlenstoff	[% TM]	37,2	36,8	31,7	36,3
Gesamtstickstoff	[% TM]	0,94	1,03	0,92	0,90
C/N	[-]	40	36	34	41
Atmungsaktivität	[mg O ₂ /g TM]	50,7	57,3	62,7	45,7

4.1 Kubatur und Veränderung

Die Abmessungen der Dreiecksmieten der Abschnitte der KK-Miete lagen zu Beginn des Versuchs bei jeweils ca. 13 Meter Länge und ca. 1,3 m Höhe. Die Höhen der Abschnitte A und D haben sich rasch verringert. Ab Woche 8 lag die Höhe bei Abschnitt A lediglich bei rund 65 cm, wodurch eine unzureichende Konvektionsströmung zu

befürchten war. Auch Abschnitte B und C wiesen nur mehr eine Höhe von rund 90 cm auf. Als Grund dafür kann das Alter des Umsetzgeräts gesehen werden, dessen Welle sich ca. 25 cm über dem Boden befindet. Dadurch konnte von Anfang an ein Teil des Ausgangssubstrates nicht mit dem restlichen Material vermischt werden und es blieb stets ein breiter werdender Streifen am Fuß der Miete übrig (Bild 14).



Bild 14: Nicht durchmischt
Material am Mietenfuß

Aus diesem Grund wurde ab Woche 9 jedes Mal nach dem Umsetzen und nach der zweiten Temperaturmessung (Messung eine Stunde nach Umsetzen) die Höhe der Mieten mittels Radlader vergrößert. Dabei wurde das seitlich liegende Material (dabei handelte es sich hauptsächlich um Grün- und Strauchschnitt, sowie Stallmist), welches bereits anfangs nicht durchmischt worden war, auf den Mietenfirst aufgebracht. Zusätzlich wurden in Abschnitt A und D, aufgrund der sehr niedrigeren Mietenhöhen, die Mietenlängen verkürzt, um die Mieten erhöhen zu können. Die Länge maß danach anstatt der ursprünglichen 13 m nur mehr rund 8 m.

Die MC-Miete wies pro Abschnitt eine Höhe von ca. 1,80 m auf, mit einer Sohlenbreite von ca. 2,3 m und einer Länge von ca. 4 m. Die Höhe änderte sich über die Zeit (durch mögliche Setzungen) nur minimal.

4.2 Rottetemperaturen

Die Verläufe der Mietentemperaturen der Abschnitte der beiden Mieten werden nachfolgend durch Grafiken dargestellt.

Abbildung 4 zeigt den Temperaturverlauf jeweils vor dem Umsetzvorgang der Abschnitte A, B, C und D der KK-Miete über die gesamte Versuchsdauer. Bei den einzelnen Punkten in der Grafik handelt es sich jeweils um den Mittelwert aus den drei Messstellen jedes Abschnitts.

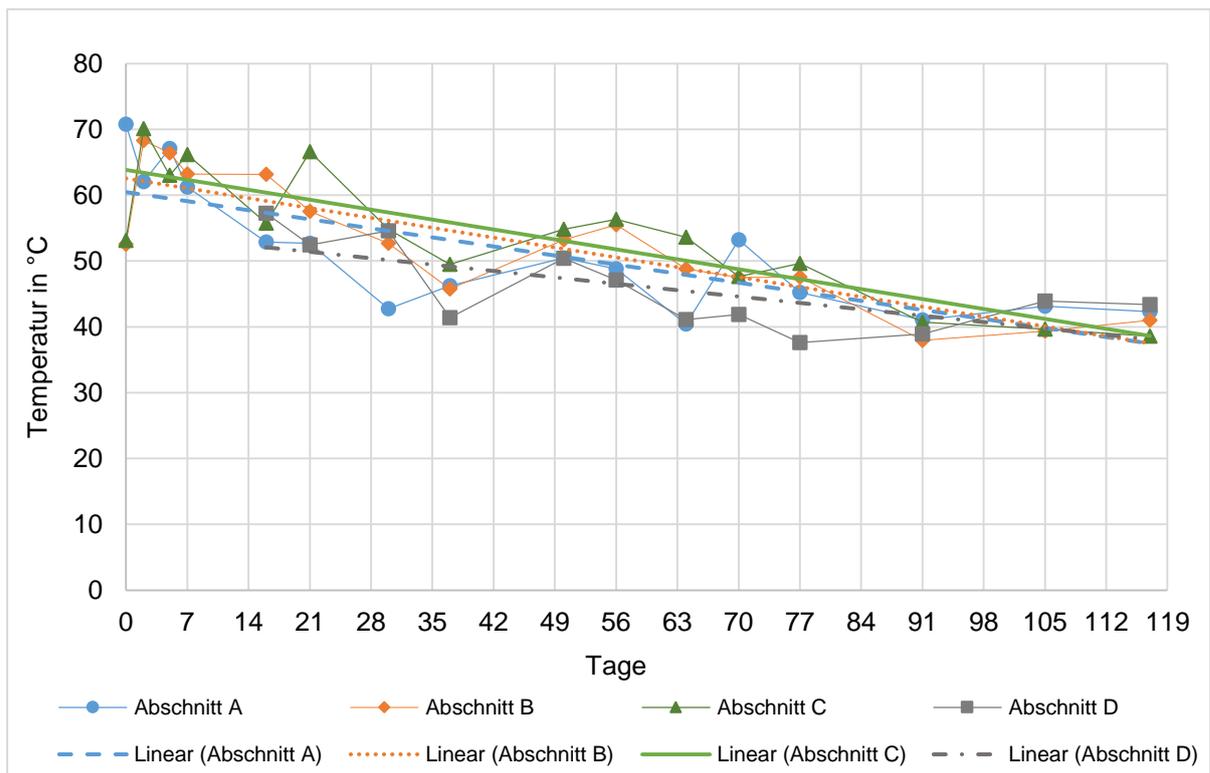


Abb. 4: Temperaturverlauf (MW) der Abschnitte A bis D der KK-Miete vor dem Umsetzvorgang

Die Temperaturverläufe der einzelnen Abschnitte weisen eine tendenzielle Abnahme der Wärmeproduktion und damit der biologischen Aktivität auf. Die anfänglichen hohen Temperaturen im Mieteninneren lassen auf eine starke mikrobielle Aktivität schließen, was auf die Umsetzung von schnell abbaubaren Kohlenstoffquellen zurückzuführen ist. Wesentliche Abweichungen in den Temperaturverläufen sind nicht zu erkennen, wodurch ein Einfluss der Zwiebel auf die mikrobielle Aktivität ausgeschlossen werden kann. Temperaturen über 55 °C über mehrere Tage zeigen, dass eine ausreichende Hygiensierung des Rotteguts gewährleistet wurde.

In Abbildung 6 wird der Temperaturverlauf der Abschnitte A, B, C und D der KK-Miete jeweils eine Stunde nach dem Umsetzen gezeigt. Die Trendgeraden (Ausnahme Abschnitt A nach dem Umsetzen) zeigen deutlich abnehmende Tendenzen. Demnach ist auch hier die abnehmende Wärmeproduktion erkennbar, wobei jedoch in Abschnitt A insgesamt nur eine sehr geringe Abnahme der Temperatur festzustellen ist. Dies kann durch die „Erhöhung“ der Miete (mit gleichzeitiger Verringerung der Abschnittslänge) ab Woche 9 erklärt werden. Durch das Hinzufügen von noch weniger abgebautem Material aus dem Mietenfußbereich und durch die Erhöhung des Mietenquerschnitts wurde einerseits der mikrobielle Abbau angeregt und andererseits Einfluss auf die Konvektionsströmung bzw. Wärmeverluste genommen. Negative Auswirkungen der Zwiebel sind nicht zu erkennen. Viel mehr lassen die Messdaten die Interpretation zu, dass durch einen Mehrgehalt an Organik in den Abschnitten B, C und D die Temperatur durch vermehrte mikrobielle Aktivität schneller zunimmt, als in Abschnitt A.

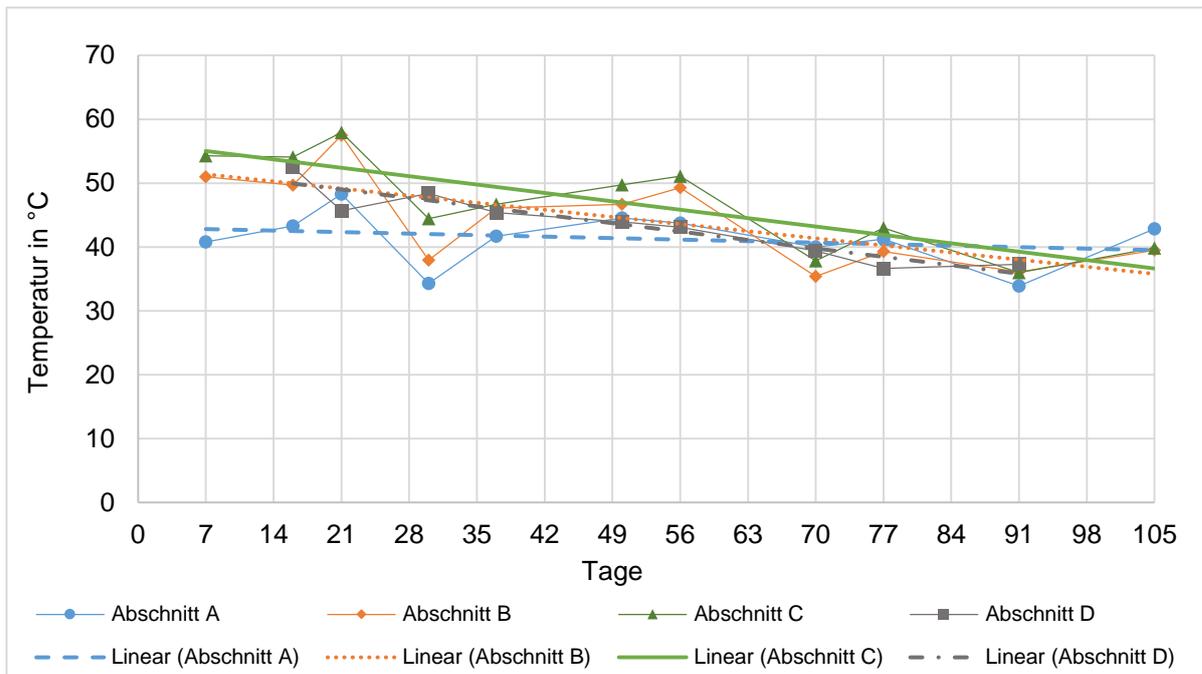


Abb. 5: Temperaturverlauf (MW) der Abschnitte A bis D der KK-Miete 1 Stunde nach dem Umsetzvorgang

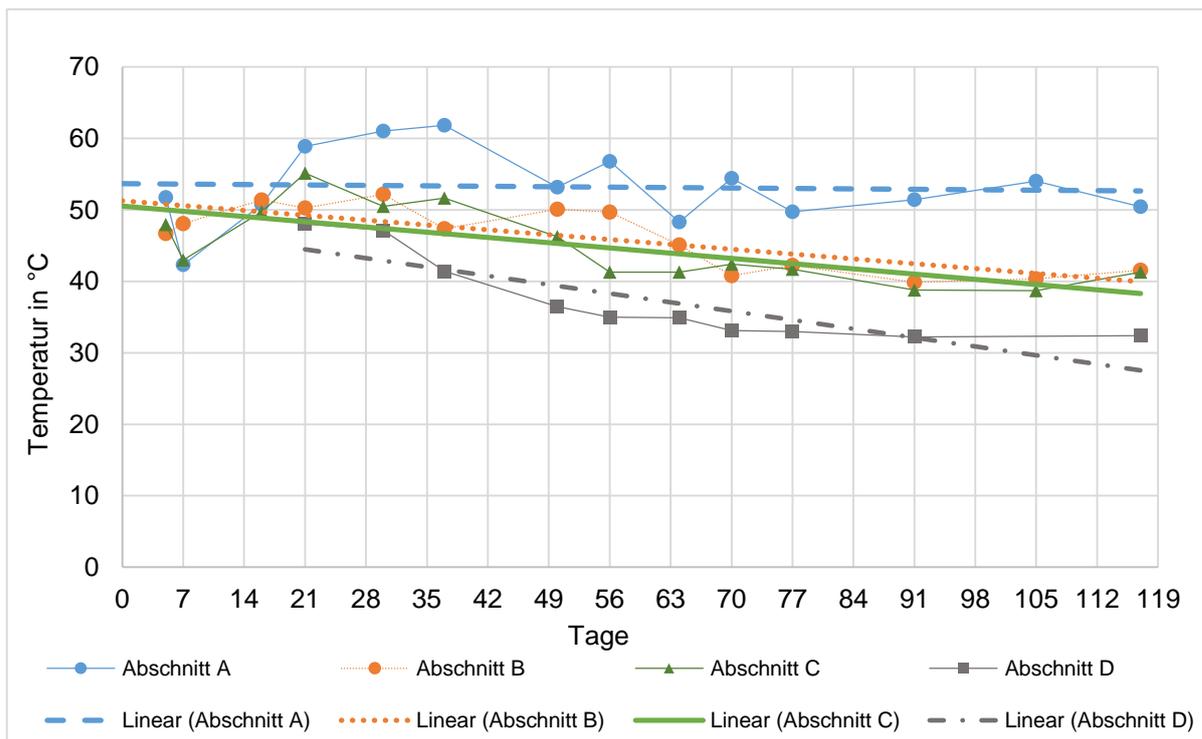


Abb. 6: Temperaturverlauf (MW) der Abschnitte A bis D der MC-Miete

Der Temperaturverlauf der MC-Miete (Abb. 5) zeigt ähnliche Tendenzen innerhalb der Abschnitte. Zu Beginn sind auch höhere Temperaturen feststellbar, die jedoch nicht an die Höchsttemperaturen der KK-Miete heran kommen. Abschnitt A beispielsweise weist über die gesamte Versuchsdauer nie Temperaturen über 50 Grad auf, wodurch eine ausreichende Hygienisierung nicht garantiert werden kann. Dies zeigt sich auch durch den dichten Bewuchs der MC-Miete (Kapitel 4.4). Eine abnehmende Temperatur

ist auch hier in Abschnitten B, C und D beobachtbar, während in Abschnitt A konstant Temperaturen festgestellt werden können. Auswirkungen der Zwiebel auf die mikrobielle Aktivität können auch in der MC-Miete ausgeschlossen werden.

4.3 Porenluftmessungen

Für eine ausreichende Sauerstoffversorgung der Mikroorganismen wird während der Kompostierung ein Sauerstoffgehalt von über 10 Vol% angestrebt (dies entspricht einem Kohlendioxidgehalt von unter 11 Vol%). Abb. 7 zeigt die CO₂-Messwerte der vier Abschnitte der KK-Miete jeweils vor dem Umsetzvorgang.

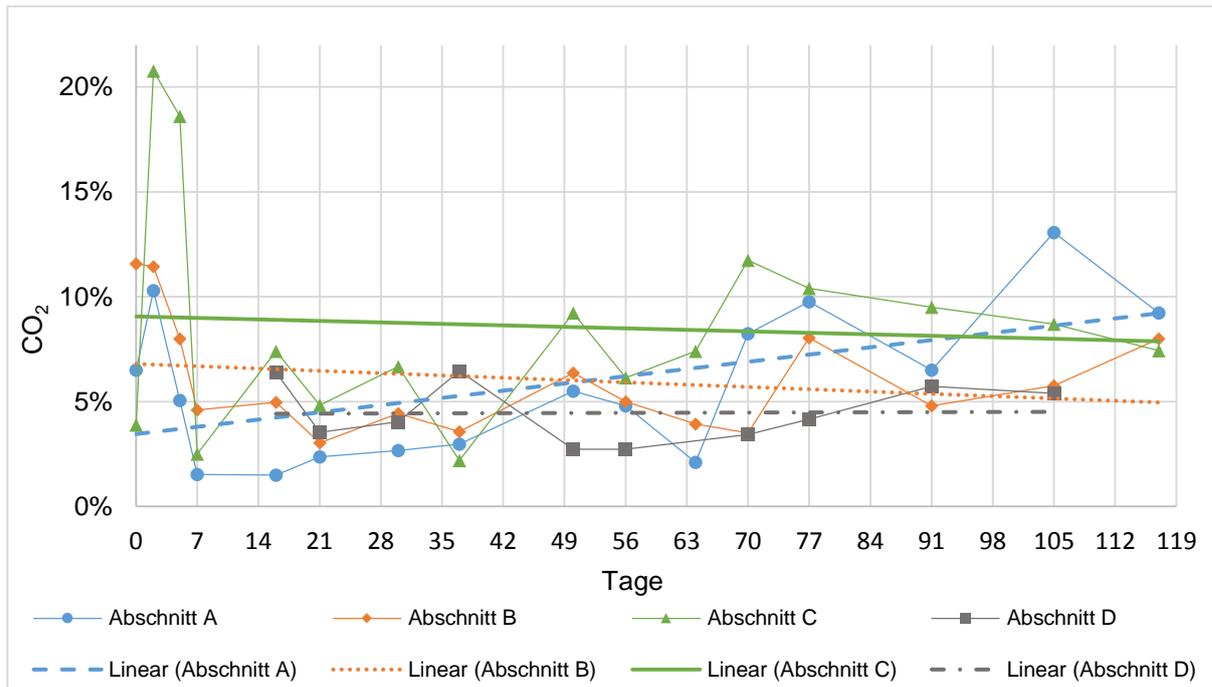


Abb. 7: Kohlenstoffdioxidkonzentrationen (MW) der Abschnitte A bis D der KK-Miete vor jedem Umsetzvorgang

Die Summe von Sauerstoffkonzentration und Kohlenstoffdioxidkonzentration hat über die gesamte Versuchsdauer stets um die 21 Vol% ergeben. Würde die Summe an CO₂ und O₂ 21 % deutlich übersteigen, wäre davon auszugehen, dass der Rotteprozess unter zumindest bereichsweise anaeroben Bedingungen verlief.

Während der ersten Phase der Intensivrotte sind in der KK-Miete vor dem Umsetzen (Abb. 7) hohe Konzentrationen an Kohlenstoffdioxid in den Abschnitten A, B und C zu erkennen. Dies ist auf die hohe Mineralisierungsrate der leicht verfügbaren Nährstoffquellen zurückzuführen. Die Messpunkte lassen eine stetige CO₂-Produktion in allen Abschnitten erkennen, was auf eine stetige Aktivität der Mikroorganismen bis zum Ende des Versuchs schließen lässt. Auffällig ist die gleichbleibende bzw. leicht ansteigende CO₂ Produktion über die Zeit in den Abschnitten. Dies kann wieder auf den Umstand zurückgeführt werden, dass ab Woche 9 die Mietenhöhen der Abschnitte erhöht wurden und bestätigt die Interpretation der Rottetemperaturen. Die stetige Produktion von CO₂ in den Abschnitten B, C und D lässt auf keine negativen Auswirkungen der Zwiebeln auf die mikrobielle Aktivität schließen.

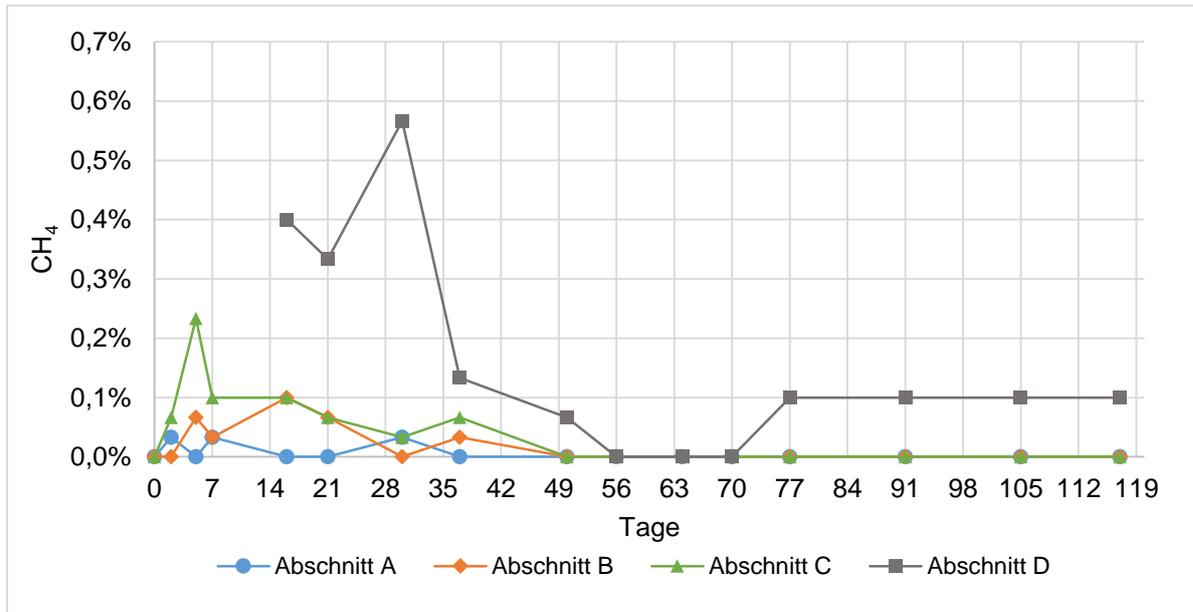


Abb. 8: Methankonzentrationen (MW) der Abschnitte A bis D der KK-Miete

Die Abbildung 8 zeigt die Methanverläufe in den Poren der KK-Miete. Zu Beginn wurden geringe Mengen an Methan detektiert, was auf bereichsweise anaerobe Prozesse schließen lässt. Dies kann zu Beginn der Intensivrotte kaum verhindert werden. Abschnitt D zeigt etwas höhere Methangehalte (bis zu 0,6 Vol%). Allerdings befindet sich in Abschnitt D im Vergleich zu den anderen Abschnitten weniger Strukturmaterial (weniger Grün- und Strauchschnitt), weshalb dieser Umstand für die etwas höheren Methankonzentrationen verantwortlich gemacht werden kann.

Die vereinzelt sehr geringen Methankonzentrationen und der Umstand, dass die Summe der Kohlenstoffdioxid- und Sauerstoffkonzentrationen stets bei ca. 21 Vol% lagen, lassen auf konstant aerobe Verhältnisse innerhalb der KK-Miete schließen.

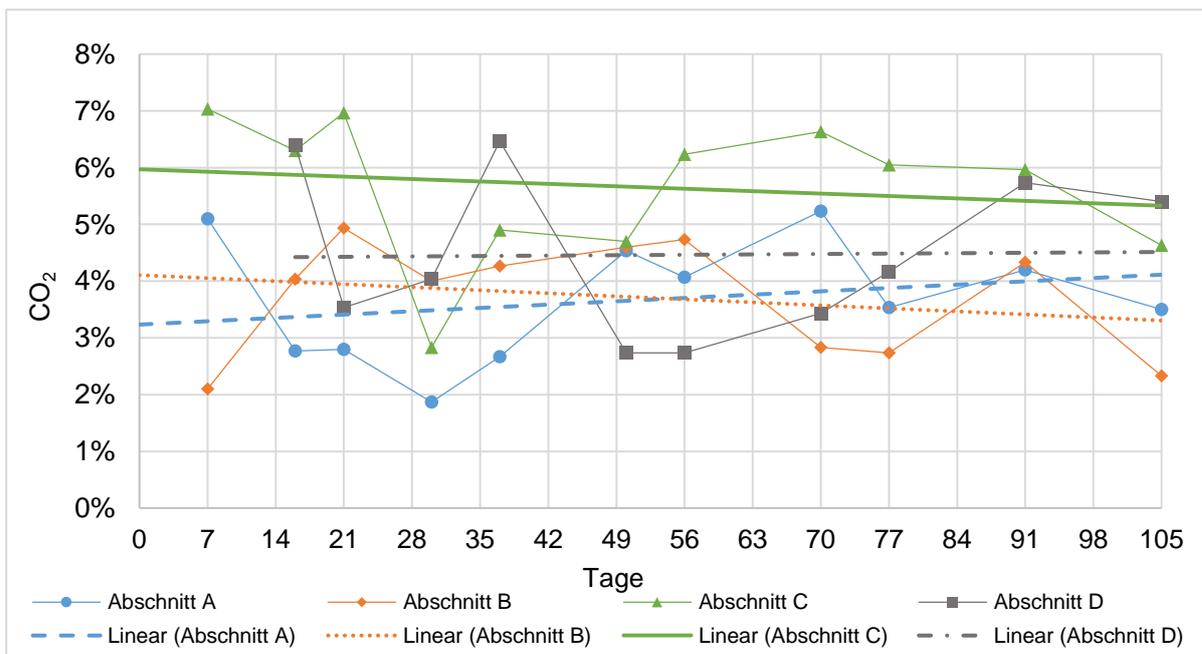


Abb. 9: Kohlenstoffdioxidkonzentrationen (MW) der Abschnitte A bis D der KK-Miete 1 Stunde nach dem Umsetzungsgang

Die CO₂ Messdaten der KK-Miete nach jedem Umsetzvorgang (Abb. 9) zeigen ein ähnliches Bild wie jene vor dem Umsetzen. Über die gesamte Versuchsdauer beginnen die Mikroorganismen nach dem Umsetzen rasch mit dem Abbau von organischer Substanz. Ein negativer Einfluss der Zwiebel auf die mikrobielle Aktivität kann auch an Hand der Kohlenstoffdioxidproduktion nicht beobachtet werden.

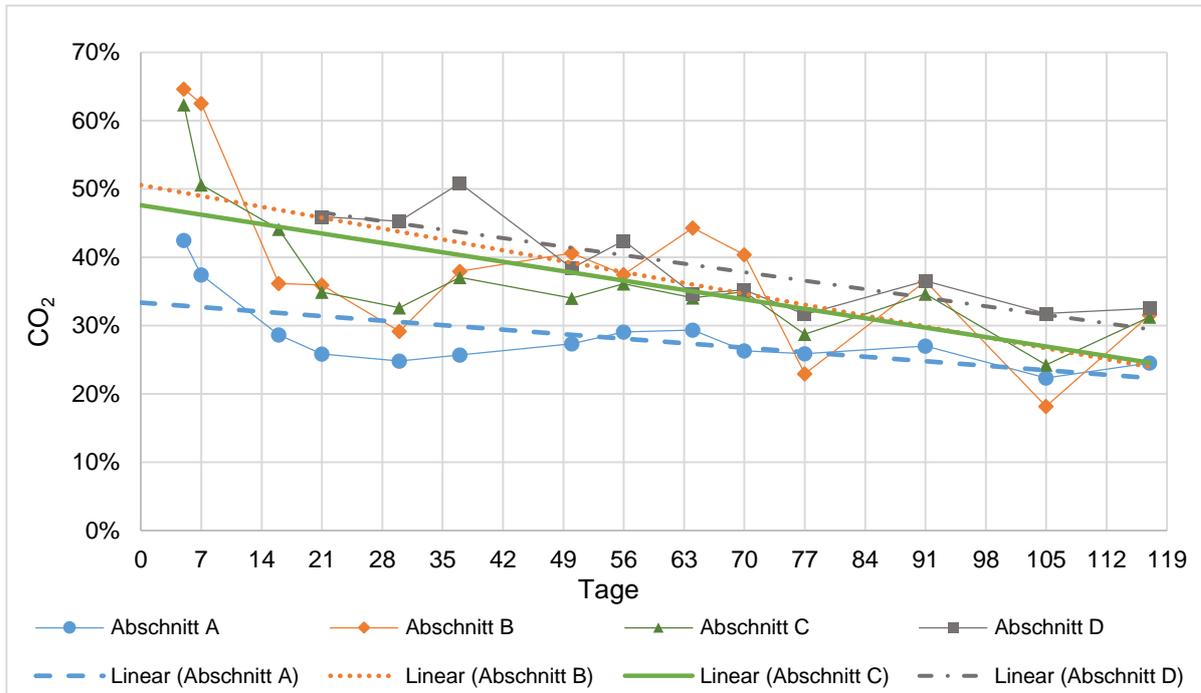


Abb. 10: Kohlenstoffdioxidkonzentrationen (MW) der Abschnitte A bis D der MC-Miete

Abbildung 10 zeigt die CO₂-Konzentrationen in der Porenluft der MC-Miete. Auffällig ist die von Beginn an hohe Konzentration an Kohlenstoffdioxid (zu beachten ist die gegenüber der KK-Miete geänderte Skalierung). Neben den CO₂ Konzentrationen in der Miete, sind auch die Sauerstoffgehalte gemessen worden, welche mehrheitlich bei 0,0 Vol% lagen. An einigen wenigen Messtagen sind geringe Werte bis zu maximal 0,5 Vol% O₂ gemessen worden, weshalb auf eine grafische Darstellung verzichtet wurde.

Die Kohlenstoffdioxidkonzentrationen der Abschnitte der MC-Miete liegen mit Werten über 21 Vol% weit über jenen der KK-Miete und sind ein Indiz für anaerobe Verhältnisse im Inneren der Miete. Über die gesamte Versuchsdauer ist eine Abnahme der CO₂-Konzentrationen erkennbar, wobei der Abschnitt A von Beginn an niedrigere Konzentrationen aufweist als jene mit Zwiebelanteilen. Ein Einfluss der Zwiebeln auf diesen Sachverhalt ist unwahrscheinlich, da das Öffnen der MC-Miete am Versuchsende einen großen Anteil an nicht zersetzter Organik, wie Zwiebeln und Karotten, erkennen ließ.

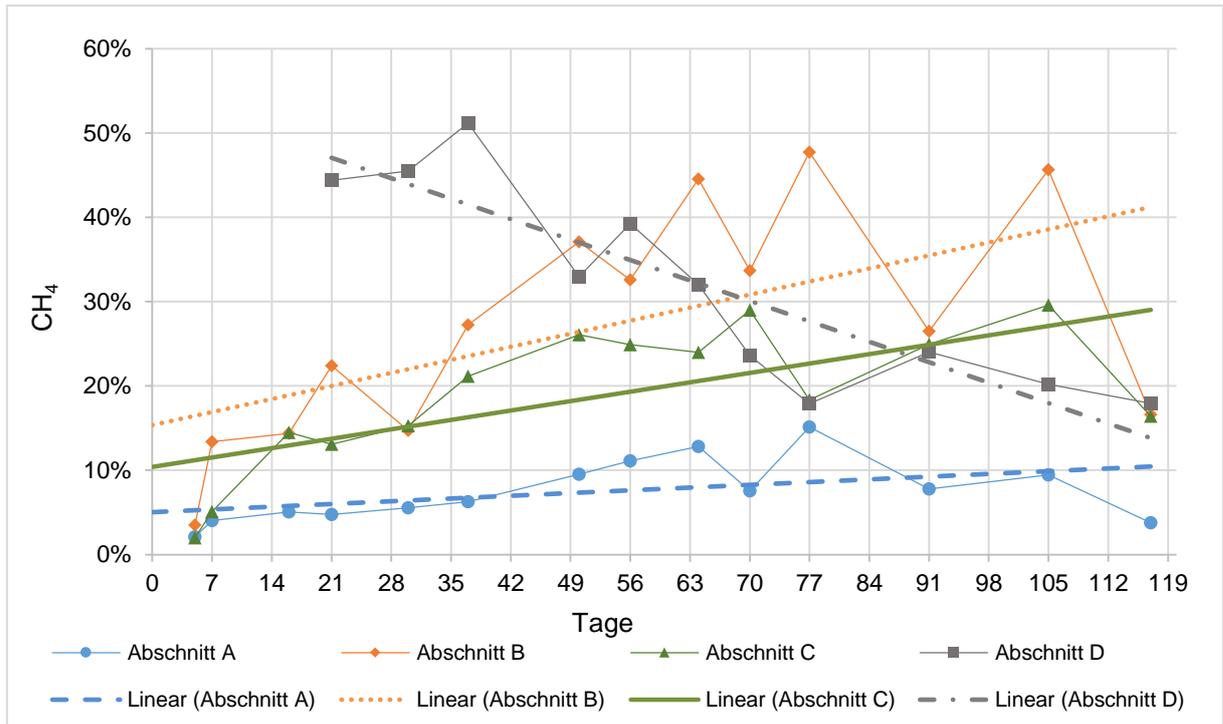


Abb. 11: Methankonzentrationen (MW) der Abschnitte A bis D der MC-Miete

Abbildung 11 zeigt die Methankonzentration der einzelnen Abschnitte innerhalb der MC-Miete. Die hohen Gehalte lassen, wie bei den Kohlenstoffdioxidgehalten auf anaerobe Verhältnisse schließen.

Laut der Theorie der mikrobiellen Carbonisierung kommt es in den Mieten zu einer Verwertung des Kohlenstoffdioxids und Methans und dadurch zum Aufbau von Huminstoffen. Durch die Zunahme der Methangehalte in den Abschnitten A, B und C kann dies nicht bestätigt werden. Ein Rückgang des Methangehalts in Abschnitt D kann auch durch Ausgasung aus der MC-Miete erklärt werden, was durch Messungen mittels Flammenionisationsdetektor (Kapitel 4.3.1) bewiesen werden konnte.

4.3.1 FID Messungen

A	B	C	D
Ø 0,73 ppm (±0,22)	Ø 1,11 ppm (±0,42)	Ø 1,09 ppm (±0,32)	Ø 1,79 ppm (±0,28)

Abb. 12: FID Messergebnisse der Abschnitte A bis D der KK-Miete

D	6,5	830
	4,1	20,0
	5,8	4,3
	8,8	
C	5,6	2,8
	15,5	14,1
	682	222
	613	59,2
B	205	138
	340	20,3
	170	152
	40,3	104
A	138	860
	205	145
	223	337
	34	152

Abb. 13: FID Messergebnisse (ppm) der Abschnitte A bis D der MC-Miete

Am 4.7.2018 wurden FID-Messungen auf den Mietenoberflächen durchgeführt. Mittels FID können Methankonzentrationen erfasst werden. Die Messungen sind nicht quantifiziert worden, da lediglich eine Aussage getroffen werden sollte, ob Methan prinzipiell aus der MC-Miete austritt oder nicht.

Abb. 12 und 13 zeigen die Ergebnisse der FID Messungen auf der KK- und der MC-Miete, angegeben in ppm. Auffallend sind die im Vergleich zu den Konzentrationen der KK-Miete deutlich höheren Werte der MC-Miete. Am Messtag herrschten sehr böige Windverhältnisse, weshalb der Messvorgang abgebrochen werden musste. Am darauffolgenden Messtag herrschte Windstille mit einer Außentemperatur von ca. 32 °C (16 Uhr).

4.4 Zwiebelabbau und Endprobenahme

Der Zwiebelabbau in den Abschnitten B, C und D der KK-Miete wurde mit Fotos festgehalten. Am 18. Juli (Woche 13) konnten noch kleine Reste an Zwiebeln in den Abschnitten B und C gefunden werden. Diese waren mit einer erdigen Schicht überdeckt, weshalb sie nur schwer im Mietenkörper erkennbar waren (Bild 15).



Bild 15: Zwiebelreste in Woche 13 in Abschnitt B und C

Weder in Woche 15 noch bei den Endprobenahmen (Woche 17), konnten Zwiebelreste in den Abschnitten B und C der KK-Miete gefunden werden.

Lediglich in Abschnitt D der KK-Miete, welche zwei Tage nach den ersten drei Abschnitten aufgesetzt worden war und den höchsten Zwiebelanteil besaß, konnte zu Versuchsende noch vereinzelt Zwiebelreste festgestellt werden (Bild 16).

Der Abbau der Zwiebel fiel durch seine schalenförmige Zersetzungsweise auf. Die äußere Schale konnte zumeist leicht aufgrund schon beginnender Abbauprozesse entfernt werden, während sich die darunter liegende Schale noch fest und unzersetzt anfühlte.



Bild 16: Zwiebelreste im Abschnitt D der KK-Miete

Bei der MC-Miete konnte im Zuge der Endprobenahme (Woche 17) nach wie vor Zwiebeln im Mietenkörper festgestellt werden. Der Abbauprozess war noch wenig fortgeschritten.

In den Randbereichen wies die MC-Miete mehr wassergesättigtes und dunkler gefärbtes (braunes) Material auf als in den inneren Bereichen. Der Geruch kann gegenüber dem eher erdigen Geruch der KK-Miete in der MC-Miete als süßlich beschrieben werden.

Die folgenden Bilder veranschaulichen die Endprobenahme aus der MC-Miete.



Bild 17: Öffnen der MC-Miete

Bild 17 zeigt das Öffnen der MC-Miete. Dabei wurde das Rottegut in 1 m Segmenten abgetragen. Aus jedem Segment wurden Einzelproben entnommen und zu je zwei Mischproben je Mietenabschnitt (aus Abschnitt D nur eine Mischprobe) vereinigt.



Bild 18: Mietenabschnitt A der MC-Miete

Bild 18 zeigt die „geöffnete“ Miete (Abschnitt A) der MC-Miete. Erkennbar sind weiße, verpilzte Stellen im Inneren der Miete.



Bild 19: Unzersetzte Organik innerhalb der MC-Miete

Bild 19 zeigt noch klar erkennbare Reste an Stroh und Karotten.



Bild 20: Reste an Zwiebeln in der MC-Miete



Bild 21: Reste an Zwiebeln in der MC-Miete



Bild 22: Reste an Zwiebeln in der MC-Miete (mit Markierungen)

Die Bilder 20-22 zeigen deutlich, dass in der MC-Miete die Zwiebeln (analog zu Karotten und Stroh) nur teilweise abgebaut wurden.

Auffallend war auch der dichte Bewuchs der MC-Miete (Bild 23), der sich während der Versuchsdauer gebildet hat. Dies lässt auf nicht ausreichende Hygienisierung (Abtötung von Krankheitserregern und Unkrautsamen) zumindest in den Randbereichen schließen.



Bild 23: Unkrautbewuchs der MC-Miete bei Versuchsende

4.5 Laborergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Laboranalysen dargestellt.

4.5.1 Wassergehalt

Tab. 6: WG-Analysen (MW) über den Verlauf der Abschnitte A und der Endproben B bis D beider Mieten

Woche	KK-Miete [% FM]	MC-Miete [% FM]
0	47,2	50,9
1	45,4	
2	57,6	
3	49,3	50,4
4	51,3	
5	60,1	
7	64,1	56,3
8	61,7	
9	57,6	
10	55,9	
11	57,5	
13	57,5	42,3
15	57,5	
17-A	55,6	50,6
17-B	54,7	49,7
17-C	53,3	56,1
17-D	51,2	51,4

Tabelle 6 zeigt die Ergebnisse der WG-Analyse über die gesamte Versuchsdauer. Die Wassergehalte der KK-Miete sind über den gesamten Zeitraum in einem für die Rotte günstigen Bereich. Somit waren keine negativen Effekte auf die mikrobielle Aktivität aufgetreten. Die Wassergehalte der MC-Miete lagen über die gesamte Versuchsdauer ebenfalls im (von Witte angegebenen) günstigen Bereich (30-50 %). Lediglich in Woche 7 (Abschnitt A) und in den Endproben des Abschnitts C der MC-Miete lag der Wassergehalt mit 56 % darüber.

4.5.2 pH-Wert

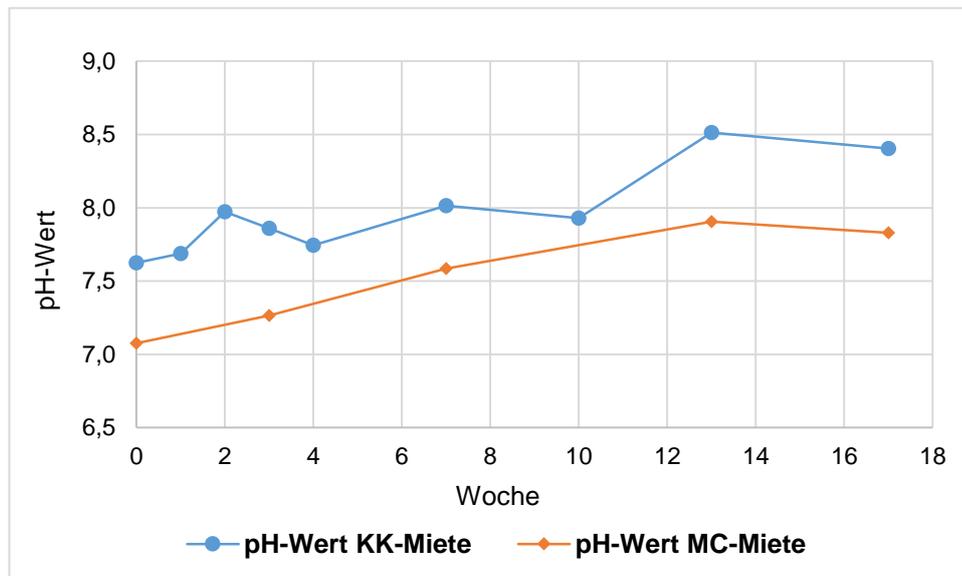


Abb. 14: pH-Wert-Verlauf (MW) der Abschnitte A beider Mieten

Tab. 7: pH-Werte (MW) der Endproben der Abschnitte A bis D beider Mieten

Abschnitt	KK-Miete	MC-Miete
A	8,4	7,8
B	8,2	7,9
C	8,4	7,9
D	8,5	8,0

Abbildung 14 zeigt den Verlauf des pH-Werts der beiden Abschnitte A über die gesamte Versuchsdauer. In der KK-Miete ist in den ersten zwei Wochen ein rascher Anstieg zu verzeichnen, worauf ein kurzer Abfall des pH-Werts folgt. Danach steigt der Wert wieder und befindet sich zu Versuchsende bei 8,4. Auswirkungen der Zwiebel sind hier nur bedingt zu interpretieren. Zwar zeigen die Abschnitte B bis D eine leicht steigende Tendenz, jedoch weist Abschnitt A zu Versuchsende den gleichen pH-Wert auf wie Abschnitt C (8,4), weshalb ein Einfluss der Zwiebel ausgeschlossen werden kann.

Der pH-Wert Verlauf der MC-Miete weist von Beginn an niedrigere Werte auf und bleibt über die gesamte Versuchsdauer unter den Werten der KK-Miete. Auch hier steigt der pH-Wert stetig an. Am Ende lag der pH-Wert bei 7,8. Auch die Endproben der Abschnitte B, C und D wiesen einen niedrigeren pH-Wert als dieselben Abschnitte der KK-Miete auf (Tab. 7). Auswirkungen der Zwiebel sind auszuschließen, aufgrund der ähnlichen Endprobenwerte und des geringen Abbaus in der MC-Miete.

4.5.3 Leitfähigkeit

Abbildung 15 zeigt den Verlauf der Leitfähigkeit der Abschnitte A der beiden Mieten. In beiden Fällen kommt es über die Versuchsdauer insgesamt zu einer Reduktion der

Leitfähigkeit und liegt in allen Abschnitten am Ende unter 3 mS/cm, was auch in der Kompostverordnung als Grenzwert für Sackware angegeben wird.

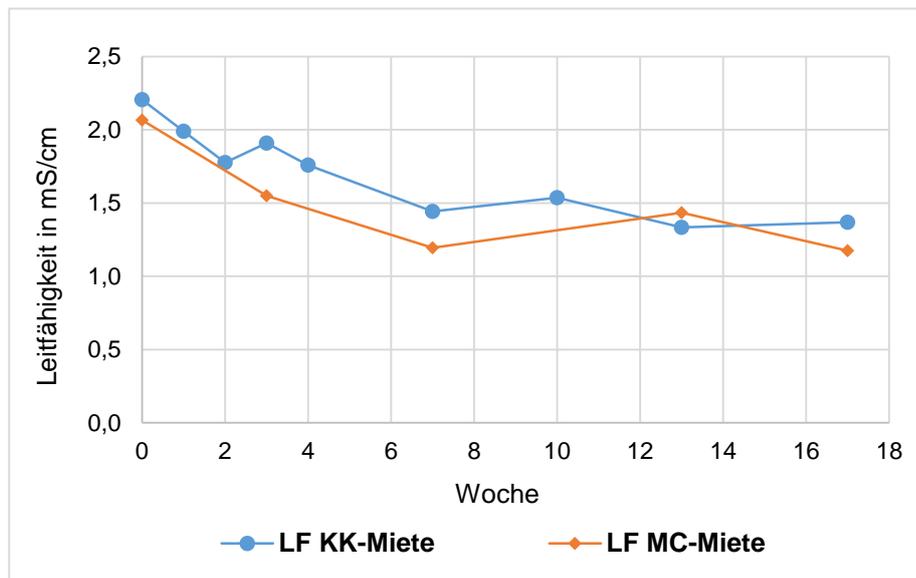


Abb. 15: Verlauf der Leitfähigkeit (MW) der Abschnitte A beider Mieten

Tab. 8: Leitfähigkeitswerte (MW) der Endproben der Abschnitte A bis D beider Mieten

Abschnitt	KK-Miete (mS/cm)	MC-Miete (mS/cm)
A	1,37	1,18
B	1,15	0,77
C	1,31	0,92
D	1,46	0,86

Auswirkungen der Zwiebeln in der KK-Miete sind nicht feststellbar, da die Leitfähigkeit in Abschnitt A (1,37 mS/cm) ca. gleich hoch ist wie in Abschnitt C (1,31 mS/cm). Auch in der MC-Miete ist kein Einfluss der Zwiebel feststellbar. Die Leitfähigkeit ist zwar in den Endproben des Abschnitts A am höchsten (1,18 mS/cm), jedoch sind die Werte in Abschnitt C und D wiederum höher als in B (Tab. 8).

4.5.4 Ammonium- und Nitratstickstoff

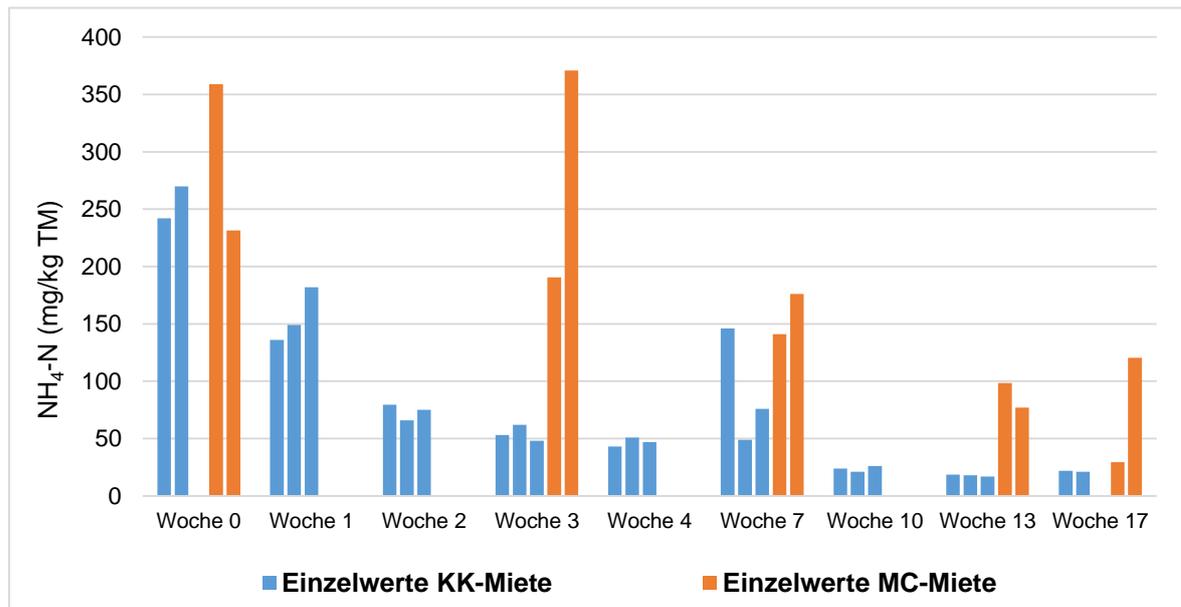


Abb. 16: Ammoniumstickstoffverlauf (Einzelproben) der Abschnitte A beider Mieten

Abbildung 16 zeigt den Verlauf der Ammoniumstickstoffkonzentrationen der Einzelproben in mg/kg TM über die gesamte Versuchsdauer. Die Balken zeigen die große Streuung der einzelnen Messwerte bei der MC-Miete, was auf die Inhomogenität des Materials innerhalb der Miete zurückzuführen ist. Anzumerken ist, dass in Woche 1, 2, 4 und 10 keine MC-Proben entnommen wurden. Wie an den Balken der KK-Miete ersichtlich und wie auch in der Literatur beschrieben, kommt es während des Rotteprozesses der KK-Miete zu einer Abnahme des Ammoniumstickstoffgehaltes. Dies beruht auf verschiedenen Gründen, wie Verluste durch Sickerwasser und Ausgasung, Umwandlung in NO_3 , Einbau in die Huminstoffmatrix und Assimilation durch Mikroorganismen. Die Zunahme der Gesamtstickstoffgehalte (Tab. 12) in der KK-Miete, lässt jedoch darauf schließen, dass Stickstoff vermehrt in die organische Masse eingebaut wurde.

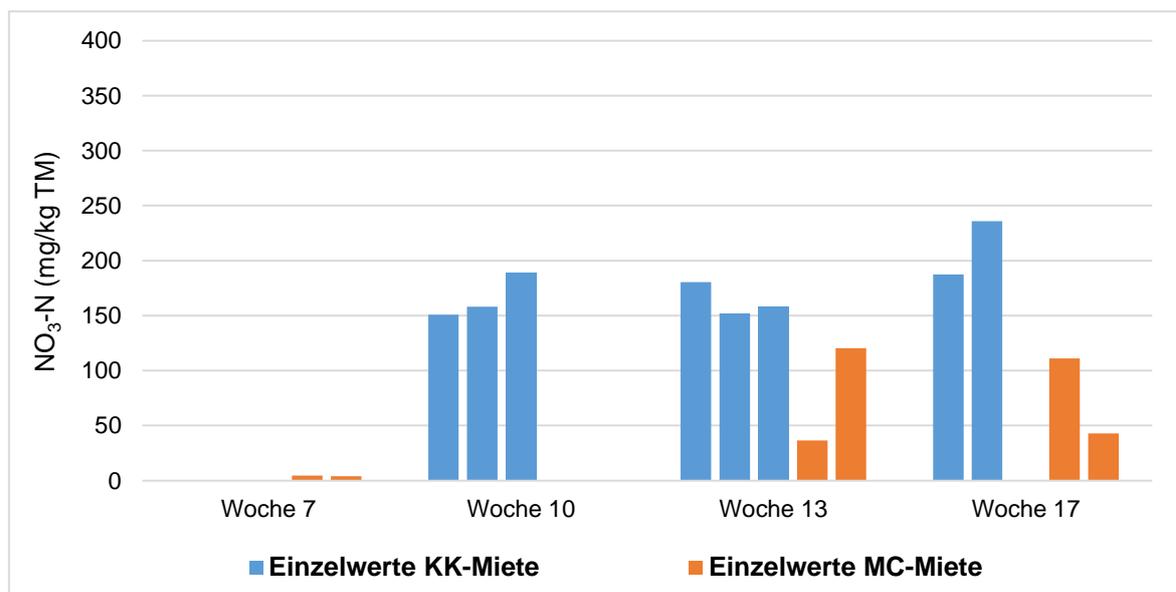


Abb. 17: Nitratstickstoffverlauf (Einzelproben) der Abschnitte A beider Mieten

Abbildung 17 zeigt die Nitratgehalte der Einzelproben über die gesamte Versuchsdauer in den Abschnitten A beider Mieten. In der KK-Miete konnte Nitrat erst ab Woche 10 detektiert werden. Anhand der Messwerte ist eine tendenzielle Zunahme der Nitratstickstoffgehalte feststellbar. Wie in der Literatur der mikrobiellen Carbonisierung beschrieben, entsteht in der MC-Miete auch Nitrat. Ob der Sauerstoff für die Bildung tatsächlich aus der Spaltung von H_2O stammt oder durch eventuellen Lufteintrag über Risse an der Mietenoberfläche kann nicht ausgesagt werden. Darüber hinaus sind die Nitratstickstoffwerte zu Versuchsende deutlich höher als die Ammoniumstickstoffwerte. In der MC-Miete ist Nitratstickstoff regelmäßig ab Woche 7 detektiert worden. Durch Abb. 17 kann auch hier eine breite Streuung in den Einzelwerten erkannt werden, was wiederum durch die heterogenen Verhältnisse in der Miete erklärt wird. Eine Abnahme der Nitratstickstoffgehalte ist auch bei Versuchsende noch nicht zu erkennen, wodurch auf noch verfügbare Stickstoffquellen in der organischen Masse zu schließen ist.

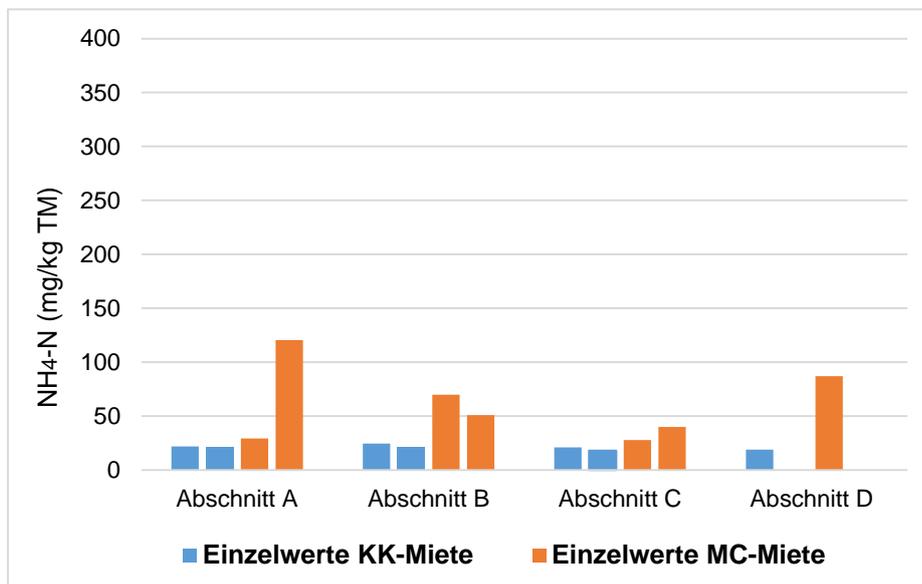


Abb. 18: Ammoniumstickstoffgehalte der Endproben der Abschnitte A bis D beider Mieten

Auch in den Endproben der beiden Mieten ist zu erkennen, dass am Ende des Versuchs in allen Abschnitten im Schnitt mehr Ammoniumstickstoff in den Mischproben der MC-Miete vorhanden ist als in der KK-Miete (Abb. 18). Die Ammoniumstickstoffkonzentrationen der KK-Miete betragen wie in Abschnitt A um die 20 mg/kg TM.

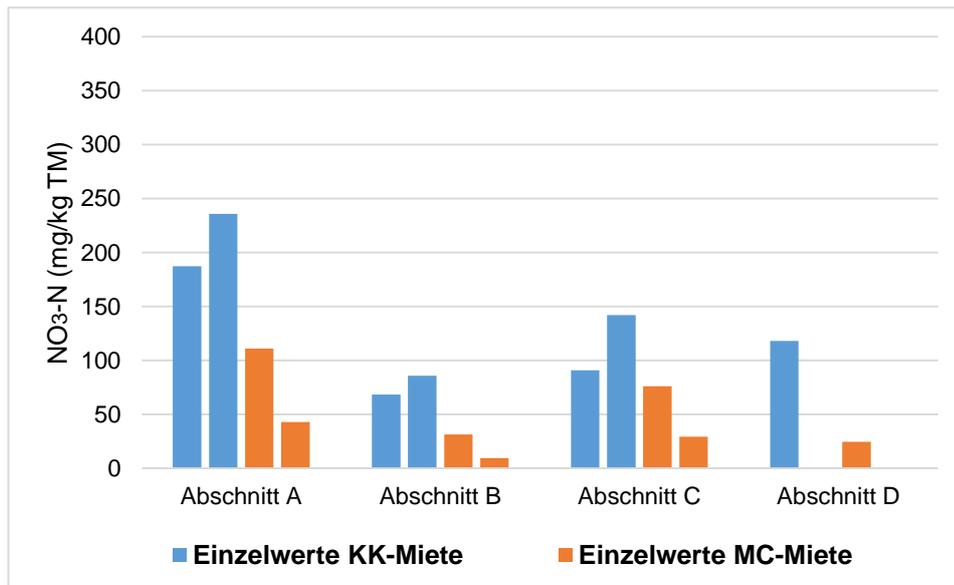


Abb. 19: Nitratstickstoffgehalte der Endproben der Abschnitte A bis D beider Mieten

Abbildung 19 zeigt die Nitratstickstoffwerte der Endproben. Auch hier waren in der KK-Miete die Werte am Ende des Versuchs höher als jene des Ammoniumstickstoffs. Die Nitratstickstoffwerte in der MC-Miete sind tendenziell niedriger als in der KK-Miete.

Nach der seit in Kraft treten der Kompostverordnung 2001 zurückgezogenen ÖNORM S 2200 lagen die Anforderungen für den Anwendungstyp A bei $< 0,2$ % TM für Nitratstickstoff und bei $< 0,1$ % für Ammoniumstickstoff. Es werden hier die Grenzwerte der ÖNORM verwendet, da in der Kompostverordnung keine Grenzwerte für Nitrat- oder Ammoniumstickstoff vorhanden sind. Die gemessenen Werte in der KK-Miete liegen klar unterhalb dieser Grenzwerte.

In der MC-Miete liegen die Gehalte an Ammonium- und Nitratstickstoff zwar auch unterhalb der Grenzwerte der ÖNORM S 2200, jedoch ist durch das nicht abgebaute Material von einer neuerlichen mikrobiologischen Aktivität auszugehen, sobald Sauerstoffzutritt (z.B. durch Ausbringung des Materials auf landwirtschaftliche Flächen) erfolgt.

In der KK-Miete sind keine Auswirkungen der Zwiebeln auf die Höhe der Ammoniumkonzentrationen im Endmaterial zu erkennen. In allen Abschnitten liegen die Ammoniumstickstoffwerte um die 20 mg/kg TM. Ein Einfluss der Zwiebeln auf nitrifizierende Mikroorganismen kann ebenfalls ausgeschlossen werden. Zwar sind die Konzentrationen an $\text{NO}_3\text{-N}$ in Abschnitt A am höchsten, jedoch steigen die Gehalte in den Abschnitten B bis D tendenziell an. Die hohen Ammoniumstickstoffwerte zu Versuchsende in der MC-Miete deuten auf geringe Stabilität hin. Auswirkungen der Zwiebeln sind nicht zu erkennen.

4.5.5 Carbonsäuren

Tab. 9: Carbonsäurewerte der Einzelproben der KK-Miete

Woche	Essigsäure [mg/kg TM]			Propionsäure [mg/kg TM]			Isobuttersäure [mg/kg TM]		
	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 1	Probe 2	Probe 3
0	237	1984	-	nn	1218	-	73	nn	-
1	nn	2509	3068	nn	nn	nn	nn	nn	nn
7	543	292	2917	nn	nn	nn	nn	nn	nn

Tabelle 9 zeigt das Aufkommen an Carbonsäuren über die gesamte Versuchsdauer. In der KK-Miete waren bereits ab Woche 2 Carbonsäuren nicht mehr nachweisbar. In Woche 7 kam es zu einem (in der Kompostierung unüblich) Anstieg der Essigsäureproduktion. Ein Analysefehler kann durch die parallel ansteigenden Ammoniumstickstoffwerte ausgeschlossen werden. Tendenziell höhere Werte in den Kohlenstoffdioxidkonzentrationen oder den Rottetemperaturmessungen sind auch in Woche 7 auszumachen. In Woche 6 wurden keine Proben genommen und keine Mietenporenluftmessungen durchgeführt, da das Messgerät defekt war. Die Abschnitte wurden in Woche 6 trotzdem umgesetzt und bewässert. Durch diese Maßnahmen wurde offenbar organische Substanz „verfügbar“ und es kam zu einer leichten Erhöhung der mikrobiellen Aktivität. Parallel zur Carbonsäurenentwicklung ist ein Absinken des pH-Wertes festzustellen. Der pH-Wert Verlauf der KK-Miete zeigt in den ersten beiden Wochen eine steigende Tendenz und nimmt jedoch bei den Proben der Woche 2 bis 4 kurzzeitig wieder ab, obwohl in dieser Zeitspanne keine Carbonsäuren in den Proben detektiert worden sind. Von Woche 4 auf Woche 7 ist ein Anstieg des pH zu erkennen, wenngleich die Proben der Woche 7 einen hohen Gehalt an Essigsäure aufweisen.

Propionsäure und Isobuttersäure wurden nur in den Ausgangsmischproben detektiert. Da in den Endproben keine Carbonsäuren nachgewiesen wurden, kann ein Einfluss der Zwiebeln auf die Carbonsäurebildung weitgehend ausgeschlossen werden.

Tab. 10: Carbonsäurenwerte der Einzelproben der MC-Miete

Woche	Essigsäure [mg/kg TM]		Propionsäure [mg/kg TM]		Isobuttersäure [mg/kg TM]	
	Probe 1	Probe 2	Probe 1	Probe 2	Probe 1	Probe 2
0	2.958	2.167	nn	nn	nn	nn
3	3.524	7.991	610	897	nn	363
7	2.581	6.000	207	568	nn	nn
13	3.455	nn	269	nn	nn	nn
17-A	nn	2.609	nn	228	nn	83
17-C	136	252	68	nn	nn	nn

In Tabelle 10 sind die Carbonsäurenkonzentrationen in allen Einzelproben der MC-Miete dargestellt. Unter den anaeroben Milieubedingungen werden Carbonsäuren deutlich langsamer abgebaut als unter den aeroben Bedingungen der KK-Miete. Ausgenommen in Woche 10 werden Carbonsäuregehalte über die gesamte Versuchsdauer nachgewiesen (sogar in den Endproben der Abschnitte A und C). Der Nachweis von niedrigeren Carbonsäuren über die gesamte Versuchsdauer ist auf stetige Versäuerungsprozesse zurückzuführen. Der Verlauf des pH-Wertes zeigt eine steigende Tendenz, liegt jedoch über die gesamte Versuchsdauer unter jener der KK-Miete. Auffällig ist, dass Essigsäure über die gesamte Behandlungsdauer nachgewiesen werden konnte. Dies spielt in der MC auch eine wichtige Rolle, da die Fettsäuren nach Witte die Grundlage zur Bildung von Huminstoffen sind. In Abschnitt B und Abschnitt D der Endproben wurden keine Carbonsäuren nachgewiesen. Auswirkungen des Zwiebelabbaus sind keine zu erkennen, da in den Abschnitten B und D keine Carbonsäuren nachgewiesen werden konnten.

4.5.6 Organische Substanz (Glühverlust)

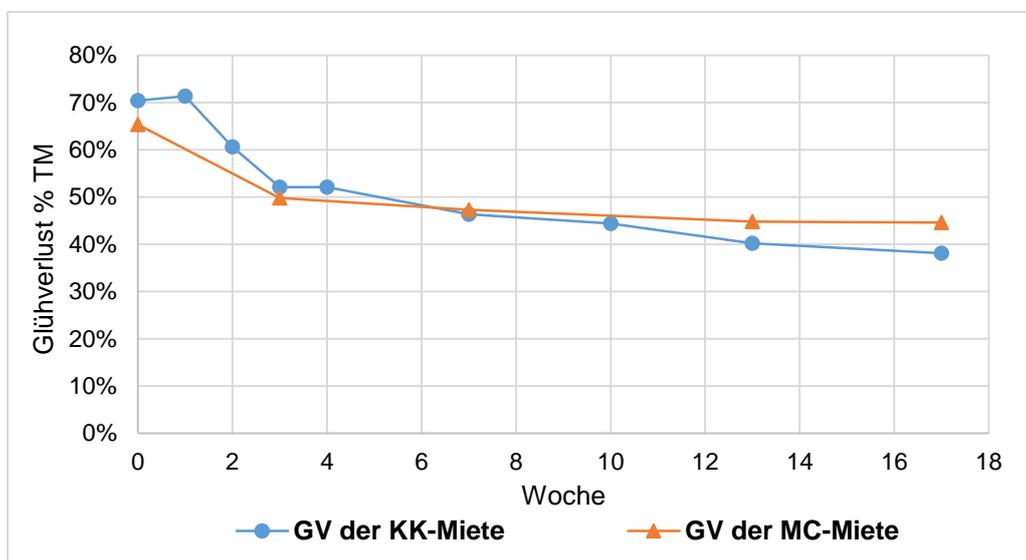


Abb. 20: Verlauf des Glühverlustes (MW der Glühverluste) der Abschnitte A beider Mieten

Tab. 11: Glühverluste (MW) der Endproben der Abschnitte A bis D beider Mieten

Abschnitt	KK-Miete [% TM]	MC-Miete [% TM]
A	38	45
B	41	29
C	35	40
D	32	28

Durch Mineralisierungsprozesse ergibt sich zu Beginn in beiden Mieten ein Abbau von organischer Substanz (Abb. 20). Ab Woche 7 bleibt die organische Substanz in der MC-Miete bis zum Versuchsende nahezu gleich, wohingegen in der KK-Miete ein

weiterer Abbau festzustellen ist. In Abschnitt A ist am Versuchsende ein höherer Gehalt an organischer Substanz in der MC-Miete zu verzeichnen, jedoch nicht in den Abschnitten B und D (Tab. 11).

4.5.7 Kohlenstoff- Stickstoffanalyse

Tab. 12: Kohlenstoff- und Stickstoffverlauf (MW) des Abschnitts A der KK-Miete

Woche	TOC [% TM]	CaCO ₃ [% TM]	N [% TM]	C:N
0	37,0	3,3	0,99	38
1	37,0	3,9	1,00	37
2	31,4	5,4	1,10	29
3	30,1	5,9	1,16	26
4	27,5	6,9	1,26	22
7	24,6	7,4	1,32	18
10	23,0	7,8	1,30	18
13	21,0	9,1	1,34	16
17	19,9	8,7	1,31	15

Tabelle 12 zeigt die Untersuchungsergebnisse der VARIO MAX Analysen. Das C/N-Verhältnis zu Beginn der Kompostierung lag bei 38 und somit in einem noch günstigen Bereich für den mikrobiellen Abbau. Das weite Verhältnis ist auf Einstreustroh im Pferdemist zurückzuführen. Der organische Kohlenstoff (% TM) im Abschnitt A der KK-Miete nahm durch den Abbau über die Versuchsdauer ab. Dadurch wird das C/N-Verhältnis enger, welches zu Versuchsende bei 15 lag.

Tab. 13: Kohlenstoff- und Stickstoffwerte (MW) der Abschnitte A bis D der KK-Miete

Abschnitt	TOC [% TM]	CaCO ₃ [% TM]	N [% TM]	C:N
A	19,9	8,7	1,31	15
B	22,1	9,7	1,17	19
C	18,0	10,0	1,22	15
D	16,2	10,4	1,13	14

Tabelle 13 gibt die Analysenwerte zu Versuchsende aller Abschnitte wieder. Das Kohlenstoff zu Stickstoff Verhältnis liegt in Abschnitt B bei 19, weist in Abschnitt C und D jedoch etwa die gleichen Werte wie in Abschnitt A auf.

Tab. 14: Kohlenstoff- und Stickstoffverlauf (MW) des Abschnitts A der MC-Miete

Woche	TOC [% TM]	CaCO ₃ [% TM]	N [% TM]	C:N
0	34,0	4,6	0,91	38
3	25,9	7,5	1,01	26

7	23,5	7,5	1,03	23
13	23,5	7,5	1,03	23
17	23,3	9,5	1,09	22

Tab. 15: Kohlenstoff- und Stickstoffwerte (MW) der Abschnitte A bis D der MC-Miete

Abschnitt	TOC [% TM]	CaCO₃ [% TM]	N [% TM]	C:N
A	23,5	9,5	1,09	22
B	14,7	12,4	0,76	20
C	20,4	10,5	0,95	22
D	14,5	11,0	0,85	17

Ein Abbau von organischer Substanz ist auch in der MC-Miete in den ersten Wochen zu erkennen (Tab. 14). Ab Woche 7 bleiben jedoch (wie im GV-Verlauf) TOC Gehalt und C/N-Verhältnis bis zum Versuchsende nahezu gleich. Der von Witte postulierte, hohe TOC-Gehalt seines Endprodukts, welcher in der Literatur nicht beziffert wird, konnte im Vergleich zu der KK-Miete nicht bestätigt werden. Ein hoher TOC-Wert hat darüber hinaus wenig Aussagekraft, da dieser nicht die Bindungsform des Kohlenstoffs angibt. Niedrigere bzw. gleich hohe organische Kohlenstoffgehalte wie in der KK-Miete ergeben in den Endproben auch weitere C/N-Verhältnisse, welche wiederum für nicht zersetzte organische Masse in der Miete sprechen.

4.5.8 Atmungsaktivität

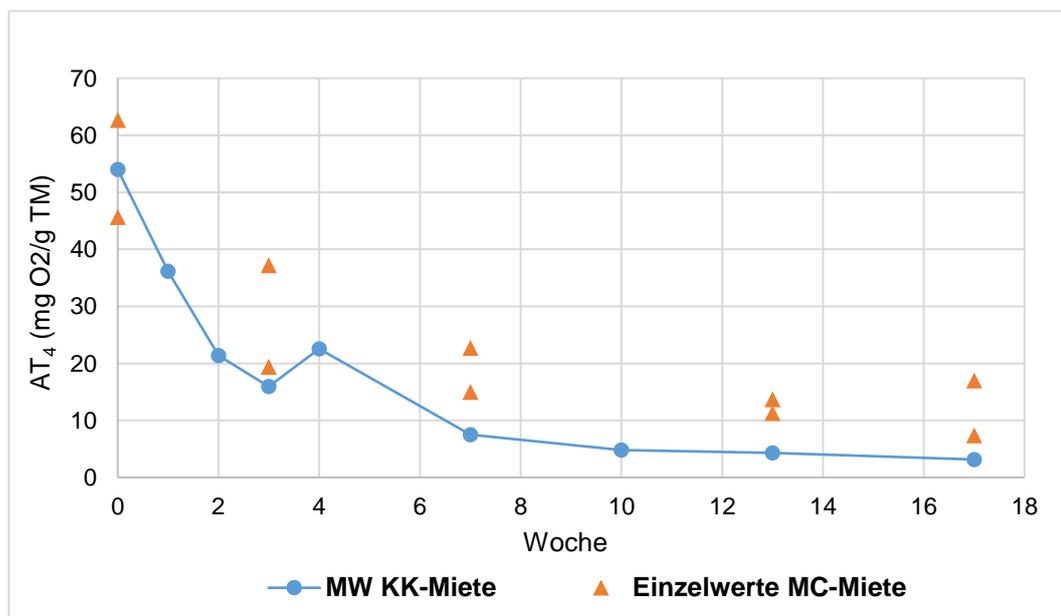


Abb. 21: Atmungsaktivitätsverlauf der Abschnitte A beider Mieten

Ein Untersuchungsparameter der die Reife eines Komposts wohl am besten beschreibt, ist die Atmungsaktivität (AT_4). Abbildung 21 zeigt die

Atmungsaktivitätswerte der Abschnitte A beider Mieten. Bei der KK-Miete sind die Mittelwerte der 3 Einzelproben dargestellt. Wegen der größeren Abweichungen bei der MC-Miete sind hier die beiden Einzelwerte abgebildet.

Durch die hohen Gehalte an leicht verfügbarem Kohlenstoff zu Beginn des Rotteprozesses, sind die Werte des Sauerstoffverbrauches hoch und nehmen während der Versuchsdauer ab. In Abschnitt A der KK-Miete lag die Atmungsaktivität in den Anfangsproben bei 54 mg O₂/g TM und erreichte nach 17 Wochen 3,2 mg O₂/g TM. Da in der Kompostverordnung oder in den ÖNORMEN keine Grenzwerte für AT₄-Werte von Komposten definiert sind, kann als Vergleichswert der Stabilitätsparameter der Deponieverordnung für die Behandlung von organischen Abfällen aus einer mechanisch biologischen Behandlungsanlage herangezogen werden. Dieser liegt bei < 7 mg O₂/g TM. Somit sind auch die Endproben der Abschnitte B, C und D mit Werten zwischen 2,5 und 3,5 mg O₂/g TM als stabil zu bewerten (Abb. 12).

Die Ergebnisse der Atmungsaktivität der MC-Miete weisen zwar ebenfalls einen fallenden Trend auf, lassen jedoch, wie im Falle der Ammonium- und Nitratstickstoffwerte, eine starke Streuung erkennen, sodass erneut auf inhomogene Verhältnisse innerhalb der MC-Miete geschlossen werden kann. Werte der Endproben (Abb. 22) mit einer AT₄ von 17 bzw. 9,9 mg O₂/g TM, belegen die bei Versuchsende im Vergleich zur KK-Miete weiterhin höhere biologische Reaktivität des Substrats.

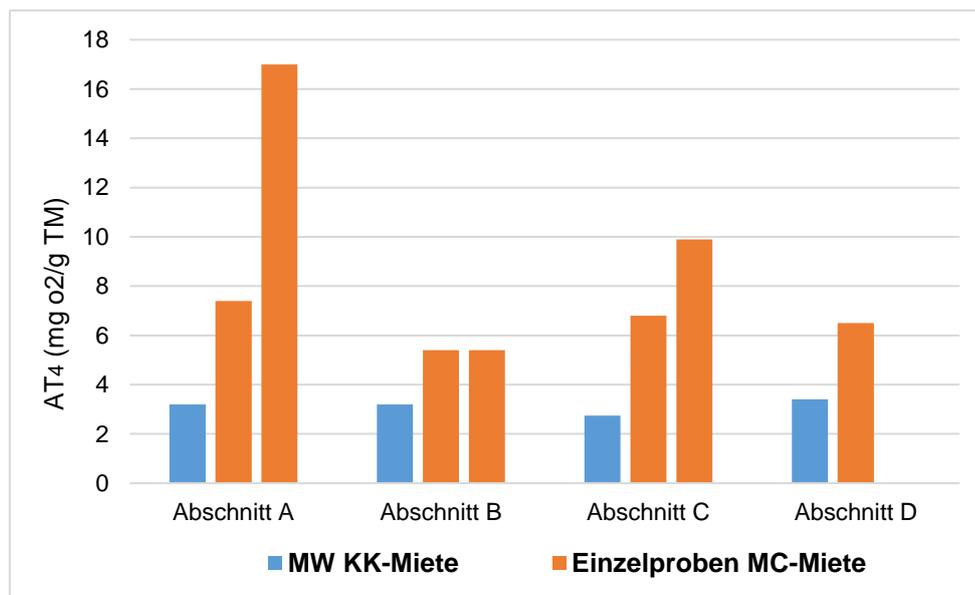


Abb. 22: Atmungsaktivität der Endproben der Abschnitte A bis D beider Mieten

Auswirkungen der Zwiebelzumischungen auf die Atmungsaktivität sind in der KK-Miete nicht feststellbar. Die Endprobenwerte sind in allen Abschnitten ähnlich niedrig. In den Atmungsaktivitätswerten der Endproben der MC-Miete ist ebenfalls kein Einfluss der Zwiebel zu erkennen.

4.5.9 Huminsäuren (HS)

Nasschemische Huminsäureanalysen wurden erst ab Woche 3 durchgeführt.

Eine direkte Quantifizierung der Huminsäuren konnte nicht durchgeführt werden, da bedingt durch den Einbau einer neuen VIS-Lampe in das Photometer, die alte gravimetrisch Kalibration nicht mehr verwendet werden konnte. Stattdessen wurde aus

den FTIR-Spektren mithilfe des Vorhersagemodells InfraHUM eine Quantifizierung der Huminsäuregehalte durchgeführt. Diese Ergebnisse werden in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

Abbildung 23 zeigt den Vergleich der nasschemisch bestimmten optischen Dichten mit den Prozentangaben aus dem Vorhersagemodell aller Einzelproben des Abschnitts A der KK-Miete. Die zweite Probe der Woche 13 passte nicht in das Vorhersagemodell – daher fehlt hier ein Modellwert.

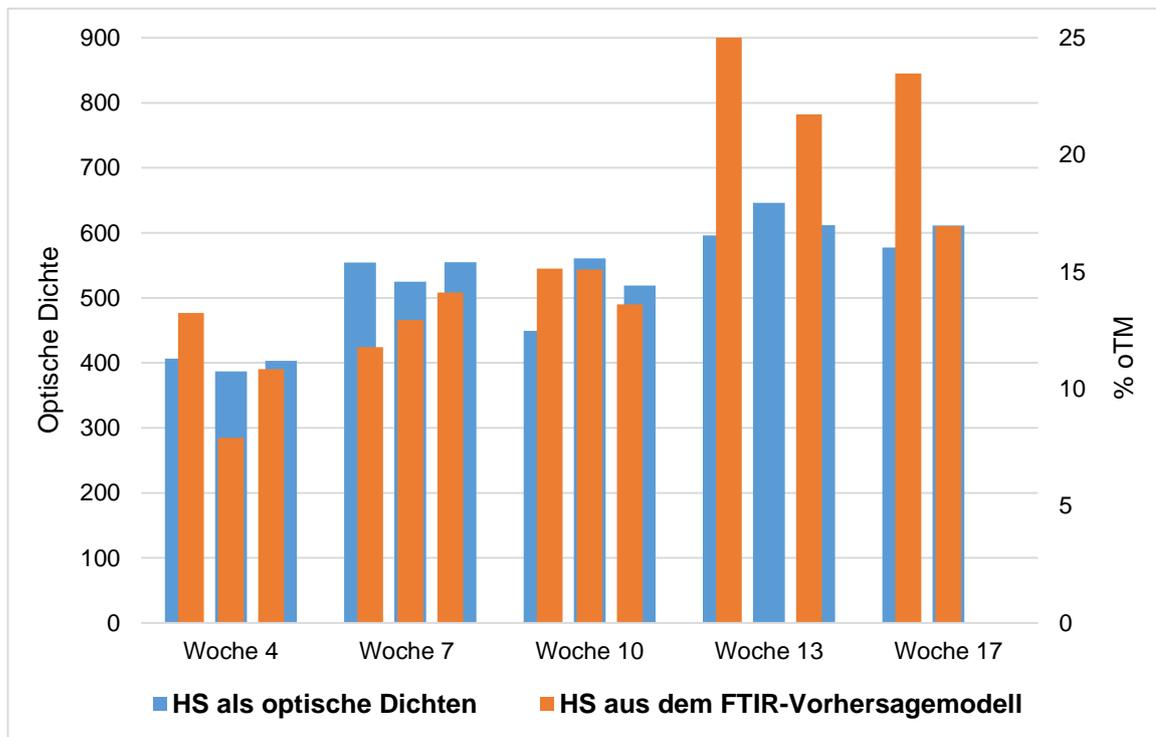


Abb. 23: Huminsäurebestimmung - Vergleich der optischen Dichten der nasschemischen Analysen mit den Werten des Vorhersagemodells (% oTM) nach FTIR-Messung der Einzelproben des Abschnitts A der KK-Miete

Abbildung 23 zeigt, dass in der ersten und dritten Probe der Woche 13 und in der ersten Probe der Woche 17 die Huminsäurevorhersagen deutlich höher sind, obwohl die optischen Dichten tendenziell nicht höher sind als in den anderen Proben. Erklärt werden kann dieser Umstand, dass in den Infrarotspektren der erwähnten Proben (Anhang) die Peaks im Wellenzahlbereich zwischen $1650 - 1630 \text{ cm}^{-1}$ höher sind als bei den anderen Proben. In diesem Wellenzahlbereich überlappen sich mehrere Banden (Carboxylate, Amide, Alkene und Aromate). Gleichzeitig zählt dieser Wellenzahlbereich zu den Indikatorbanden zur Bestimmung der Huminsäuren. Es ist davon auszugehen, dass in der nasschemischen Analyse diese Verbindungen nicht (durch eine dementsprechende Verfärbung des Extrakts) Bestandteil in der Bestimmung der optischen Dichte waren.

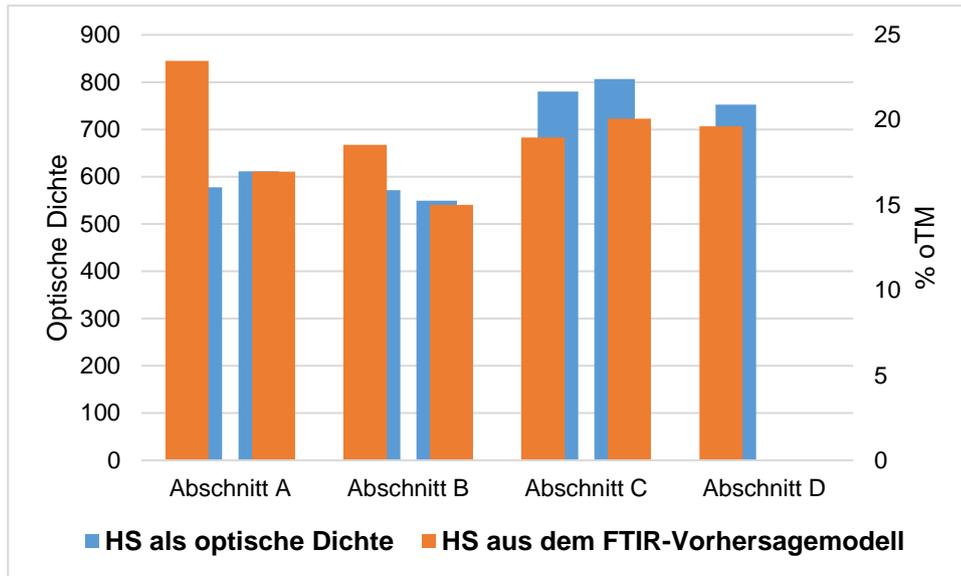


Abb. 24: Huminsäurebestimmung - Vergleich der optischen Dichten der nasschemischen Analysen mit den Werten des Vorhersagemodells (% oTM) nach FTIR-Messung der Endproben der Abschnitte A bis D der KK-Miete

Abbildung 24 zeigt die nasschemisch bestimmten Huminsäuregehalte der Endproben der KK-Miete als optische Dichten und vergleicht diese mit den vorhergesagten prozentualen Huminsäuregehalten aus dem FTIR-Modell.

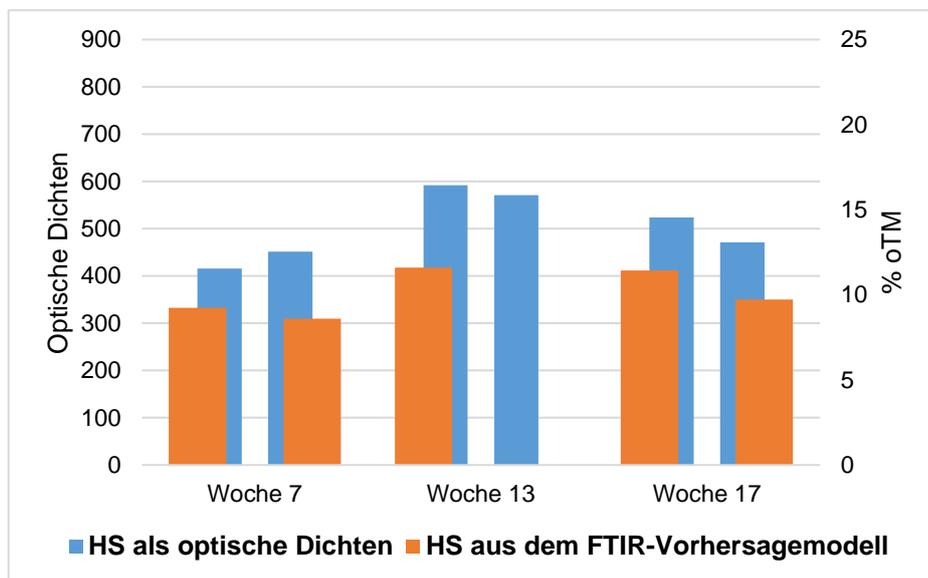


Abb. 25: Huminsäurenbestimmung - Vergleich der optischen Dichten der nasschemischen Analysen mit den Werten des Vorhersagemodells (% oTM) nach FTIR-Messung der Einzelproben des Abschnitts A der MC-Miete

Abbildung 25 bzw. 26 sind die entsprechenden Werte der Einzelproben des Abschnitts A bzw. B bis D der MC-Miete dargestellt. Die zweite Probe in Woche 13 passte nicht in das InfraHUM Modell.

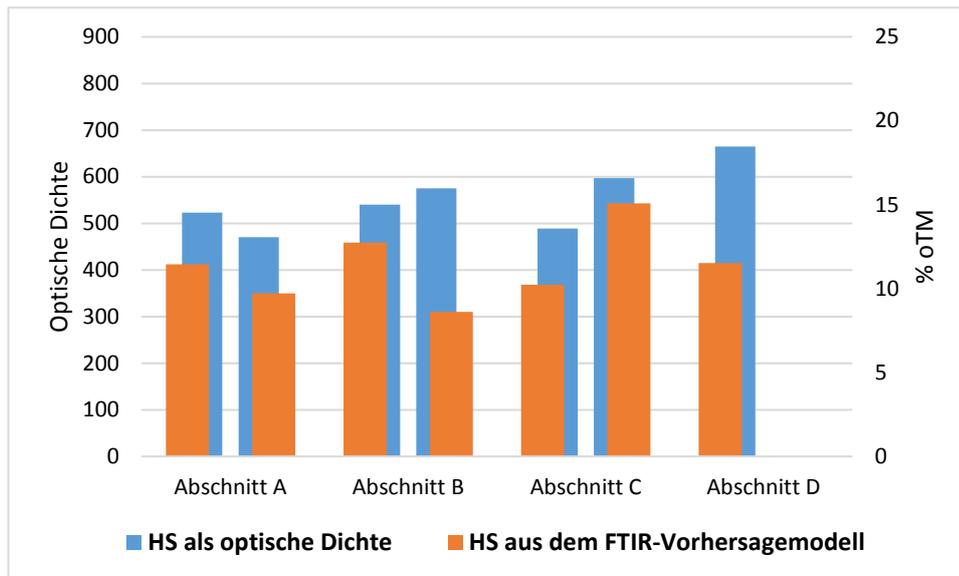


Abb. 26: Huminsäurebestimmung - Vergleich der optischen Dichten der nasschemischen Analysen mit den Werten des Vorhersagemodells (% oTM) nach FTIR-Messung der Endproben der Abschnitte A bis D der MC-Miete

Im Verlauf des Abschnitts A (Abb. 23) der KK-Miete kommt es sowohl bei den optischen Dichten als auch bei den Vorhersagewerten zu einem tendenziellen Anstieg der Huminsäuren. Das Vorhersagemodell weist in den Endproben der KK-Miete Huminsäuregehalte zwischen 15 und 24 % oTM auf. Am ABF-BOKU durchgeführte Analysen an 114 österreichischen Komposten ergaben einen Durchschnitt von 24 % oTM.

Der tendenzielle Aufbau von Huminsäuren ist auch in den optischen Dichten und Vorhersagewerten der MC-Miete zu beobachten. Die Huminsäuregehalte zwischen 9 und 15 % oTM in den Endproben der MC-Miete liegen deutlich unterhalb jener der KK-Miete.

Negative Auswirkungen der Zwiebeln auf die Bildung von Huminsäuren können in der KK-Miete nicht eindeutig festgestellt werden. Die optischen Dichten und die Huminsäurebestimmungen aus dem Vorhersagemodell in Abschnitt B liegen zwar unterhalb jener des Abschnitts A, jedoch weisen Abschnitt C und D wieder eine steigende Tendenz auf.

4.5.10 FTIR-Analysen

Nachfolgend sind die Mittelwerte der Infrarotbanden (jede der Proben wurde 5-fach gemessen) für die Proben aus Abschnitt A der KK-Miete und der MC-Miete dargestellt.

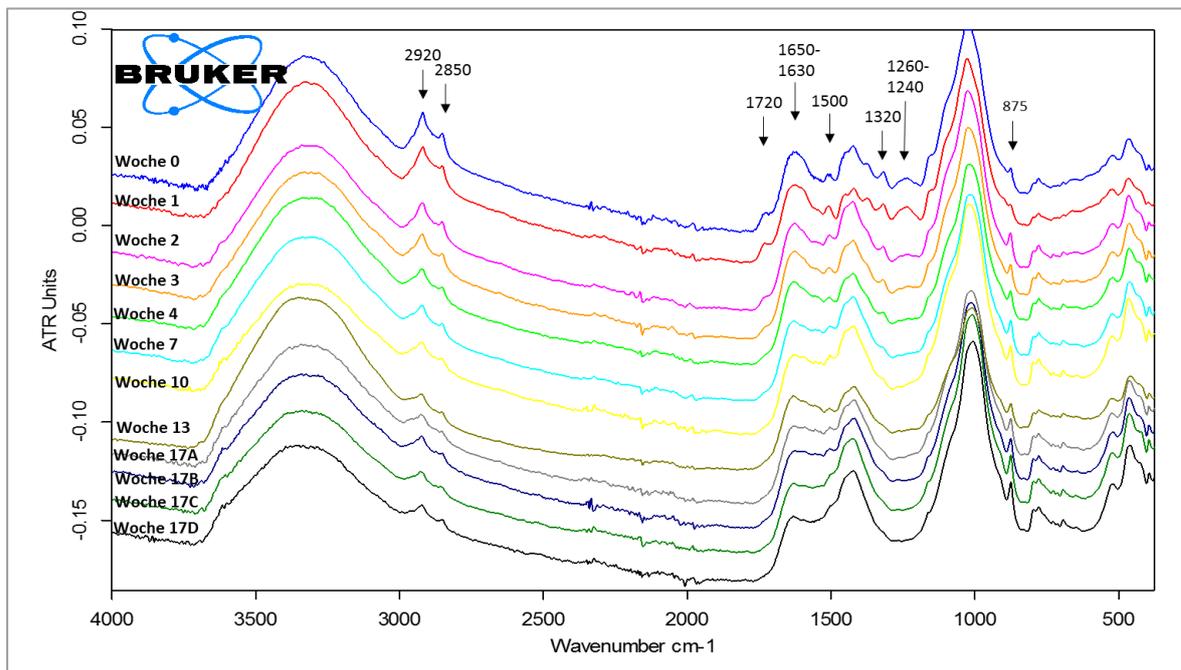


Abb. 27: Verlauf der Infrarotspektren der KK-Miete

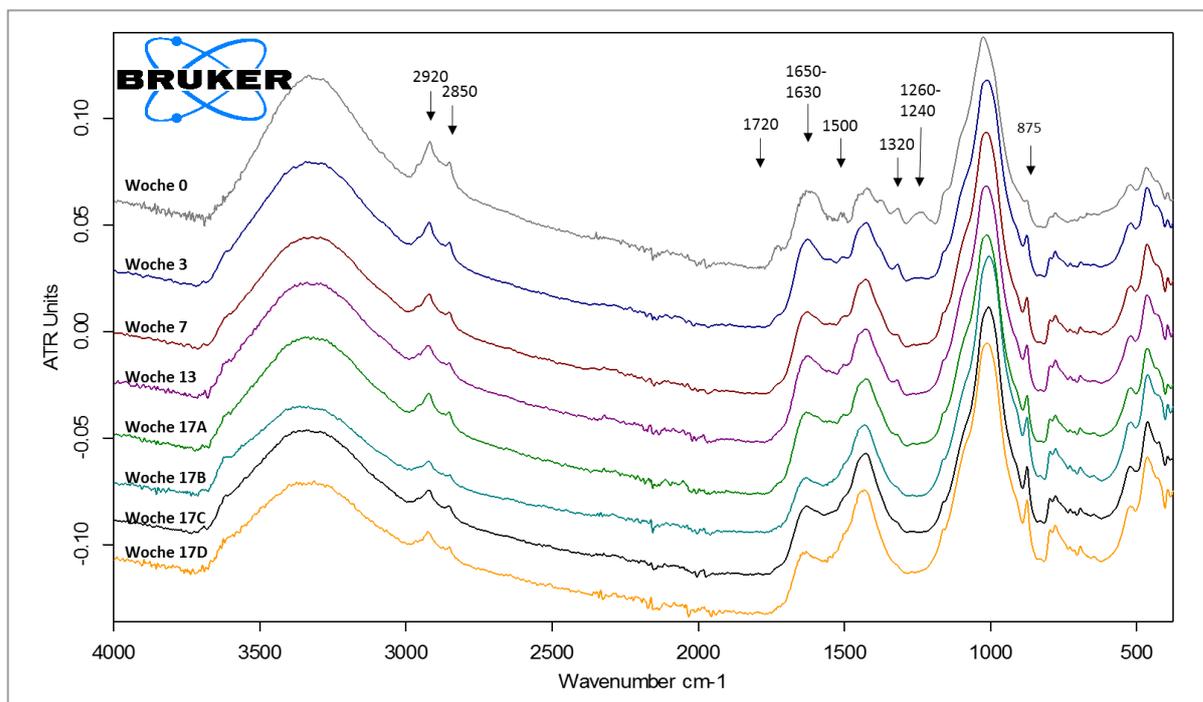


Abb. 28: Verlauf der Infrarotspektren der MC-Miete

Verschiedene Wellenzahlen stehen, wie bereits beschrieben, für unterschiedliche funktionelle Gruppen. Die Spektren der KK-Miete (Abb. 28) zeigen typische Änderungen durch Ab- und Umbauprozesse während der Rotte. So ist zum Beispiel die Abnahme der Peaks im Wellenzahlbereich zwischen 1260 - 1240 cm⁻¹ zu erkennen, welche die Carbonsäuren und Amide widerspiegeln und mit zunehmender

Reife abnehmen. Der Wellenzahlbereich $2920 - 2850 \text{ cm}^{-1}$ charakterisiert Methylenbanden. Auch diese nehmen mit fortschreitendem Abbau ab, da die Molekülstrukturen zusammenbrechen. Die Wellenzahl 875 cm^{-1} ist eine Carbonatbande und nimmt über den Rotteprozess zu, da es durch den Abbau von organischer Substanz zu einer relativen Anreicherung von anorganischen Komponenten im Kompost kommt. Die Bande bei der Wellenzahl 1320 cm^{-1} steht für die aromatischen primären und sekundären Amide, welche anfangs zunehmen und danach abnehmen und mit zunehmender Reife verschwinden. Im Wellenzahlbereich $1650 - 1630 \text{ cm}^{-1}$ überlappen sich mehrere Banden (Carboxylate, Amide, Alkene und Aromate). Bei den Banden zwischen 1740 und 1720 cm^{-1} handelt es sich um Aldehyde, Ketone, Carbonsäuren und Ester. Diese sind nur in einem sehr frischen Material zu erkennen und werden rasch abgebaut. Als Indikatorbanden für die Vorhersage von Huminsäuregehalte gelten die Wellenzahlbereiche zwischen $1745 - 1685 \text{ cm}^{-1}$ und $1610 - 1567 \text{ cm}^{-1}$.

Auch die Infrarotspektren der MC-Miete (Abb. 27) weisen einen ähnlichen Verlauf auf. Unterschiede ergeben sich in der Ausprägung der Bande zwischen $1650 - 1630 \text{ cm}^{-1}$, welche über die Zeit einen schwächeren Rückgang aufweist, als die Infrarotspektren der KK-Miete. Unterschiede gibt es auch in der Bande 1510 cm^{-1} . Der Peak bei dieser Wellenzahl ist in den Endproben der KK-Miete ausgeprägter als in jenen der MC-Miete. Die Bande bei 1510 cm^{-1} absorbiert Lignocellulosen und ist ein guter Indikator für die Erkennung von Bioabfall.

Interessanterweise korrelieren die Infrarotbanden der Proben der MC-Miete ebenfalls mit jenen des Vorhersagemodells, weshalb auch hier eine Quantifizierung der Huminsäuren ermöglicht wird. Auffallend ist, dass ein ähnlicher Rückgang in den Organik-Banden ($2920, 2850, 1650, 1540, 1240 \text{ cm}^{-1}$) festzustellen ist. Dass die Endmaterialien der MC-Miete ebenfalls als Bioabfallkomposte erkannt wurden, ist vermutlich auf die wichtige Indikatorbande (1510 cm^{-1} für Lignocellulose) zur Erkennung von Bioabfall zurückzuführen. In den Spektren der KK-Miete ist der Peak stärker ausgeprägt, obwohl ein stärkerer Abbau der Organik, als in der MC-Miete, festzustellen war. Dementsprechend sollte die Bande in den Spektren der MC-Miete einen höheren Peak aufweisen. Gründe für die geringere Detektion von Lignocellulose könnte sein, dass wegen der sehr groben Materialstruktur bei den Probenahmen Lignocellulose-Bestandteile unterrepräsentativ entnommen wurden.

4.5.11 Endprobenanalysen

Nachfolgend werden jene Untersuchungsparameter dargestellt, die nur an den Endmischproben analysiert wurden.

4.5.11.1 Wasserkapazität

Eine Siebung auf $< 10 \text{ mm}$, wie in der Kompostverordnung verlangt, wurde in diesem Fall nicht durchgeführt, da das Material der MC-Miete noch viel grobkörniges (nicht abgebautes) Material enthielt. Durch eine Siebung wäre nicht genügend Material für den Kresstest zur Verfügung gestanden.

Der Sollbereich nach Ö-NORM S 2200 liegt bei $\geq 100 \text{ g}/100 \text{ g TM}$.

Tab. 16: Wasserkapazitätsanalysen (MW) der Endproben der Abschnitte A bis D beider Mieten

	KK-Miete [g/100g TM]	MC-Miete [g/100g TM]
Abschnitt A	212	217
Abschnitt B	209	137
Abschnitt C	190	179
Abschnitt D	179	159

Tabelle 16 zeigt die Ergebnisse der Wasserkapazitätsanalysen der Endproben. Alle Werte übersteigen den geforderten Mindestwert der ÖNORM S 2200 deutlich.

Die Wasserkapazitäten lassen ein hohes Wasserrückhaltevermögen in beiden Mieten erkennen, wobei die Werte in allen Abschnitten der MC-Miete, bis auf Abschnitt A, höher sind als in der KK-Miete. Zudem ist auch hier eine starke Streuung in den Werten der MC-Mietenabschnitte zu erkennen.

4.5.11.2 Feuchtdichte

Tab. 17: Feuchtdichteanalysen (MW) der Endproben der Abschnitte A bis D beider Mieten

	KK-Miete [kg/l FM]	MC-Miete [kg/l FM]
Abschnitt A	0,74	0,50
Abschnitt B	0,74	0,81
Abschnitt C	0,82	0,73
Abschnitt D	0,80	0,86

Der Grenzwert der ÖNORM S 2200 (0,85 kg/l FM) wird lediglich von der Endprobe des Abschnitts D der MC-Miete leicht überstiegen. Der niedrige Wert von 0,5 kg/l FM in Abschnitt A der MC-Miete kann erneut durch fehlende Homogenisierungsprozesse des Substrats während der mikrobiellen Carbonisierung erklärt werden.

4.5.11.3 Überkorn

Tab. 18: Fraktion an Material > 11,2 mm Korngröße der Endproben aus Abschnitt A bis D beider Mieten

	KK-Miete	MC-Miete
	Überkorn > 11,2 mm [%]	
Abschnitt A	22	24
Abschnitt B	22	43
Abschnitt C	20	40

Abschnitt D	24	68
--------------------	----	----

Tabelle 18 zeigt die Überkornanteile (> 11,2 mm) der Endproben. Deutlich erkennbar ist der höhere Anteil an groben (unzureichend abgebauten) Materialbestandteilen in der MC-Miete.



Bild 24: Material größer 11,2 mm aus der MC-Miete

Bild 24 zeigt das Überkorn aus dem Siebprozess des Abschnitts C der MC-Miete. Zu erkennen sind unzersetzte Zwiebelreste, Pferdeäpfel und verholztes Material.

4.5.11.4 Nährstoffe

Tab. 19: Nährstoffgehalte (MW) der Endproben der Abschnitte A bis D der KK-Miete

	P₂O₅ (verfügbar) [% TM]	P₂O₅ (gesamt) [% TM]	K₂O (verfügbar) [% TM]	K₂O (gesamt) [% TM]	MgO (gesamt) [% TM]	CaO (gesamt) [% TM]
Abschnitt A	0,24	0,61	1,14	1,75	1,82	5,38
Abschnitt B	0,19	0,53	0,84	1,39	1,91	5,52
Abschnitt C	0,23	0,53	0,96	1,33	2,16	5,73
Abschnitt D	0,28	0,62	1,07	1,45	2,16	5,73

Tab. 20: Nährstoffgehalte (MW) der Endproben der Abschnitte A bis D der MC-Miete

	P₂O₅ (verfügbar) [% TM]	P₂O₅ (gesamt) [% TM]	K₂O (verfügbar) [% TM]	K₂O (gesamt) [% TM]	MgO (gesamt) [% TM]	CaO (gesamt) [% TM]
Abschnitt A	0,17	0,47	0,86	1,39	1,82	4,97
Abschnitt B	0,11	0,38	0,55	1,14	2,40	5,59
Abschnitt C	0,14	0,44	0,65	0,96	2,16	5,59
Abschnitt D	0,18	0,46	0,60	0,84	1,99	4,90

Die Nährstoffgehalte liegen in allen Abschnitten der KK-Miete relativ gesehen über jenen der MC-Miete (ausgenommen MgO-Gesamt in Abschnitt B) (Tab. 19 und 20). Aufgrund des geringeren Masseverlusts der MC-Miete ist jedoch davon auszugehen, dass in absoluten Zahlen die Nährstoffmasse gleich hoch ist, wie die der KK-Miete. Für eine Massenbilanzierung wäre das Wiegen der einzelnen Abschnitte zu Beginn und am Ende des Versuchs notwendig gewesen, was jedoch aus organisatorischen Gründen nicht möglich war. Ein Bilanzierungsversuch über die Mietenabmessungen und das Schüttgewicht erwies sich als zu ungenau. Die von Witte postulierten geringeren Nährstoffverluste seiner Methode gegenüber der herkömmlichen Kompostierung konnte jedoch nicht festgestellt werden.

In der KK-Miete liegen in Abschnitt A und D die Werte von P_2O_5 (verfügbar), P_2O_5 (gesamt) und K_2O (verfügbar) ca. gleich hoch, während die Werte in Abschnitt B und C darunter liegen. Auswirkungen der Zwiebeln können daher ausgeschlossen werden. Die Gehalte der Nährstoffe MgO (gesamt) und CaO (gesamt) weisen von Abschnitt A bis D einen Anstieg auf, woraus ein positiver Effekt der Zwiebeln geschlussfolgert werden kann. Laut Rimbach et al. (2010; zitiert nach Souci et al., 2008) beinhalten Zwiebeln durchschnittlich 162 mg/100 g K, 22 mg/100 g Ca, 9,6 mg/100 g Mg und 33 mg/100 g P. In den MgO- und CaO-Werten der KK-Miete werden die Anteile der Zwiebeln wiedergespiegelt, da diese in den Abschnitten B, C und D höher sind als in den Abschnitten A. Obwohl die Zwiebel besonders reich an Kalium ist, sind die Werte an K_2O (gesamt und verfügbar) in der KK-Miete in den Abschnitten A prinzipiell höher als in den Abschnitten B, C und D.

4.5.11.5 Kressetest

Der Kressetest ist an insgesamt acht Endproben durchgeführt worden. Um eventuelle Auswirkungen der Zwiebeln erkennen zu können wurden vier Endproben der Abschnitte A, zwei Endproben der Abschnitte C und zwei Endproben der Abschnitte D untersucht. Keines dieser Substrate ließ eine Keimverzögerung erkennen.

Die Ergebnisse der Keimraten und der Vergleich der Pflanzenfrischsubstanz (angegeben als %-Satz des Vergleichssubstratansatzes) sind in Tabelle 21 und 22 zusammengefasst.

Tab. 21: Ergebnisse des Kressetests der KK-Miete

	15% Kompostanteil		30% Kompostanteil	
	Keimrate	Biomasse	Keimrate	Biomasse
MW Abschnitte A	100%	100%	92%	94%
Abschnitt C	93%	83%	100%	101%
Abschnitt D	100%	109%	100%	108%

Tab. 22: Ergebnisse des Kressetests der MC-Miete

	15% Substratanteil		30% Substratanteil	
	Keimrate	Biomasse	Keimrate	Biomasse
MW Abschnitte A	100%	106%	100%	105%
Abschnitt C	100%	94%	100%	103%
Abschnitt D	100%	107%	70%	61%

Negative Auswirkungen des Zwiebelabbaus in der KK-Miete können im Kresstest nicht beobachtet werden. Der lediglich 83 %ige Biomasseanteil bei 15 %iger Kompostzugabe in Abschnitt C ist fragwürdig und lässt auf einen Auswertungsfehler schließen, da die 30 %ige Kompostzumischung desselben Abschnitts keine Auswirkungen auf die Pflanzenfrischsubstanz erkennen lässt.

Die Ergebnisse in Abschnitt A der MC-Miete zeigen höhere Werte in der Keimrate und dem Ertrag, als jene der KK-Miete. Als Grund für den Düngeeffekt kann die bessere Verfügbarkeit von Stickstoff aus dem anaeroben Abbau der MC-Miete gesehen werden. Die Ergebnisse der Ammoniumstickstoffanalysen ließen bereits höherer Gehalte in den Endproben der MC-Miete erkennen. Die 30 %ige Substratzumischung in Abschnitt D der MC-Miete weist eine geringe Keimrate und Biomasseproduktion auf, wodurch nicht von einem prinzipiell guten Düngeeffekt des MC-Substrats ausgegangen werden kann.

5. Schlussfolgerung

Die Untersuchungen zeigen, dass die mikrobielle Carbonisierung in diesen Feldversuchen zu keinem ausreichenden Abbaugrad der organischen Masse geführt hat, um ein geeignetes reifes Substrat zur Anwendung in der Landwirtschaft herzustellen. Anaerobe Milieubedingungen (Produktion von Kohlenstoffdioxid und Methan) innerhalb der Miete dominierten den Prozess. Dadurch wird zwar ein eingeschränkter Abbau von organischer Substanz erreicht, die Endproduktanalysen lassen jedoch auf eher konservierende Verhältnisse innerhalb der Miete ohne Produktion eines huminstoffreichen, stabilen Substrats schließen.

Dass die gebildeten treibhausrelevanten Gase, wie von Witte behauptet, in der Miete verbleiben, konnte mithilfe der FID-Messung nicht belegt werden. Die Kritik Wittes an der Förderung von Mineralisationsprozessen während der aeroben Kompostierung mag zum Teil berechtigt sein, jedoch erlaubt die aerobe Kompostierung nachweislich die Herstellung von stabilen, humusreichen Substraten. Darüber hinaus wird das bei der Kompostierung produzierte CO₂ als klimaneutral eingestuft.

Höhere Gesamtkohlenstoffgehalte des Substrats, wie sie in der mikrobiellen Carbonisierung postuliert werden, konnten zwar in einigen Endproben gemessen werden, allerdings sind diese eher auf den sehr eingeschränkten Abbau der organischen Masse zurückzuführen. Es ist damit zu rechnen, dass nach Aufbringen auf landwirtschaftlichen Flächen ein weiterer Abbau im Boden erfolgt. Auch die Laboruntersuchungen deuten auf geringeren Abbau der Organik während der mikrobiellen Carbonisierung hin. Der hohe Sauerstoffverbrauch der Mikroorganismen zu Versuchsende (AT₄), die geringe Bildung von Huminsäuren, die konstanten Ammonium- und Nitratgehalte und das noch weite C/N-Verhältnis bestätigen den nicht ausreichenden Abbau und fehlende biologische Stabilität des Substrats.

Der Rotteprozess der konventionellen Kompostierung zeigt typische Eigenschaften eines aeroben Abbaus. Die abnehmenden Temperaturverläufe zeigen eine Reduktion der mikrobiellen Aktivität, aufgrund der Abnahme der leicht verfügbaren Nährstoffquellen. Zusätzlich nehmen die Ammoniumstickstoffgehalte in den Proben über die Versuchsdauer ab, während die Nitratstickstoffwerte zunehmen. Eine Verminderung dieser war jedoch zu Versuchsende noch nicht festzustellen, wodurch auf noch verfügbare Stickstoffquellen in der organischen Masse zu schließen ist. Die nach wie vor detektierte CO₂ Produktion zu Versuchsende bestätigt dies. Die niedrigen

AT₄-Werte in allen Endproben zeigen, dass die Komposte zu Versuchsende als stabil einzustufen sind. Qualitativ ist der Kompost mit einer Huminsäurebildung von durchschnittlich 20 % oTM als mittelmäßig zu bewerten (Durchschnitt in österreichischen Reifkomposten liegt bei 24 % oTM). Ein höherer Gehalt an stabiler organischer Masse könnte durch einen vermehrten Einsatz von biologisch leichter verfügbaren Komponenten (Gemüsereste) erzielt werden. Zusätzlich wäre eine Verringerung der Einstreu im Pferdemist zu empfehlen. Damit würde das etwas erweiterte C/N-Verhältnis (38) von Beginn an reduziert und somit noch günstigere Ausgangsbedingungen für die Mikroorganismen geschaffen werden. Die Verwendung eines fortschrittlicheren Umsetzgerätes ist ebenfalls empfehlenswert. Damit könnte die vollständige Durchmischung (bis zum Boden) des Rottematerials gewährleistet und gleichzeitig eine geeignetere Mietenhöhe erreicht werden.

Die Untersuchung der mikrobiellen Carbonisierung hat vor allem gezeigt, dass eine Regelung oder Steuerung des Verfahrens aufgrund fehlender Homogenisierungsprozesse (kein Umsetzen) nicht möglich ist. Das Verfahren erlaubt zu keinem Zeitpunkt Einblick in die in der Miete stattfindenden Prozesse, wodurch steuernde Maßnahmen möglich wären. Der Vorgang wird von Anfang bis Ende sich selbst überlassen.

Die mikrobielle Carbonisierung mag zwar vor allem durch die Einfachheit der Anwendung (einmaliges Aufsetzen und Verdichten) sehr attraktiv zur Verwertung von organischen Abfällen erscheinen, jedoch kann die Erzeugung eines stabilen und humusreichen Substrats am Ende des Prozesses im Rahmen dieser Untersuchungen nicht bestätigt werden. Am ehesten kann der Prozess zur Konservierung von Stallmist in der Landwirtschaft angesehen werden und somit als eine Art „Vorbehandlung“ für die Kompostierung angesehen werden.

Die Thematik der Zwiebelverwendung in der Kompostierung kann anhand der vorliegenden Messergebnisse ebenfalls beantwortet werden. Die Verläufe der Temperatur- und Mietenporenluftmessungen, sowie die Laboruntersuchungen zeigen deutlich, dass der Einsatz von Zwiebeln in der Kompostierung keine Unterdrückung der mikrobiellen Aktivität zur Folge hatte. Unterschiedliche Zwiebelanteile hatten auch keinen Einfluss auf die Qualität der erzeugten Endprodukte. Der Huminsäuregehalt in den Endproben des Abschnitts B lag zwar bei durchschnittlich 17 % oTM, in Abschnitt C und D jedoch wieder bei ca. 20 % oTM.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Verfahren der Mikrobiellen Carbonisierung nicht als ein dem Stand der Technik entsprechendes Verfahren zur Verwertung von organischen Abfällen angesehen werden kann. Die fehlende Steuerungsmöglichkeit des Rotteprozesses, die aufgrund der Messdaten nicht ausreichende Hygienisierung, fehlende Homogenisierungsmöglichkeiten und die Freisetzung von treibhausrelevantem Methan sprechen derzeit gegen eine Anwendung der Mikrobiellen Carbonisierung. Über die gesamte Versuchsdauer ist das Ausgangsmaterial nur einem geringen Abbauprozess unterlegen. Die MC lieferte kein stabiles, huminstoffreiches Produkt zur Anwendung in der Landwirtschaft und kann daher nur als Vorstufe bzw. als eine Art Vorbehandlung vor einem aerob geführten Stabilisierungsprozess eingestuft werden.

6. Literaturverzeichnis

- Amlinger F. et. al, 2005. Stand der Technik Kompostierung-Grundlagenstudie. Hrsg: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.
- Amlinger F., 2006. Evaluierung der nachhaltig positiven Wirkung von Kompost auf die Fruchtbarkeit und Produktivität von Böden-Literaturstudie. Hrsg: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.
- Amlinger F., o.J. Fachinformation zur Kompostverordnung-Leitfaden zum Herstellen, Inverkehrbringen und zur Anwendung des Produktes Kompost gemäß Kompostverordnung. ARGE OÖ.
- Anonym, 2010. Die Nitratrichtlinie der EU. Europäische Union. Amt für Veröffentlichungen.
- Berg B. und McCaugherty C., 2014. Plant Litter- decomposition, humus formation, carbon sequestration. 3. Auflage. Springer Verlag. Berlin.
- BGBI. II Nr. 292/2001. Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Qualitätsanforderungen an Komposte aus Abfällen (Kompostverordnung).
- BGBI. II Nr. 385/2017. Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, mit der die Verordnung über das Aktionsprogramm 2012 zum Schutz der Gewässer vor Verunreinigung durch Nitrat aus landwirtschaftlichen Quellen geändert wird. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.
- BGBI. Nr. 215/1959 (WV). Wasserrechtsgesetz 1959 – WRG. 1959.
- BGBL. Nr. 513/1994, idF BGBI. Nr. 87/2005. Bundesgesetz über den Verkehr mit Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln.
- Bidlinger, W., 2000. Biologische Abfallverwertung. Eugen Ulmer GbH & Co. Stuttgart.
- BMLFUW, 2016. Österreichischer Nitratbericht. Hrsg: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.
- Böhm K., 2009. Compost quality determination using infrared spectroscopy and multivariate data analysis. Dissertation.
- Binner, E. 2002. Kompostierung von biogenen Abfällen. Skriptum zum ÖWAV Kurs, Fachkraft Abfallwirtschaft. 22.- 26.April 2002
- Brewer L., Sullivan D., 2003: Maturity and stability evaluation of composted yard trimmings. Compost Science & Utilization (Vol. 11, No.2); 96-112.
- Fachbeirat für Bodenfruchtbarkeit und Bodenschutz des BMLFUW, 2010. Richtlinien für die sachgerechte Düngung. Hrsg: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.

- Gerzabek M. et. al, 1993: Handbuch der Kompostierung – Ein Leitfaden für Praxis-Verwaltung-Forschung. Hrsg: Ludwig Boltzmann-Institut für biologischen Landbau und angewandte Ökologie.
- Gerzabek M.H. et. al, 1993. Bestimmung des Humifizierungsgrades. In: Bodenbiologische Arbeitsmethoden. Springer Verlag, 1993; 107-109.
- Gómez-Brandón M., Lazcano C., Domínguez J., 2007. The evaluation of stability and maturity during the composting of cattle manure. *Chemosphere* 70 (2008) 436–444.
- Insam H., Riddech N. & Klammer S., 2002. *Microbiology of Composting*. Springer-Verlag. Berlin.
- Jourdan B., 1988: Zur Kennzeichnung des Rottegrades von Müll und Müll-Klärschlamm-Komposten. *Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft*, Band 30. Schmidt Verlag. Berlin.
- Khalid Iqbal M., Shafiq T. und Ahmed K., 2010. Effect of different techniques of composting on stability and maturity of municipal solid waste compost. *Environmental Technology*, 31:2, 205-214.
- Kranert M., 2017. *Einführung in die Kreislaufwirtschaft*. 5. Auflage. Springer Fachmedien GmbH. Wiesbaden.
- Krogmann, U., 1994. *Kompostierung-Grundlagen zur Einsammlung und Behandlung von Bioabfällen unterschiedlicher Zusammensetzung*. Economica-Verlag. Bonn
- Meissl K. et. al, 2007. Humus als Qualitätskriterium für Kompost-Infrarotspektroskopie. Hrsg: Institut für Abfallwirtschaft.
- ÖNORM S 2023: 1993 11 01. Untersuchungsmethoden und Güteüberwachung von Komposten.
- ÖNORM S 2200/A1:2000 11 01. Gütekriterien für Komposte aus biogenen Abfällen.
- ÖNORM S 2202: 2014 06 01. Anwendungsrichtlinien für Kompost.
- Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit (AGES), 2010. Richtlinie für die Anwendung von Kompost aus biogenen Abfällen in der Landwirtschaft. Hrsg: Fachbeirat für Bodenfruchtbarkeit und Bodenschutz beim Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft.
- Rimbach G. et al., 2010. *Lebensmittel-Warenkunde für Einsteiger*. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg
- Scheffer F. und Schachtschabel P., 2011. *Lehrbuch der Bodenkunde*. 16. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg.
- Slonczewski J. und Foster J., 2009. *Mikrobiologie-Wissenschaft mit Zukunft*. Springer-Verlag. 2. Auflage. Berlin.
- Stahr et al., 2016. *Bodenkunde und Standortlehre*. 3. Auflage. Ulmer Eugen Verlag. Stuttgart.
- Tomatia U., Madejonb E. und Gallia E., 2013. Evolution of Humic Acid Molecular Weight As an Index of Compost Stability. *Compost Science & Utilization*, 8:2, 108-115.

Witte, o.J.a. Die Microbielle Carbonisierung Teil 1. Hrsg: Walter Witte

Witte, o.J.b. Die Microbielle Carbonisierung Teil 2. Hrsg: Walter Witte

Zehetbauer B., 2018. persönliche Mitteilung. Geschäftsführer Zehetbauer
Fertigrasen GmbH & Co KG.

7. Anhang

Anh. 1: Ergebnisse der Temperatur- und Porenluftmessungen (MW) der KK-Miete vor dem Umsetzen	75
Anh. 2: Ergebnisse der Temperatur- und Porenluftmessungen (MW) der KK-Miete nach dem Umsetzen	75
Anh. 3: Ergebnisse der Temperatur- und Porenluftmessugen (MW) der MC-Miete	76
Anh. 4: Ergebnisse der Wassergehaltsanalysen	77
Anh. 5: Ergebnisse der NH ₄ -N und NO ₃ -N Analysen	78
Anh. 6: Ergebnisse der GV-Analysen	79
Anh. 7: Ergebnisse der VARIO-MAX Analysen.....	80
Anh. 8: Ergebnisse der Huminsäureanalysen	82
Anh. 9: Verlauf der Infrarotbanden der KK-Miete.....	83
Anh. 10: Infrarotbanden der Endproben der KK-Miete.....	83
Anh. 11: Verlauf der Infrarotbanden der MC-Miete	84
Anh. 12: Infrarotbanden der Endproben der MC-Miete.....	84
Anh. 13: Ergebnisse der Carbonsäureanalysen	85
Anh. 14: Ergebnisse der P _{GES} und P _{CAL} Analysen	86
Anh. 15: Ergebnisse der Ca, K, K _{CAL} und Mg Analysen.....	87
Anh. 17: Ergebnisse der Wasserkapazität Analysen	88
Anh. 16: Ergebnisse der Volumengewicht Analysen	88
Anh. 18: Kalibrationsgerade Ammoniumstickstoff.....	89
Anh. 19: Kalibrationsgerade Nitratstickstoff	89
Anh. 20: Kalibrationsgerade Phosphatphosphor.....	89

Anh. 1: Ergebnisse der Temperatur- und Porenluftmessungen (MW) der KK-Miete vor dem Umsetzen

KK-Miete	(Vor umsetzen)																
	Abschnitt			B			C			D							
	Temperatur	CO2	O2	CH4	Temperatur	CO2	O2	CH4	Temperatur	CO2	O2	CH4	Temperatur	CO2	O2	CH4	
Tag																	
18.04.18	0	70,8	6,5%	13,4%	0,0%	52,5	11,6%	8,5%	0,0%	53,1	3,9%	15,4%	0,0%	53,1	3,9%	15,4%	0,0%
20.04.18	2	62,1	10,3%	9,8%	0,0%	68,3	11,4%	8,5%	0,0%	70,1	20,8%	0,8%	0,1%	70,1	20,8%	0,8%	0,1%
23.04.18	5	67,1	5,1%	15,2%	0,0%	66,4	8,0%	11,6%	0,1%	63,0	18,6%	2,4%	0,2%	63,0	18,6%	2,4%	0,2%
25.04.18	7	61,2	1,5%	18,7%	0,0%	63,2	4,6%	15,5%	0,0%	66,2	2,5%	17,3%	0,1%	66,2	2,5%	17,3%	0,1%
04.05.18	16	52,9	1,5%	19,1%	0,0%	63,2	5,0%	15,4%	0,1%	55,8	7,4%	12,6%	0,1%	57,2	3,8%	16,1%	0,4%
09.05.18	21	52,7	2,4%	18,3%	0,0%	57,5	3,0%	17,2%	0,1%	66,6	4,8%	15,1%	0,1%	52,5	3,4%	16,6%	0,3%
18.05.18	30	42,8	2,7%	17,9%	0,0%	52,7	4,4%	15,9%	0,0%	54,8	6,7%	13,4%	0,0%	54,6	6,9%	13,4%	0,6%
25.05.18	37	46,2	3,0%	17,2%	0,0%	45,8	3,6%	16,3%	0,0%	49,5	2,2%	17,6%	0,1%	41,4	3,7%	16,2%	0,1%
07.06.18	50	50,5	5,5%	14,0%	0,0%	53,2	6,4%	15,8%	0,0%	54,8	9,2%	11,5%	0,0%	50,4	9,2%	13,0%	0,1%
13.06.18	56	48,8	4,8%	16,4%	0,0%	55,5	5,0%	16,1%	0,0%	56,3	6,1%	14,8%	0,0%	47,1	5,3%	15,9%	0,0%
21.06.18	64	40,4	2,1%	18,5%	0,0%	48,8	3,9%	16,8%	0,0%	53,6	7,4%	13,4%	0,0%	41,1	1,5%	19,1%	0,0%
27.06.18	70	53,2	8,2%	13,5%	0,0%	47,5	3,5%	17,8%	0,0%	47,7	11,7%	10,5%	0,0%	41,9	5,0%	16,3%	0,0%
04.07.18	77	45,2	9,8%	12,3%	0,0%	47,6	8,1%	13,8%	0,0%	49,6	10,4%	11,7%	0,0%	37,6	2,9%	18,8%	0,1%
18.07.18	91	41,1	6,5%	15,0%	0,0%	37,9	4,8%	16,4%	0,0%	40,7	9,5%	12,4%	0,0%	38,9	6,0%	15,4%	0,1%
01.08.18	105	43,1	13,1%	8,2%	0,0%	39,3	5,8%	16,1%	0,0%	39,7	8,7%	13,2%	0,0%	43,9	12,2%	7,8%	0,1%
13.08.18	117	42,3	9,2%	11,8%	0,0%	41,0	8,0%	13,4%	0,0%	38,6	7,4%	13,0%	0,0%	43,4	14,8%	5,5%	0,1%

Anh. 2: Ergebnisse der Temperatur- und Porenluftmessungen (MW) der KK-Miete nach dem Umsetzen

KK-Miete	(nach umsetzen)																
	Abschnitt			B			C			D							
	Temperatur	CO2	O2	CH4	Temperatur	CO2	O2	CH4	Temperatur	CO2	O2	CH4	Temperatur	CO2	O2	CH4	
Tag																	
18.04.18	0																
20.04.18	2																
23.04.18	5																
25.04.18	7	40,8	5,1%	14,9%	0,0%	51,0	2,1%	18,3%	0,0%	54,3	7,0%	12,7%	0,1%	52,5	6,4%	13,7%	0,3%
04.05.18	16	43,3	2,8%	17,6%	0,0%	49,7	4,0%	15,8%	0,0%	54,1	6,3%	13,3%	0,1%	45,7	3,5%	16,4%	0,2%
09.05.18	21	48,3	2,8%	17,7%	0,0%	57,5	4,9%	14,7%	0,0%	57,9	7,0%	12,4%	0,0%	48,4	4,0%	16,1%	0,5%
18.05.18	30	34,3	1,9%	18,2%	0,0%	37,9	4,0%	15,7%	0,3%	44,4	2,8%	17,2%	0,0%	45,4	6,5%	10,5%	0,7%
25.05.18	37	41,7	2,7%	17,3%	0,0%	46,1	4,3%	14,4%	0,1%	46,7	4,9%	13,7%	0,1%	43,9	2,7%	17,5%	0,1%
07.06.18	50	44,5	4,5%	14,6%	0,0%	46,7	4,6%	14,4%	0,0%	49,7	4,7%	14,6%	0,0%	43,1	2,7%	17,6%	0,0%
13.06.18	56	43,7	4,1%	17,0%	0,0%	49,3	4,7%	16,2%	0,0%	51,1	6,2%	14,5%	0,0%	39,4	3,4%	17,6%	0,0%
21.06.18	64	40,0	5,2%	13,1%	0,0%	35,4	2,8%	16,2%	0,0%	37,8	6,6%	14,6%	0,0%	36,6	4,2%	17,5%	0,0%
27.06.18	70	41,2	3,5%	17,1%	0,0%	39,3	2,7%	17,0%	0,0%	43,0	6,1%	15,4%	0,0%	37,3	5,7%	15,8%	0,0%
04.07.18	77	33,9	4,2%	16,3%	0,0%	36,1	4,3%	17,3%	0,0%	36,0	6,0%	16,4%	0,0%	37,3	5,7%	15,8%	0,0%
18.07.18	91	42,8	3,5%	17,2%	0,0%	39,5	2,3%	17,5%	0,0%	39,8	4,6%	15,2%	0,0%	43,4	5,4%	15,9%	0,0%
01.08.18	105																

Anh. 4: Ergebnisse der Wassergehaltsanalysen

Probe	WG (105°C) (% FM)	Probe	WG (105°C) (% FM)
355/ I - 0.1	45,2	355/ D - 8.0	57,8
355/ I - 0.2	49,1	355/ I - 9.0	57,6
355/ II - 0.1	52	355/ D - 9.0	56,8
355/ II - 0.2	49,7	355/ I - 10.1	56,4
355/ I - 1.1	42,2	355/ I - 10.2	54
355/ I - 1.2	45,4	355/ I - 10.3	57,2
355/ I - 1.3	48,5	355/ D - 10.0	57
355/ I - 2.0	54,9	355/ I - 11.0	57,5
355/ I - 2.1	54,5	355/ D - 11.0	59,9
355/ I - 2.2	60	355/ I - 13.1	57,4
355/ I - 2.3	58,2	355/ I - 13.2	57,8
355/ I - 3.0	51,9	355/ I - 13.3	57,4
355/ I - 3.1	40,7	355/ II - 13.1	47,9
355/ I - 3.2	51,5	355/ II - 13.2	36,7
355/ I - 3.3	55,6	355/ D - 13.0	54,7
355/ II - 3.1	47,5	355/ I - 15.0	57,5
355/ II - 3.2	53,2	355/ D - 15.0	52,3
355/ I - 4.0	59,9	355/ I-A-17.1	57,3
355/ I - 4.1	48	355/ I-A-17.2	53,9
355/ I - 4.2	53,5	355/ II-A-17.1	49,5
355/ I - 4.3	52,3	355/ II-A-17.2	51,7
355/ I - 5.0	60,1	355/ I-B-17.1	56,1
355/ D - 5.0	65,9	355/ I-B-17.2	53,2
355/ I - 7.1	65	355/ II-B-17.1	53,5
355/ I - 7.2	65,8	355/ II-B-17.2	45,9
355/ I - 7.3	61,6	355/ I-C-17.1	55,4
355/ II - 7.1	56,6	355/ I-C-17.2	51,2
355/ II - 7.2	56	355/ II-C-17.1	55,8
355/ D - 7.0	59,6	355/ II-C-17.2	56,3
355/ I - 8.0	61,7	355/ I-D-17.0	51,2
		355/ II-D-17.0	51,4

Anh. 5: Ergebnisse der NH₄-N und NO₃-N Analysen

Proben- bezeich- nung	NH ₄ -N mg/l bzw. mg/kg TM	NO ₃ -N mg/l bzw. mg/kg TM	Proben- bezeich- nung	NH ₄ -N mg/l bzw. mg/kg TM	NO ₃ -N mg/l bzw. mg/kg TM
355/ I - 0.1	237,2	nn	355/ I - 10.2	20,7	156,1
	246,4	nn		20,7	160,0
355/ I - 0.2	265,2	24,8	355/ I - 10.3	25,7	185,5
	275,0	34,2		25,7	192,1
355/ II - 0.1	349,0	7,9	355/ I - 13.1	18,8	188,3
	369,8	11,7		17,6	172,8
355/ II - 0.2	233,6	nn	355/ I - 13.2	17,8	154,5
	228,6	nn		17,8	148,8
355/ I - 1.1	134,1	nn	355/ I - 13.3	17,6	162,0
	138,4	nn		16,4	154,5
355/ I - 1.2	151,4	nn	355/ II - 13.1	100,8	33,4
	146,8	nn		96,0	39,5
355/ I - 1.3	174,8	nn	355/ II - 13.2	75,0	117,9
	189,3	nn		79,0	122,9
355/ I - 2.1	82,4	nn	355/ II - 13.1 (WH)	0,0	22,6
	76,9	nn		0,0	28,8
355/ I - 2.2	68,8	nn	355/ II - 13.2 (WH)	0,0	122,3
	62,5	nn		0,0	128,9
355/ I - 2.3	77,8	nn	I-A-17.1	22,2	187,8
	71,8	nn		22,2	186,9
355/ I - 3.1	54,8	nn	I-A-17.2	20,6	240,3
	50,6	nn		20,6	232,1
355/ I - 3.2	61,9	nn	II-A-17.1	29,7	112,5
	61,9	nn		28,7	110,5
355/ I - 3.3	45,0	16,7	II-A-17.2	121,1	41,0
	50,7	10,8		120,1	44,7
355/ II - 3.1	185,7	nn	I-B-17.1	25,1	66,5
	195,2	nn		23,9	69,7
355/ II - 3.2	379,3	9,0	I-B-17.2	21,4	85,5
	363,2	22,2		21,4	87,2
355/ I - 4.1	43,3	20,0	II-B-17.1	69,9	28,0
	43,3	17,3		69,9	35,3
355/ I - 4.2	48,4	nn	II-B-17.2	50,8	9,6
	53,8	nn		50,8	9,0
355/ I - 4.3	47,2	nn	I-C-17.1	21,3	92,8
	47,2	nn		21,3	89,2
355/ I - 7.1	145,7	nn	I-C-17.2	18,4	145,1
	145,7	nn		18,4	139,3
355/ I - 7.2	48,2	nn	II-C-17.1	28,3	75,6
	49,7	nn		28,3	76,5
355/ I - 7.3	75,5	nn	II-C-17.2	40,0	28,8
	75,5	nn		40,0	30,2
355/ II - 7.1	138,2	6,5	I-D-17.0	19,5	118,0
	144,0	3,2		19,5	118,4
355/ II - 7.2	170,5	3,2	II-D-17.0	87,4	26,7
	181,8	5,5		87,4	22,2
355/ I - 10.1	24,1	147,7			
	24,1	154,1			

Anh. 6: Ergebnisse der GV-Analysen

Proben- bezeich- nung	Restfeuchte		Glühverlust		Proben- bezeich- nung	Restfeuchte		Glühverlust	
	% FM	Mittelwert % FM	% TM	Mittelwert % TM		% FM	Mittelwert % FM	% TM	Mittelwert % TM
355/ I - 0.1	7,0	7,0	71,8	71,8	355/ I - 10.1	6,9	7,0	48,5	48,4
	7,0		71,9			7,0		48,2	
355/ I - 0.2	6,5	6,5	69,2	69,0	355/ I - 10.2	5,9	6,0	40,1	40,3
	6,5		68,9			6,0		40,5	
355/ II - 0.1	5,8	5,8	61,1	61,7	355/ I - 10.3	7,3	7,3	44,6	44,6
	5,9		62,3			7,2		44,6	
355/ II - 0.2	6,3	6,2	69,1	68,9	355/ I - 13.1	11,8	11,8	41,0	41,2
	6,2		68,7			11,8		41,4	
355/ I - 1.1	6,5	6,6	78,7	79,0	355/ I - 13.2	13,1	13,0	38,5	38,2
	6,6		79,3			12,9		37,9	
355/ I - 1.2	5,7	5,7	64,2	64,1	355/ I - 13.2	9,0	9,0	40,9	41,1
	5,7		64,0			9,0		41,3	
355/ I - 1.3	7,0	7,0	70,6	70,7	355/ II - 13.1	6,7	6,7	45,0	45,1
	7,0		70,8			6,7		45,1	
355/ I - 2.1	7,6	7,6	61,0	60,6	355/ II - 13.2	6,1	6,1	44,5	44,5
	7,5		60,1			6,1		44,5	
355/ I - 2.2	7,3	7,5	59,9	61,0	355/ I-A-17.1	8,6	8,6	37,1	37,4
	7,6		62,1			8,6		37,7	
355/ I - 2.3	7,6	7,6	59,7	60,1	355/ I-A-17.2	6,4	6,4	39,1	38,8
	7,6		60,5			6,3		38,5	
355/ I - 3.1	8,0	8,0	57,7	58,1	355/ II-A-17.1	5,8	5,8	41,6	41,2
	8,0		58,5			5,7		40,8	
355/ I - 3.2	8,4	8,4	62,2	62,3	355/ II-A-17.2	6,5	6,5	48,4	48,0
	8,3		62,5			6,5		47,6	
355/ I - 3.3	8,4	8,3	50,2	50,2	355/ I-B-17.1	6,3	6,3	38,4	38,8
	8,3		50,2			6,4		39,3	
355/ II - 3.1	6,8	6,9	43,9	44,3	355/ I-B-17.2	6,8	6,8	43,0	43,0
	6,9		44,7			6,8		43,0	
355/ II - 3.2	7,9	7,9	54,9	55,3	355/ II-B-17.1	4,6	4,6	30,8	30,9
	7,9		55,7			4,6		31,0	
355/ I - 4.1	11,4	11,5	49,5	50,2	355/ II-B-17.2	4,9	4,9	26,4	26,5
	11,6		50,9			4,9		26,5	
355/ I - 4.2	8,4	8,4	54,7	54,2	355/ I-C-17.1	6,7	6,7	35,0	35,3
	8,4		53,7			6,6		35,7	
355/ I - 4.3	8,6	8,7	52,2	51,9	355/ I-C-17.2	6,5	6,5	34,0	34,0
	8,7		51,5			6,5		34,0	
355/ I - 7.1	8,1	8,1	44,0	44,3	355/ II-C-17.1	6,4	6,5	38,9	39,0
	8,1		44,5			6,5		39,0	
355/ I - 7.2	9,2	9,2	47,6	47,7	355/ II-C-17.2	6,5	6,5	40,5	40,5
	9,1		47,9			6,5		40,6	
355/ I - 7.3	8,6	8,6	46,7	46,9	355/ I-D-17.0	5,8	5,8	31,4	31,5
	8,6		47,0			5,8		31,7	
355/ II - 7.1	6,7	6,7	51,2	51,0	355/ II-D-17.0	4,3	4,3	28,2	28,2
	6,6		50,8			4,3		28,3	
355/ II - 7.2	5,9	5,9	43,7	43,6					
	5,9		43,6						

Anh. 7: Ergebnisse der VARIO-MAX Analysen

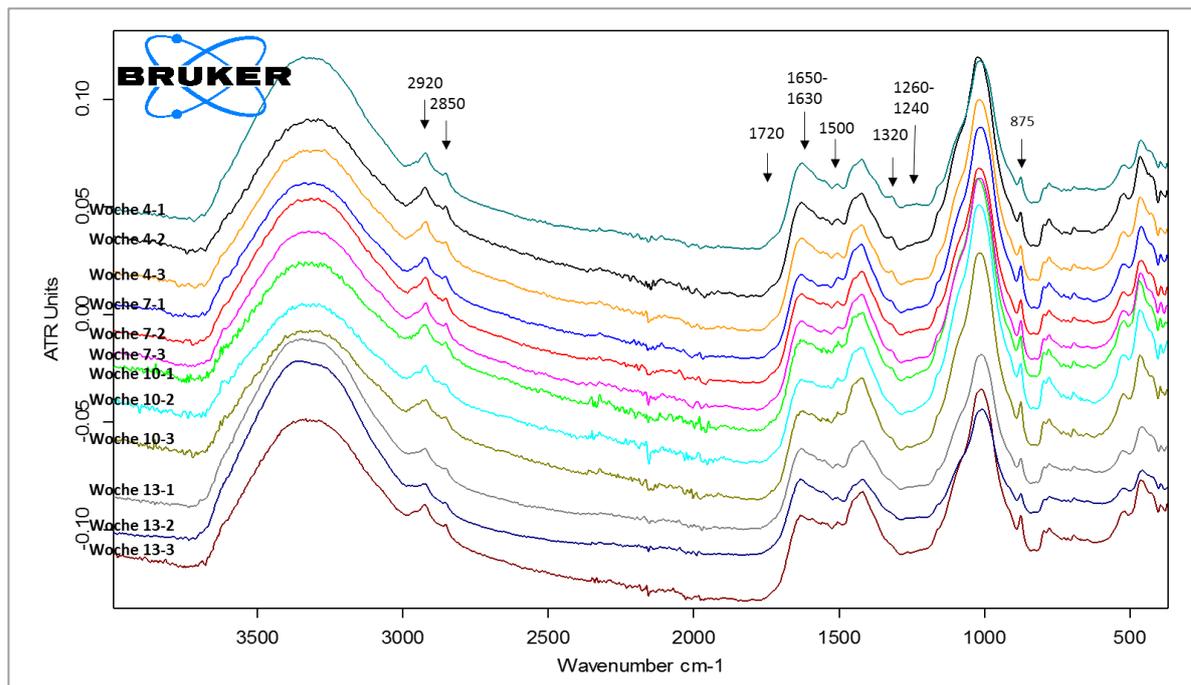
Proben- bezeich- nung	TOC	Mittelw. TOC	CaCO ₃	Mittelw. CaCO ₃	N	Mittelw. NDUMAS	C/N
	% TM	% TM	% TM	% TM	% TM	% TM	
355/I-0.1	37,1	37	2,9	3,0	0,9	0,9	40
	37,2		3,1		0,9		
355/I-0.2	36,5	37	3,6	3,5	1,1	1,0	36
	37,1		3,5		1,0		
355/II-0.1	31,4	32	5,3	5,4	0,9	0,9	34
	32,0		5,5		0,9		
355/II-0.2	36,8	36	3,3	3,7	0,9	0,9	41
	35,9		4,1		0,9		
355/I-1.1	40,8	40	3,7	3,5	0,9	0,9	43
	40,1		3,3		0,9		
355/I-1.2	32,9	33	5,3	4,9	1,0	1,0	32
	33,7		4,5		1,0		
355/I-1.3	37,2	37	3,4	3,4	1,1	1,0	36
	37,0		3,4		1,0		
355/I-2.1	31,0	31	8,0	7,6	1,1	1,1	29
	31,0		7,1		1,1		
355/I-2.2	32,5	33	4,0	3,9	1,1	1,1	30
	32,7		3,8		1,1		
355/I-2.3	30,9	31	4,3	4,7	1,2	1,2	27
	30,5		5,1		1,1		
355/I-3.1	31,0	31	7,0	6,7	1,0	1,0	31
	30,5		6,4		1,0		
355/I-3.2	32,6	33	4,9	4,6	1,2	1,2	27
	33,2		4,2		1,2		
355/I-3.3	26,7	26	6,3	6,3	1,3	1,2	21
	26,3		6,2		1,2		
355/II-3.1	22,9	23	8,5	8,6	0,9	0,9	25
	22,6		8,7		0,9		
355/II-3.2	29,2	29	6,4	6,4	1,1	1,1	26
	29,0		6,4		1,1		
355/I-4.1	26,7	27	6,7	7,5	1,2	1,2	22
	26,7		8,3		1,2		
355/I-4.2	28,1	28	7,3	6,7	1,3	1,3	22
	28,2		6,1		1,3		
355/I-4.3	27,8	28	5,7	6,4	1,2	1,3	22
	27,8		7,1		1,3		
355/I-7.1	24,4	24	7,5	7,8	1,3	1,2	19
	23,6		8,1		1,2		
355/I-7.2	25,2	25	7,6	7,3	1,4	1,4	18
	25,0		7,1		1,4		
355/I-7.3	24,7	25	7,1	7,0	1,4	1,4	18
	24,8		6,9		1,3		
355/II-7.1	25,3	26	7,3	8,2	1,1	1,1	24
	26,4		9,2		1,1		
355/II-7.2	22,2	22	10,8	9,9	1,0	1,0	22
	22,4		9,1		1,0		

Proben- bezeich- nung	Mittelw.		Mittelw.		Mittelw.		C/N
	TOC % TM	TOC % TM	CaCO ₃ % TM	CaCO ₃ % TM	N % TM	NDUMAS % TM	
355/I-10.1	24,9	25	8,4	8,0	1,3	1,3	19
	24,7		7,7		1,3		
355/I-10.2	21,1	21	8,3	8,3	1,3	1,3	17
	21,5		8,3		1,3		
355/I-10.3	22,7	23	7,2	7,0	1,3	1,3	17
	23,1		6,8		1,3		
355/I-13.1	21,6	22	7,9	8,2	1,4	1,4	16
	21,5		8,5		1,4		
355/I-13.2	19,9	20	10,3	10,3	1,3	1,3	15
	19,9		10,3		1,3		
355/I-13.3	21,3	21	8,9	8,7	1,4	1,3	16
	21,6		8,5		1,3		
355/II-13.1	24,6	24	7,4	7,7	1,1	1,1	23
	24,0		8,0		1,0		
355/II-13.2	22,7	23	7,3	7,3	1,0	1,0	23
	22,8		7,4		1,0		
355/I-A-17.1	19,6	20	8,7	8,7	1,3	1,3	15
	19,6		8,8		1,3		
355/I-A-17.2	20,1	20	8,3	8,7	1,3	1,3	15
	20,4		9,2		1,3		
355/II-A-17.1	20,8	21	10,9	10,0	1,0	1,0	21
	21,2		9,1		1,0		
355/II-A-17.2	25,2	25	9,4	9,0	1,2	1,2	22
	25,7		8,5		1,2		
355/I-B-17.1	20,8	21	10,2	9,9	1,1	1,1	19
	21,2		9,5		1,2		
355/I-B-17.2	23,4	23	9,1	9,5	1,2	1,2	19
	22,8		10,0		1,2		
355/II-B-17.1	15,6	16	15,1	13,9	0,8	0,8	20
	16,0		12,7		0,8		
355/II-B-17.2	13,5	14	10,9	10,9	0,7	0,7	19
	13,5		10,9		0,7		
355/I-C-17.1	18,4	18	9,8	9,9	1,2	1,2	15
	18,1		10,0		1,2		
355/I-C-17.2	18,0	18	10,2	10,1	1,2	1,2	14
	17,5		10,1		1,3		
355/II-C-17.1	20,6	20	10,0	10,1	0,8	0,8	24
	20,2		10,2		0,8		
355/II-C-17.2	20,3	20	11,0	10,8	1,1	1,1	19
	20,3		10,7		1,0		
355/I-D-17.0	16,2	16	10,8	10,4	1,1	1,1	14
	16,2		10,0		1,1		
355/II-D-17.0	14,5	14	10,7	11,0	0,9	0,9	17
	14,4		11,3		0,8		

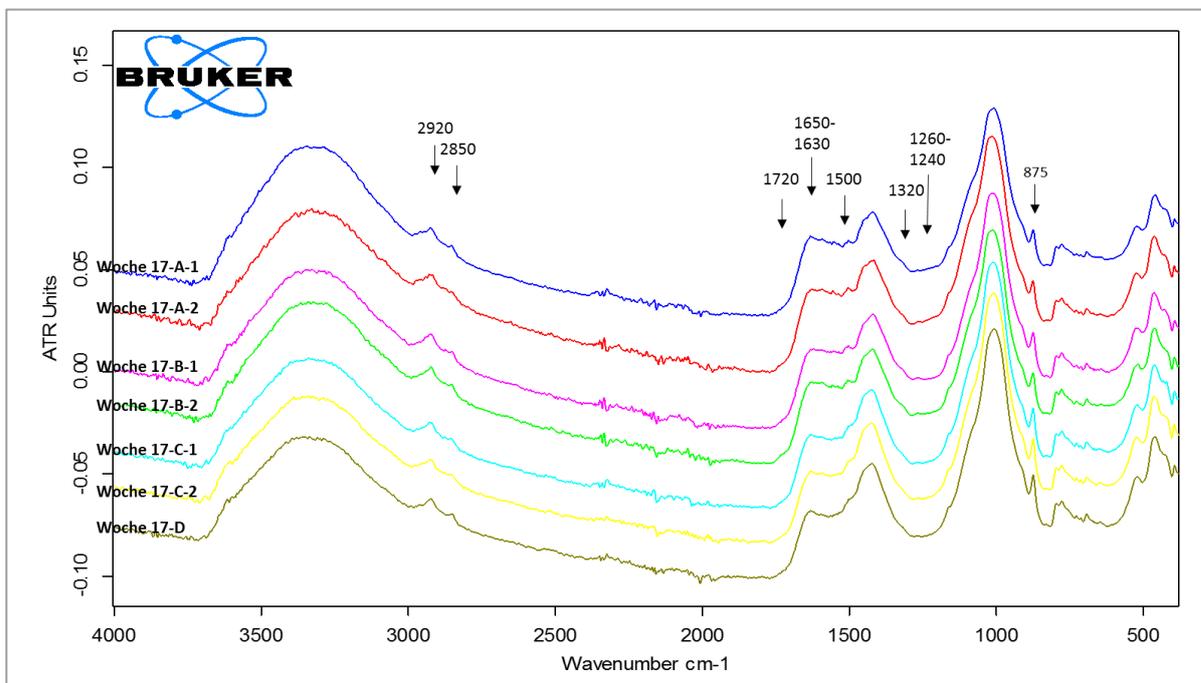
Anh. 8: Ergebnisse der Huminsäureanalysen

Probe	Huminsäure (Optische Dichte)	FTIR-Vorhersage (% HS)
355/ I - 3.1	331	
355/ I - 3.2	359	
355/ I - 3.3	425	
355/ II - 3.1	347	
355/ II - 3.2	322	
355/ I - 4.1	407	13,2
355/ I - 4.2	387	7,9
355/ I - 4.3	403	10,8
355/ I - 7.1	555	11,8
355/ I - 7.2	525	12,9
355/ I - 7.3	555	14,1
355/ II - 7.1	415	9,2
355/ II - 7.2	451	8,6
355/ I - 10.1	449	15,1
355/ I - 10.2	561	15,1
355/ I - 10.3	519	13,6
355/ I - 13.1	596	25,4
355/ I - 13.2	646	30,2
355/ I - 13.3	612	21,7
355/ II - 13.1	592	11,6
355/ II - 13.2	571	16,0
355/ I-A-17.1	578	23,5
355/ I-A-17.2	611	17,0
355/ II-A-17.1	523	11,4
355/ II-A-17.2	471	9,7
355/ I-B-17.1	571	18,5
355/ I-B-17.2	549	15,0
355/ II-B-17.1	540	12,7
355/ II-B-17.2	575	8,6
355/ I-C-17.1	780	19,0
355/ I-C-17.2	806	20,1
355/ II-C-17.1	489	10,2
355/ II-C-17.2	597	15,1
355/ I-D-17.0	753	19,6
355/ II-D-17.0	665	11,5

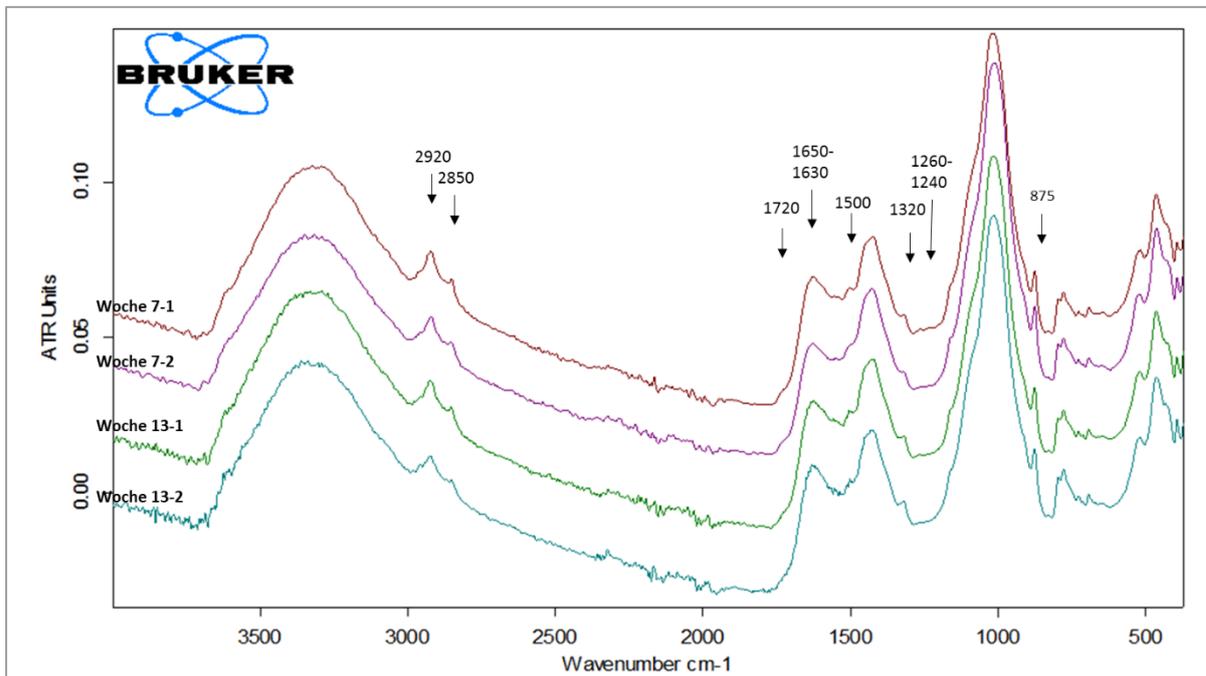
Anh. 9: Verlauf der Infrarotbanden der KK-Miete



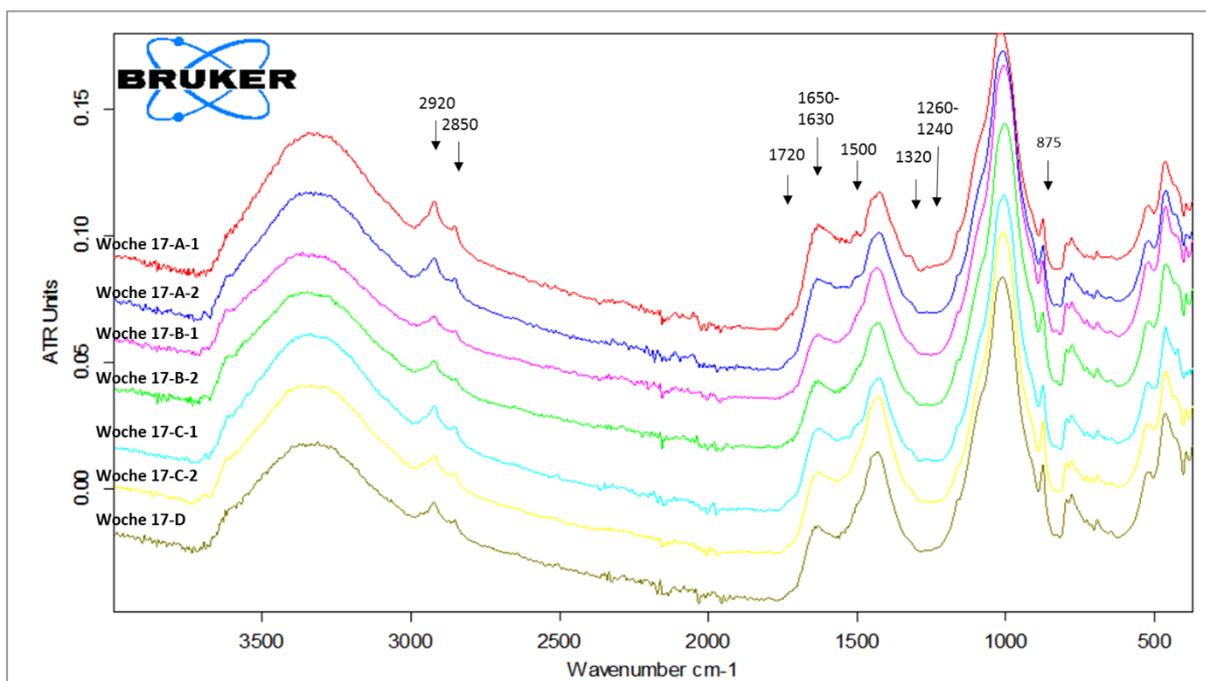
Anh. 10: Infrarotbanden der Endproben der KK-Miete



Anh. 11: Verlauf der Infrarotbanden der MC-Miete



Anh. 12: Infrarotbanden der Endproben der MC-Miete



Anh. 13: Ergebnisse der Carbonsäureanalysen

Probe	Essigsäure (ppm TM)	Propionsäure (ppm TM)	Isobuttersäure (ppm TM)	Buttersäure (ppm TM)	Isovalerian säure (ppm TM)	Valeriansäure (ppm TM)
355/I-0.1	237	nn	73	nn	nn	nn
355/I-0.2	1984	1218	nn	nn	nn	nn
355/I-1.1	nn	nn	nn	nn	nn	nn
355/I-1.2	2509	nn	nn	nn	nn	nn
355/I-1.3	3068	nn	nn	nn	nn	nn
355/I-2.1	nn	nn	nn	nn	nn	nn
355/I-2.2	nn	nn	nn	nn	nn	nn
355/I-2.3	nn	nn	nn	nn	nn	nn
355/I-3.1	nn	nn	nn	nn	nn	nn
355/I-3.2	nn	nn	nn	nn	nn	nn
355/I-3.3	nn	nn	nn	nn	nn	nn
355/I-4.1	nn	nn	nn	nn	nn	nn
355/I-4.2	nn	nn	nn	nn	nn	nn
355/I-4:3	nn	nn	nn	nn	nn	nn
355/I-7.1	543	nn	nn	nn	nn	nn
355/I-7.2	292	nn	nn	nn	nn	nn
355/I-7.3	2917	nn	nn	nn	nn	nn
355/I-10.1	nn	nn	nn	nn	nn	nn
355/I-10.2	nn	nn	nn	nn	nn	nn
355/I-10.3	nn	nn	nn	nn	nn	nn
355/I-13.1	nn	nn	nn	nn	nn	nn
355/I-13.2	nn	nn	nn	nn	nn	nn
355/I-13.3	nn	nn	nn	nn	nn	nn
355/I-A-17.1	nn	nn	nn	nn	nn	nn
355/I-A-17.2	nn	nn	nn	nn	nn	nn
355/I-B-17.1	nn	nn	nn	nn	nn	nn
355/I-B-17.2	nn	nn	nn	nn	nn	nn
355/I-C-17.1	nn	nn	nn	nn	nn	nn
355/I-C-17.2	nn	nn	nn	nn	nn	nn
355/II-0.1	2958	nn	nn	nn	nn	nn
355/II-0.2	2167	nn	nn	nn	nn	nn
355/II-3.1	3524	610	nn	nn	nn	nn
355/II-3.2	7991	897	363	nn	nn	nn
355/II-7.1	2581	207	nn	nn	nn	nn
355/II-7.2	6000	568	nn	nn	nn	nn
355/II-13.1	3455	269	nn	nn	nn	nn
355/II-13.2	nn	nn	nn	nn	nn	nn
355/II-A-17.1	nn	nn	nn	nn	nn	nn
355/II-A-17.2	2609	228	83	nn	nn	nn
355/II-B-17.1	nn	nn	nn	nn	nn	nn
355/II-B-17.2	nn	nn	nn	nn	nn	nn
355/II-C-17.1	136	68	nn	nn	nn	nn
355/II-C-17.2	252	nn	nn	nn	nn	nn
355/I-D-17.0	nn	nn	nn	nn	nn	nn
355/II-D-17.0	nn	nn	nn	nn	nn	nn

Anh. 14: Ergebnisse der P_{GES} und P_{CAL} Analysen

Proben- bezeich- nung	P % TM	P Mittelwert % TM	Proben- bezeich- nung	P % TM	P Mittelwert % TM
355/I-A-17.1 Pges 1	0,25	0,25	355/II-B-17.2 Pges 1	0,16	0,16
P-ges 2	0,24		Pges 2	0,15	
355/I-A-17.1 P-CAL 1	0,10	0,10	355/II-B-17.2 P-CAL 1	0,05	0,05
P-CAL 2	0,10		P-CAL 2	0,05	
355/I-A-17.2 Pges 1	0,27	0,28	355/I-C-17.1 Pges 1	0,24	0,23
P-ges 2	0,28		P-ges 2	0,22	
355/I-A-17.2 P-CAL 1	0,11	0,11	355/I-C-17.1 P-CAL 1	0,10	0,10
P-CAL 2	0,10		P-CAL 2	0,09	
355/II-A-17.1 Pges 1	0,18	0,19	355/I-C-17.2 Pges 1	0,23	0,23
P-ges 2	0,19		P-ges 2	0,23	
355/II-A-17.1 P-CAL 1	0,07	0,07	355/I-C-17.2 P-CAL 1	0,10	0,10
P-CAL 2	0,07		P-CAL 2	0,09	
355/II-A-17.2 Pges 1	0,23	0,22	355/II-C-17.1 Pges 1	0,17	0,18
P-ges 2	0,21		Pges 2	0,19	
355/II-A-17.2 P-CAL 1	0,08	0,08	355/II-C-17.1 P-CAL 1	0,06	0,06
P-CAL 2	0,08		P-CAL 2	0,06	
355/I-B-17.1 Pges 1	0,22	0,23	355/II-C-17.2 Pges 1	0,19	0,20
P-ges 2	0,24		Pges 2	0,20	
355/I-B-17.1 P-CAL 1	0,08	0,08	355/II-C-17.2 P-CAL 1	0,07	0,06
P-CAL 2	0,08		P-CAL 2	0,06	
355/I-B-17.2 Pges 1	0,25	0,23	355/I-PM-17.0 Pges 1	0,28	0,27
P-ges 2	0,22		Pges 2	0,26	
355/I-B-17.2 P-CAL 1	0,09	0,09	355/I-PM-17.0 P-CAL 1	0,12	0,12
P-CAL 2	0,09		P-CAL 2	0,13	
355/II-B-17.1 Pges 1	0,16	0,17	355/II-D-17.0 Pges 1	0,20	0,20
Pges 2	0,18		Pges 2	0,19	
355/II-B-17.1 P-CAL 1	0,05	0,05	355/II-D-17.0 P-CAL 1	0,08	0,08
P-CAL 2	0,05		P-CAL 2	0,07	

Anh. 15: Ergebnisse der Ca, K, K_{CAL} und Mg Analysen

Proben- bezeich- nung	Ca %TM	K %TM	Mg %TM	K CAL %TM
355/I-A-17.1	3,98	1,60	1,14	0,94
	4,02	1,35	1,15	0,88
Mittelwert	4,00	1,47	1,14	0,91
355/I-A-17.2	3,68	1,38	1,14	1,02
	3,69	1,41	1,14	0,96
Mittelwert	3,68	1,40	1,14	0,99
355/II-A-17.1	3,68	1,18	1,15	0,70
	3,76	1,09	1,16	0,64
Mittelwert	3,72	1,14	1,16	0,67
355/II-A-17.2	3,37	1,21	0,97	0,78
	3,40	1,23	0,98	0,71
Mittelwert	3,39	1,22	0,97	0,75
355/I-B-17.1	4,02	1,22	1,14	0,69
	4,11	1,13	1,13	0,64
Mittelwert	4,06	1,17	1,14	0,66
355/I-B-17.2	3,78	1,10	1,18	0,75
	3,83	1,19	1,20	0,70
Mittelwert	3,81	1,15	1,19	0,73
355/II-B-17.1	4,28	1,01	1,60	0,52
	4,40	1,09	1,64	0,50
Mittelwert	4,34	1,05	1,62	0,51

Proben- bezeich- nung	Ca %TM	K %TM	Mg %TM	K CAL %TM
355/II-B-17.2	3,67	0,83	1,32	0,41
	3,64	0,81	1,31	0,40
Mittelwert	3,66	0,82	1,32	0,40
355/I-C-17.1	4,03	1,10	1,29	0,81
	4,18	1,17	1,32	0,76
Mittelwert	4,11	1,13	1,31	0,78
355/I-C-17.2	4,07	1,06	1,26	0,84
	4,04	1,07	1,27	0,77
Mittelwert	4,05	1,07	1,26	0,81
355/II-C-17.1	3,66	0,73	1,20	0,45
	3,65	0,69	1,19	0,42
Mittelwert	3,65	0,71	1,19	0,44
355/II-C-17.2	4,30	0,97	1,37	0,66
	4,22	0,90	1,35	0,62
Mittelwert	4,26	0,94	1,36	0,64
355/I-D-17.0	4,14	1,15	1,33	0,91
	4,11	1,19	1,34	0,86
Mittelwert	4,12	1,17	1,33	0,89
355/II-D-17.0	3,50	0,66	1,16	0,52
	3,48	0,77	1,16	0,49
Mittelwert	3,49	0,72	1,16	0,50

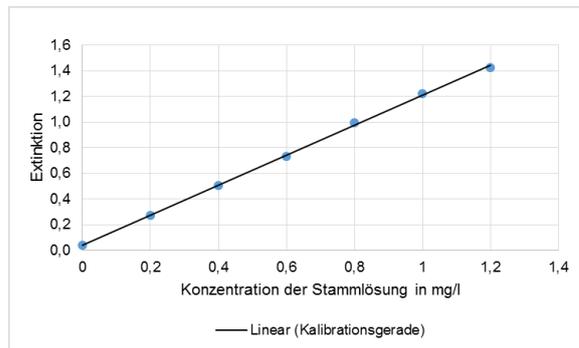
Anh. 17: Ergebnisse der Volumengewicht Analysen

Proben- bezeich- nung	Volumengewicht kg FM/l
355/I-A-17.1	0,77
355/I-A-17.2	0,71
355/II-A-17.1	0,52
355/II-A-17.2	0,48
355/I-B-17.1	0,74
355/I-B-17.2	0,74
355/II-B-17.1	0,73
355/II-B-17.2	0,89
355/I-C-17.1	0,83
355/I-C-17.2	0,80
355/II-C-17.1	0,77
355/II-C-17.2	0,68
355/I-D-17.0	0,80
355/II-D-17.0	0,86

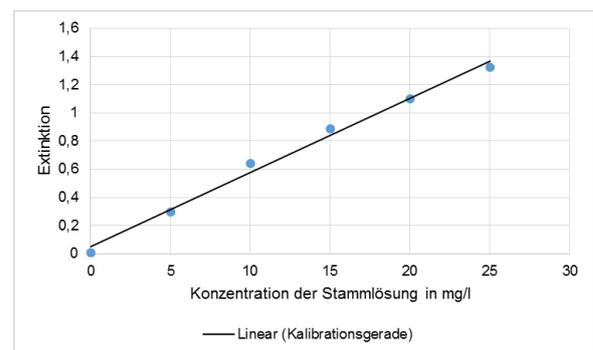
Anh. 16: Ergebnisse der Wasserkapazität Analysen

Proben- bezeich- nung	Wasserkapazität	
	% TM	Mittelwert % TM
355/I-A-17.1	221,1	218,6
	216,2	
355/I-A-17.2	205,5	204,3
	203,1	
355/II-A-17.1	199,5	195,7
	191,9	
355/II-A-17.2	227,5	238,4
	249,3	
355/I-D-17.0	176,9	178,8
	180,7	
355/II-D-17.0	160,5	159,3
	158,0	
355/I-C-17.1	187,0	193,0
	198,9	
355/I-C-17.2	188,2	186,3
	184,4	
355/II-C-17.1	168,5	173,5
	178,4	
355/II-C-17.2	192,4	185,3
	178,1	
355/I-B-17.1	209,5	211,4
	213,4	
355/I-B-17.2	214,7	207,1
	199,5	
355/II-B-17.1	159,2	146,4
	133,5	
355/II-B-17.2	129,7	127,9
	126,1	

Anh. 18: Kalibrationsgerade Ammoniumstickstoff



Anh. 19: Kalibrationsgerade Nitratstickstoff



Anh. 20: Kalibrationsgerade Phosphatphosphor

