Universität für Bodenkultur Wien
University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna

Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt
Institut für Siedlungswasserbau, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz

Leiter: Univ.Prof. DI Dr. Thomas Ertl

DIE OPTIMIERUNG DER KOMPOSTIERUNG VON FÄKALIEN

Masterarbeit
zur Erlangung des akademischen Grades
Diplomingenieur

eingereicht von:
HIRSCH, CORNELIA

Betreuer: Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. Günter Langergraber
Mitbetreuer: Dipl.-Ing. Erwin Binner

Matrikelnummer 01141361

10.10.2020

Vorwort

Diese Diplomarbeit ist am Institut für Siedlungswasserwirtschaft, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz (SIG), sowie am Institut für Abfallwirtschaft (ABF) der Universität für Bodenkultur Wien in Zusammenarbeit mit der Firma Wohnwagon entstanden.

Für die Möglichkeit, dieses spannende Thema an praktischen Beispielen untersuchen zu können, möchte ich mich bei der Firma Wohnwagon, speziell bei Theresa Mai, bedanken.

Mein besonderer Dank für ihre Unterstützung bei organisatorischen und inhaltlichen Fragestellungen gilt meinem Betreuer Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. Günter Langergraber und meinem Mitbetreuer Dipl.-Ing. Erwin Binner.

In den Laboren beider Institute erhielt ich großartige Unterstützung und viele wichtige Informationen zu den angewandten Analysemethoden. Dafür bedanke ich mich besonders bei Dipl.-Ing. Christina Fiedler, Dipl.- Ing. Dr. Marija Zunabovic-Pichler, Canan Keskinöz Linneweh, MSc, Wolfgang Stach, Zorica Stamenkovic und ganz speziell bei Ing. Thomas Ebner.

Beim Sammeln der Fäkalien habe ich sehr viele nette Menschen kennengelernt. Ich bedanke mich hierfür bei den Bewohnern des Wohnprojekts Hasendorf, vor allem bei Helmut Orschulik, und den netten Leuten aus Gutenstein.

Zuletzt möchte ich mich noch bei meiner Familie und bei meinen Freunden bedanken, die mich während meines Studiums immer unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung V

Abstract VI

1. Einleitung 1

2. Zielsetzung und Aufgabenstellung 2

3. Allgemeine Grundlagen 3

3.1 Wohnwagon 3

3.2 Trockentoiletten 4
3.2.1 Trockentoilette ohne Urintrennung 5
3.2.2 Trockentoilette mit Urintrennung 5

3.3 Kompostierung 6
3.3.1 Rottephasen 7
3.3.1.1 Überblick 7
3.3.1.2 Intensivrotte 7
3.3.1.3 Nachrotte 8
3.3.1.4 Reife 8
3.3.2 Techniken der Kompostierung 8
3.3.2.1 Offene Systeme 8
3.3.2.2 Geschlossene Systeme 9
3.3.3 Rotteparameter 9
3.3.3.1 Temperatur 9
3.3.3.2 Wassergehalt 9
3.3.3.3 pH-Wert 10
3.3.3.4 Elektrische Leitfähigkeit 10
3.3.3.5 Organikgehalt 10
3.3.3.6 Stickstoff 10
3.3.3.7 C/N-Verhältnis 10
3.3.4 Atmungsaktivität AT_4 11
3.3.5 Huminstoffe 11
3.3.6 Kompostqualität 11

3.4 Kompostierung von Fäkalien 11
3.4.1 Ausgangsstoffe 12
3.4.2 Zuschlagsstoffe 12
3.4.2.1 Sonnenerde Bio-Toilettenstreu 13
3.4.2.2 Pilze 14
3.4.3 Rechtliche Grundlagen 14
3.4.4 Untersuchte Indikatororganismen 17
3.4.4.1 Coliforme 17
3.4.4.2 Escherichia Coli 17
3.4.4.3 Enterokokken 17

4. Material und Methoden 18

4.1 Sammlung der Fäkalien 18

4.2 Rotteversuche 20
4.2.1 Beschreibung der Rotteversuchsanlage 20
4.2.2 Versuchsserien 22
4.2.2.1 Versuchsserie 1 22
4.2.2.2 Versuchsserie 2 24

4.3 Aufbereiten der Proben 26
4.3.1 Wassergehaltsbestimmung und Trocknen der Proben 26
4.3.2 Probenzerkleinerung und Homogenisierung 26

4.4 Untersuchung der Proben 28
4.4.1 Glühverlust 28

4.4.2 Total organic carbon (TOC) und Total inorganic carbon (TIC) ... 28
4.4.3 N_{Dumas} und C/N-Verhältnis ... 29
4.4.4 pH-Wert und Leitfähigkeit ... 29
4.4.5 Atmungsaktivität AT_4 ... 29
4.4.6 Huminstoffanalyse ... 29
4.4.7 Mikrobiologische Untersuchungen ... 30
4.4.7.1 Verwendete Nährmedien ... 30
4.4.7.2 Most-Probable-Number (MPN) Verfahren Enterolert ... 32
4.4.7.3 Testuntersuchung Versuchsserie 1 ... 32
4.4.7.4 Hauptuntersuchung Versuchsserie 1 ... 35
4.4.7.5 Testuntersuchung Versuchsserie 2 ... 36
4.4.7.6 Hauptuntersuchung Versuchsserie 2 ... 37

5. Ergebnisse und Diskussion ... 39

5.1 Temperatur ... 39
5.2 Kohlendioxidkonzentrationen (CO_2) in der Abluft und Zuluftmengen ... 41
5.3 Wassergehalt ... 45
5.4 pH-Wert (kompensiert auf 20 °C) ... 47
5.5 Leitfähigkeit (kompensiert auf 20 °C) ... 48
5.6 Glühverlust ... 49
5.7 TOC ... 50
5.8 Stickstoff ... 51
5.9 C/N–Verhältnis ... 52
5.10 Atmungsaktivität AT_4 ... 53
5.11 Huminstoffanalyse ... 54
5.12 Mikrobiologische Untersuchungen ... 56
5.12.1 Versuchsserie 1 ... 56
5.12.2 Versuchsserie 2 ... 58

6. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen ... 60

7. Verzeichnisse ... 63

7.1 Literaturverzeichnis ... 63
7.2 Abbildungsverzeichnis ... 66
7.3 Tabellenverzeichnis ... 69

8. Anhang ... 71

9. Eidesstattliche Erklärung ... 81

Kurzfassung

In Österreich ist es derzeit nicht zulässig, Fäkalabfälle zur Herstellung von Komposten mit Produktstatus zu deklarieren, da das Thema neu und wenig erforscht ist.

Die Firma *wohnwagon* verwendet Trockentoiletten und darin eine spezielle Einstreu, um die Bildung eines nährstoffreichen und hygienisch unbedenklichen Komposts zu fördern.

Um herauszufinden ob und wie viel dieser Einstreu optimal für die Kompostierung ist, wurden in einer Rotteversuchsanlage zwei Versuchsserien durchgeführt.

In Serie 1 wurden verschiedene Mischungen der Einstreu und Fäkalien getestet. Weiters wurde in Serie 2 zu den Fäkalien und der Einstreu biogenes Material sowie ein Mykorrhiza Pilz, der beim Abbau von pathogenen Keimen helfen soll, gemengt.

Die Ergebnisse zeigen, dass in Serie 1 keine Seuchenhygiene gewährleistet werden konnte, da die Temperaturen während der Kompostierung zu niedrig waren.

In Serie 2 wurden Temperaturen erreicht, die für die Hygieniserung ausreichen sollten. Auch bestätigten dies die mikrobiologischen Untersuchungen. Da es für solche Proben keine Norm gibt, sind die Ergebnisse mit Vorsicht zu betrachten. Es wurden aus Kosten- und Zeitgründen auch nicht alle Parameter untersucht, die laut Kompostverordnung für eine seuchenhygienische Unbedenklichkeit gefordert werden.

Bei den Kompostparametern schnitt Serie 2 bei der Huminstoffbildung besser ab. Die restlichen Ergebnisse waren in beiden Serien ähnlich. Der Wassergehalt lag (außer bei einer Mischung mit viel Einstreu) überall im Normalbereich. Die pH-Werte waren zu Beginn der Rotte etwas höher als bei üblichen Komposten, sonst jedoch normal. Die GV- und TOC-Ergebnisse waren eher niedrig und die N-Werte, mit Ausnahme von einer Mischung mit viel Einstreu, eher hoch. Auch die elektrische Leitfähigkeit, die C/N-Verhältnisse und die AT_4-Werte lagen überall im Normalbereich.

Schlussfolgernd kann gesagt werden, dass sich eine Mischung aus ca. 25 % Fäkalien, 25 % Einstreu und 50 % biogenem Material als optimal herausgestellt hat.

Abstract

In Austria it is not allowed to declare the compost made out of fecal waste as a product, because this topic is new and has been little researched.

A company that uses dry toilets is *wohnwagon*. They use a special litter that should enhance the formation of a nutrient-rich and hygienically safe compost.

To find out if the litter and which litter/feces ratio is optimal for composting, two test series were carried out in a rotting test facility.

In series 1, various litter/feces ratios were tested. In series 2, biogenic material and a mycorrhizal fungus that is supposed to help reduce pathogenic germs, was mixed to the feces and litter.

The tests have shown that in series 1 no disinfection could be guaranteed. This was mainly because the temperatures required were not reached.

In series 2 the temperatures required for disinfection were reached. This was also confirmed by the microbiological tests. Since there is no standardized procedure for the examination of the microbiological parameters for such samples, the results should be viewed with caution. Also, not all parameters were examined that are required by the Compost Ordinance for disease-hygienic harmlessness.

Regarding the results of the compost parameters, the formation of humic acids was better in series 2. The remaining results were similar in both series. The water content was in the normal range except in one mixture with more litter. The pH-values were slightly higher than in normal composts at the beginning, but in a normal range. The results of the loss on ignition and total organic carbon analyzes were rather low and the nitrogen values rather high due to the high proportion of feces in almost all mixing ratios (except for one with more litter). The conductivity values, the carbon/nitrogen ratios and the results of the aerobic biological activity test over 4 days were also in the normal range in both series.

In conclusion a mixture of 25 % feces, 25 % litter and 50 % biogenic material turned out as optimal.

1. Einleitung

Diese Arbeit wurde in Kooperation mit der Firma *wohnwagon* durchgeführt. Diese produziert autarke Wohneinheiten, sogenannte Wohnwagons, in denen ein Trockentoiletten-System mit einer speziellen Einstreu zum Einsatz kommt. Dieses und eventuelle Optimierungsmöglichkeiten dafür werden untersucht.

Trockentoiletten sind geeignet für Orte ohne Kanalanschluss. Bisher dominieren dort Senkgruben, Chemie-Toiletten oder traditionelle „Plumps-Klos“, die als wenig ökologisch beschrieben werden können. Ebenso steigt das Bewusstsein für Nachhaltigkeit in der Bevölkerung, wodurch Trockentoiletten ein großes Potenzial haben. Um dieses Potenzial nutzen zu können, ist es erforderlich, dass der mit den Rückständen dieser Toiletten erzeugte Kompost eine gute Qualität aufweist und hygienisch unbedenklich ist. Trockentoiletten bringen ebenso eine enorme Schonung der Ressource Wasser. Laut Kompostverordnung (BMFLUW, 2001) ist es jedoch in Österreich derzeit nicht zulässig Fäkalabfälle zur Herstellung von Komposten mit Produktstatus zu verwenden. Dies hat vor allem mit hygienischen Gründen zu tun, aber auch damit, dass dieses Thema noch sehr wenig erforscht ist. Aber die Gesetzeslage könnte sich ändern, wenn beispielsweise bewiesen wird, dass das Endprodukt eine gute Qualität aufweist und ohne hygienische Bedenken verwendet werden kann. In zahlreichen Regionen dieser Erde werden schon seit vielen Jahren Komposttoiletten erfolgreich eingesetzt, vor allem in Entwicklungsländern. Auch in Österreich gewinnen diese immer mehr an Beliebtheit. Beispiele dafür sind zum Beispiel Trockentoiletten in alpinen Regionen oder bei Veranstaltungen.

Am Institut für Siedlungswasserwirtschaft, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz (SIG) der Universität für Bodenkultur Wien wurden vor dieser Arbeit bereits drei Masterarbeiten durchgeführt, die sich mit dem Thema Trockentoiletten in alpinen Regionen beschäftigen. LEHNER (2013) setzte sich mit der Optimierung der physikalischen und chemischen Kompostparameter bei Trockentoiletten für den Einsatz bei alpinen Objekten auseinander, HOCHWARTER (2017) entwickelte mikrobiologische Untersuchungsmethoden zur vergleichenden Beurteilung des Betriebes von Trockentoiletten und SCHWAIGHOFER (2017) versuchte durch die Anwendung der genannten Methoden unter Zuhilfenahme weiterer Parameter (wie der Komposttemperatur oder der benötigten Lagerdauer) Aussagen über die Abbauraten ausgewählter Keimparameter zu treffen. Diese Arbeit baut hinsichtlich der mikrobiologischen Untersuchungen auf den genannten Masterarbeiten auf.

2. Zielsetzung und Aufgabenstellung

Ziel dieser Arbeit ist es das derzeit von der Firma *wohnwagon* verwendete Trockentoiletten-System hinsichtlich Hygiene- und Kompostparameter zu untersuchen und eventuelle Optimierungsmöglichkeiten sowie Einsatzgebiete für den entstandenen Kompost zu finden. Im Betrieb deren Toilette werden die Fäkalien mit einer Einstreumischung aus Kompost, Pflanzenkohle, Biofasern und Steinmehl kompostiert.

Die folgenden Fragestellungen sollen beantwortet werden:

1. Wie können die Einstreumenge und die Kompostbedingungen derart optimiert werden, dass mit einer möglichst geringen Menge des Einstreumaterials eine gute und hygienisch unbedenkliche Kompostqualität erreicht werden kann?
2. Welchen Einfluss hat es auf den Hygienisierungs- und Rotteprozess, wenn neben Toilettenabfällen und Einstreu auch biogenes Material oder ein Mykorrhiza Pilz verwendet wird?
3. Welche Einsatzmöglichkeiten gibt es für den entstandenen Kompost?

Hierfür wurden von Mai 2017 bis September 2018 Fäkalien gesammelt und in zwei Durchgängen in der Laborrotteanlage des Institut für Abfallwirtschaft (ABF) der Universität für Bodenkultur Wien kompostiert und begleitend auf die wichtigsten Kompost- und Hygieneparameter untersucht. Es wurden unterschiedliche Mischungsverhältnisse von Fäkalien zu Einstreu sowie Mischungen mit biogenem Material und einem Mykorrhiza Pilz getestet.

Gliederung der Arbeit

Im ersten Teil der Arbeit werden allgemeine Grundlagen über die Firma *wohnwagon*, über Trockentoiletten und über Kompostierung allgemein sowie über die Kompostierung von Fäkalien und deren rechtlichen Grundlagen im Besonderen vermittelt. Ebenso werden die wesentlichen physikalischen, chemischen und mikrobiologischen Parameter zur Beurteilung des Rotteprozesses und der Kompostqualität erläutert.

Der praktische Teil beginnt mit der Beschreibung der Fäkaliensammlung. Danach wird die Versuchsanlage und die Vorgangsweise der Versuchsdurchführung vorgestellt. Anschließend wird erläutert wie die Untersuchungen der Kompostproben auf die typischen Kompostparameter und die mikrobiologischen Untersuchungen durchgeführt werden.

Im Ergebnisteil werden alle Ergebnisse dargestellt und interpretiert.

Abschließend folgt eine Zusammenfassung der Arbeit und der wichtigsten Schlussfolgerungen.

3. Allgemeine Grundlagen

3.1 Wohnwagon

Abbildung 1: Wohnwagon Quelle: wohnwagon.at

Die Firma *wohnwagon* wurde im März 2013 gegründet. Seither baut sie Wohneinheiten, die flexibel aufgestellt werden können, sogenannte Wohnwagons (Abbildung 1). Sie sollen einen unabhängigen, natürlichen Wohnraum schaffen. Es gibt sie in verschiedenen Größen und als nichtautarke, teilautarke oder vollautarke Ausführung. Das Ziel der Firma *wohnwagon* ist Autarkie. Die vollautarke Ausführung des Wohnwagons hat eine Trockentoilette im Badezimmer und eine Pflanzenkläranlage am Dach. In dieser wird das benutzte Wasser gereinigt und dann in den Wohnwagon zurückgeführt und dort wiederverwendet. Der Strom wird durch Photovoltaik erzeugt und für Wärme und Warmwasser sorgt eine Solar-Holz-Zentralheizung. Alternativ können die Wohnwagons auch an das externe Wasser- und Stromnetz angeschlossen werden. Dies ist zum Beispiel bei nicht- oder teilautarken Ausführungen der Fall. Die Abbildungen 2 - 5 zeigen nochmals einen Wohnwagon von außen sowie von innen, Abbildung 4 die verwendete Trockentoilette.

Die Firma realisiert auch andere Projekte wie autarke Häuser oder betreibt einen Webshop, in dem Artikel rund um das Thema Selbstversorgung gekauft werden können. Ebenso schreibt sie einen Autarkie-Blog.

Abbildung 2: Wohnwagon mit Pool
Quelle: wohnwagon.at

Abbildung 3: Badezimmer im Wohnwagon
Quelle: wohnwagon.at

Abbildung 4: Trockentoilette im Wohnwagon
Quelle: wohnwagon.at

Abbildung 5: Inneneinrichtung im Wohnwagon
Quelle: wohnwagon.at

3.2 Trockentoiletten

Bei einer Trockentoilette wird kein Spülwasser verwendet. Es gibt Varianten, bei denen die menschlichen Ausscheidungen (Urin, Fäzes), das Toilettenpapier und eventuell auch Zuschlagsstoffe biologisch abgebaut werden (diese werden allgemein als Komposttoiletten bezeichnet) und Varianten, die nur eine Sammlung und keinen biologischen Abbau der gesammelten Inhalte vorsehen. Letztere sind zum Beispiel Chemie-, Verpackungs- und Verbrennungstoiletten und werden in dieser Arbeit nicht behandelt. Bei Varianten mit biologischem Abbau wird zwischen Toiletten mit externer und interner Kompostierung unterschieden. Ebenso gibt es Trockentoiletten mit und ohne Urinseparation (LEHNER, 2013).

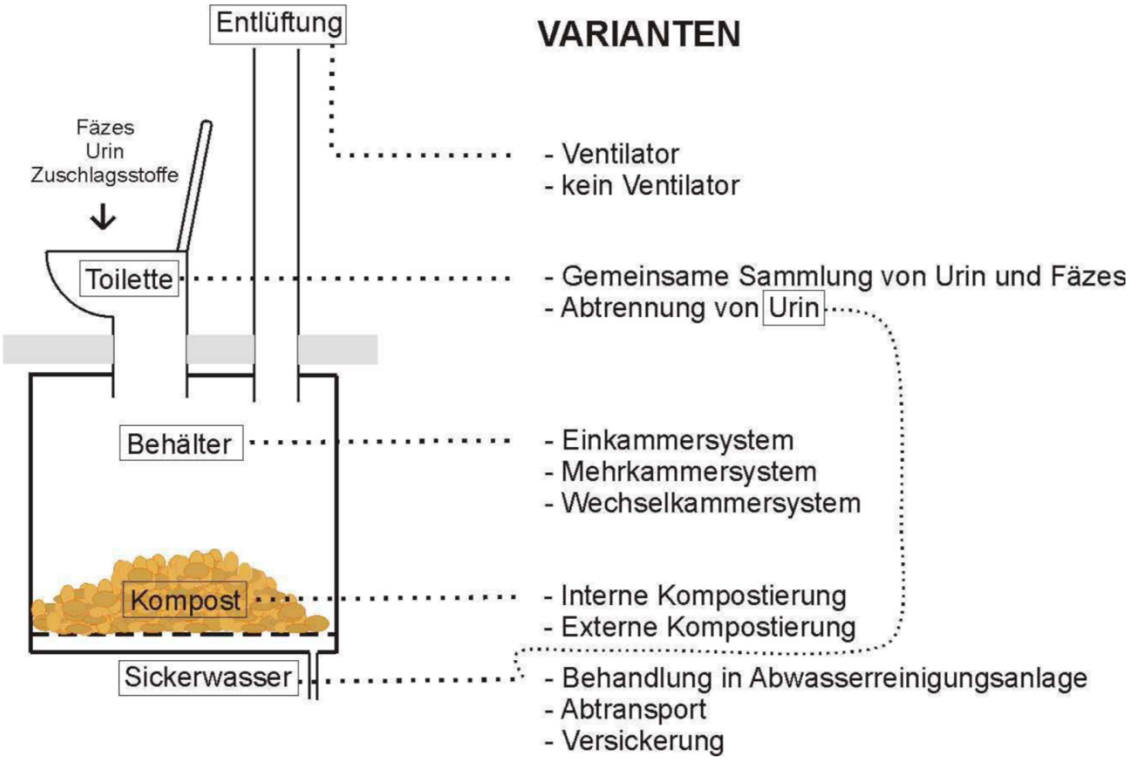

Abbildung 6: Aufbau einer Trockentoilette mit biologischem Abbau (LEHNER, 2013)

Der Aufbau einer klassischen Trockentoilette mit biologischem Abbau ist in Abbildung 6 dargestellt. Nach Benützung der Toilette werden die menschlichen Ausscheidungen inkl. dem Toilettenpapier und eventuell Zuschlagsstoffen in einem Behälter gesammelt. Bei Varianten mit interner Kompostierung bleiben die Materialien in dem Behälter und werden dort verrottet. Dieser Behälter kann aus einer oder mehreren Kammern bestehen. Dies ist in Abbildung 7 dargestellt. Bei Varianten mit externer Kompostierung werden die Fäkalien in dem Behälter nur zwischengelagert und an einem anderen Ort kompostiert. Hier wird meist das Wechselkammersystem angewandt. Um keine Geruchsbelästigung zu erzeugen, sind Trockentoiletten meist mit einem Ventilator ausgestattet (LEHNER, 2013).

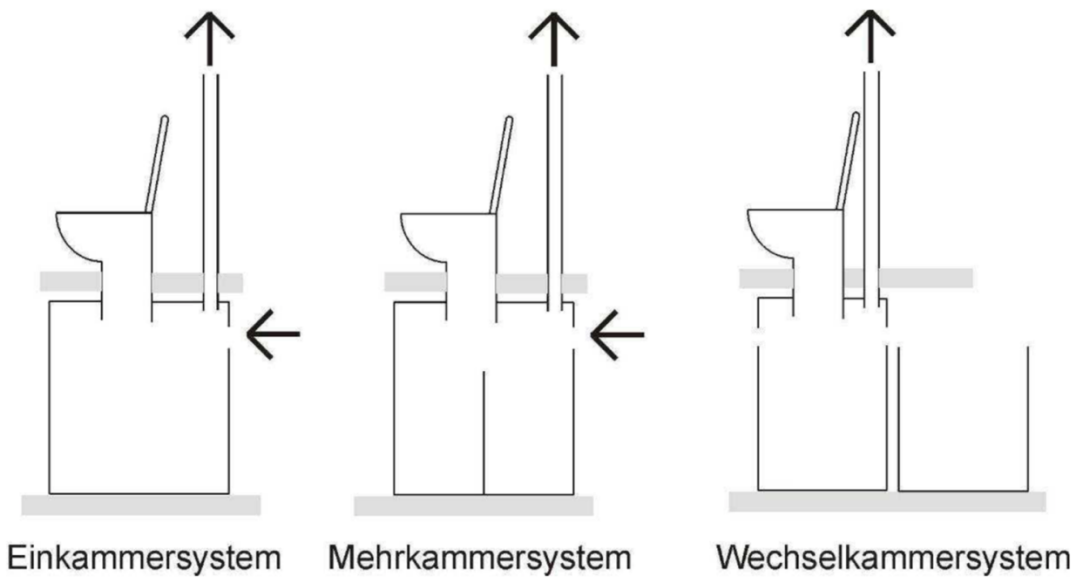

Abbildung 7: Systemvarianten von Trockentoiletten (LEHNER, 2013)

3.2.1 Trockentoilette ohne Urintrennung

Bei dieser Variante der Trockentoilette werden die Fäzes zusammen mit dem Urin gesammelt. Letzterer macht das meiste Gewicht aus und es ist wegen des hohen Feuchtigkeitsgehalts die Zugabe einer großen Menge an Zuschlagstoffen nötig. Meist wird überschüssige Flüssigkeit durch eine Drainage abgeleitet (LEHNER, 2013). Dies kann zum Beispiel durch ein Gitter erfolgen, das in der Mitte des Sammelbehälters eingebracht wird. Hier kann der Urin durchsickern und die festen Bestandteile bleiben oberhalb des Gitters.

3.2.2 Trockentoilette mit Urintrennung

Die Trockentoilette mit Urintrennung funktioniert indem der Urin separat von den Fäzes gesammelt wird. Dies funktioniert beispielsweise durch einen extra dafür vorgesehenen Einsatz im Toilettensitz. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 8 dargestellt. Hier wird im vorderen Bereich der Urin in einer Art Trichter aufgefangen und dann über einen Schlauch in einen separaten Behälter abgeleitet. Die Fäkalien fallen durch eine Öffnung im hinteren Bereich des Einsatzes in einen Sammelbehälter. Die Voraussetzung für die Funktionstüchtigkeit dieses Einsatzes ist jedoch, dass der Benutzer auf der Toilette sitzt. Es gibt auch Modelle, wo der hintere Bereich des Einsatzes durch eine Klappe geschlossen ist. Diese öffnet sich erst, sobald man sich auf der Toilette befindet. Dies dient vor allem dazu, dass man den Inhalt der Trockentoilette nicht sieht, da dies für manche Menschen eher unappetitlich ist. Abbildung 9 zeigt einen derartigen Einsatz. Da die Fäkalien bei einer Trockentoilette mit Urintrennung nicht mit dem Urin in Berührung kommen, kommt es zu keinen enzymatischen und biologischen Prozessen zwischen Kot und Urin und daher auch zu weniger Geruchsbildung. Ebenso ist so die Keimbelastung des Urins wesentlich geringer (LEHNER, 2013).

Abbildung 8: Trenneinsatz für Trockentoiletten
Quelle: separett.com

Abbildung 9: Trenneinsatz für Trockentoiletten mit verschließbarer Klappe Quelle: separett.com

3.3 Kompostierung

Die Kompostierung, oder auch Rotte genannt, ist ein aerober Prozess. Feste, organische Substanzen werden durch unterschiedliche Mikroorganismen wie Bakterien, Pilze und Aktinomyceten ab- und umgebaut. Die Mikroorganismen leben in einem Wasserfilm, der die organischen Partikel umgibt. Für den Abbauprozess benötigen sie Sauerstoff, der über den Wasserfilm aufgenommen und über das Luftporensystem zugeführt wird (BINNER et al., 2004). Als Reaktionsprodukte entstehen dabei Kohlendioxid, welches ebenso über das Luftporensystem abgeführt wird, und Wasser. Durch die durch Stoffwechselprozesse freigesetzte Reaktionsenthalpie entsteht ein Temperaturanstieg (WAGNER und ILLMER, 2004). Parallel zum Abbau der organischen Ursprungssubstanzen werden Zellsubstanzen und Huminstoffe aufgebaut.

Laut Kompostverordnung ist das Ziel der Kompostierung ein möglichst rascher und verlustarmer Abbau und Umbau der Ursprungssubstanzen und der Aufbau stabiler, pflanzenverträglicher Humussubstanzen (BMFLUW, 2001).

3.3.1 Rottephasen

3.3.1.1 Überblick

Der gesamte Rotteprozess wird in mehrere Rottephasen untergliedert (Abbildung 10).

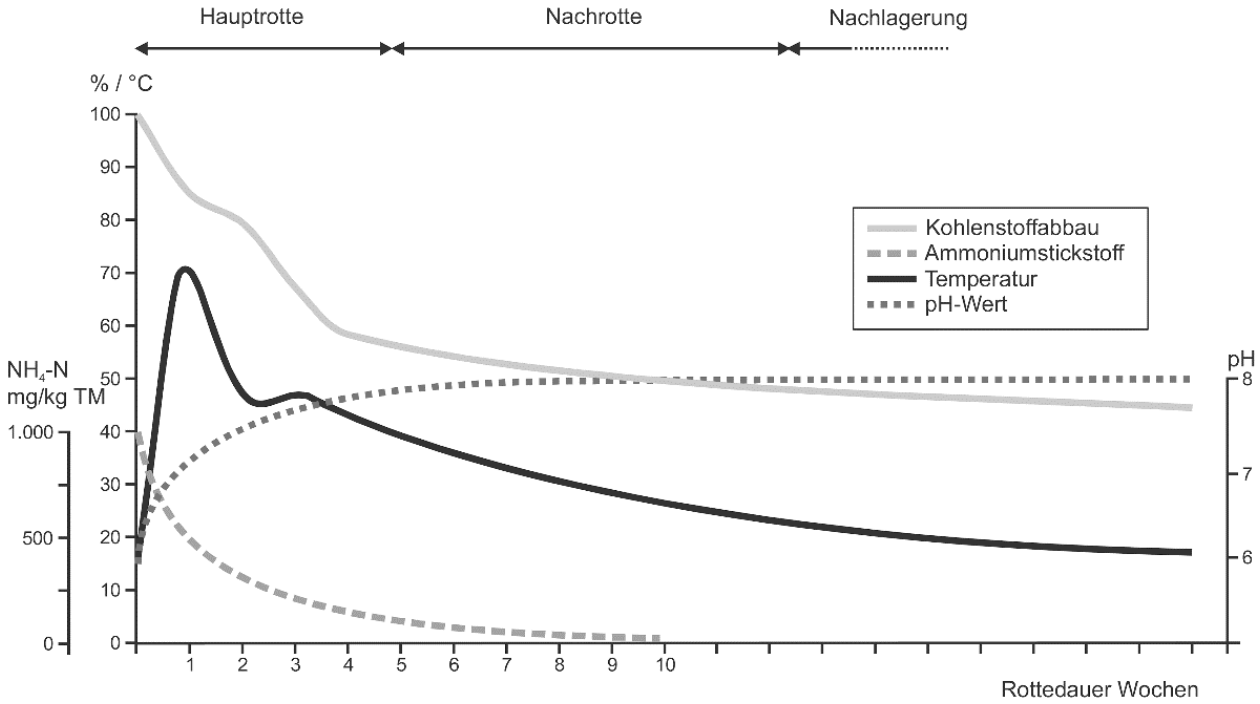

Abbildung 10: Rotteverlauf der Kompostierung (HUBER-HUMER und LECHNER, 2018)

3.3.1.2 Intensivrotte

Die Intensivrotte, welche auch Haupt- oder Heißrotte genannt wird (AMLINGER et al., 2005a), kann in mesophile und thermophile Phasen untergliedert werden. Erstere herrschen bei Temperaturen unter 45 °C vor und letztere bei Temperaturen darüber (BINNER et al., 2004). Am Beginn der Intensivrotte sind sowohl mesophile als auch thermophile Mikroorganismen vorhanden. Es dominieren jedoch mesophile zuckerverwertende Pilze und säureproduzierende Bakterien. In dieser mesophilen Phase werden vor allem leicht abbaubare Substanzen wie Kohlehydrate, Aminosäuren und Fettsäuren umgesetzt. Organische Säuren entstehen und der pH-Wert des Rotteguts sinkt (WAGNER und ILLMER, 2004). Die hohe mikrobielle Aktivität in dieser Phase führt zu einer starken Temperaturentwicklung. Mesophile Mikroorganismen werden verdrängt und es überwiegen thermophile Aktinomyceten und Bakterien. Temperaturen von bis zu 80 °C können nun erreicht werden (LINZNER et al., 2005). Während der thermophilen Phase werden weiterhin leicht abbaubare organische Substanzen abgebaut. Als Reaktionsprodukt kommt es zu einer erhöhten Bildung von CO_2 (BINNER et al., 2004). Diese Phase ist wichtig für die Hygienisierung. Um alle pathogenen Keime und Organismen abzutöten, muss, laut Kompostverordnung (BMFLUW, 2001), das gesamte Rottegut bei einem Wassergehalt von mindestens 40 % drei Tage lang einer Temperatur von mindestens 65 °C oder zehn Tage lang einer Temperatur von mindestens 55 °C durchgehend ausgesetzt sein (LECHNER, 2004). Der pH-Wert liegt idealerweise zwischen 7,5 und 8 (BINNER et al., 2004). Entgegen früherer Meinung ist die thermophile Phase wichtig für den Huminstoffgehalt im Endprodukt. Die gebildeten Stoffwechselprodukte gelten nach heutigem Wissensstand als essentiell für die Bildung von Humin- und Fulvosäuren. Wird die Mineralisierung zu stark forciert, werden diese Stoffwechselprodukte rasch zu CO_2 und Wasser abgebaut und stehen damit für den Huminstoffaufbau nicht mehr zur Verfügung (BINNER, 2020).

Am Ende der thermophilen Phase wird die mikrobielle Aktivität durch das Fehlen von leicht abbaubaren organischen Substanzen wieder geringer und die Temperatur und auch die CO_2-Bildung sinkt (KÖRNER, 2009).

3.3.1.3 Nachrotte

Die Nachrotte ist eine rein mesophile Phase. Aktinomyceten und Pilze können sich in dieser Phase entwickeln. Diese helfen beim Abbau langkettiger Polymere wie Cellulose, Hemicellulose, Stärke, Pektin und in geringem Ausmaß auch Lignin (WAGNER und ILLMER, 2004). Es werden vermehrt sekundäre stabile Huminstoffe gebildet (LINZNER et al., 2005).

3.3.1.4 Reife

Die Temperatur in der Reifephase wird immer geringer und gleicht sich immer mehr der Umgebungstemperatur an. Es kommt zum vermehrten Abbau von während der vorangegangenen Phasen gebildeten mikrobiellen Zellsubstanz (WAGNER und ILLMER, 2004). Stabile Huminstoffe werden in dieser Phase gebildet (LINZNER et al., 2005).

3.3.2 Techniken der Kompostierung

Es wird zwischen offenen und geschlossenen Rottesystemen unterschieden. Unabhängig vom gewählten Rottesystem muss vor der Rotte eine mechanische Aufbereitung der Inputmaterialien erfolgen. Diese ist abhängig von der Materialbeschaffenheit und -zusammensetzung. Übliche Aufbereitungsschritte sind beispielsweise Zerkleinern, Sieben und Mischen. Falls das Material verunreinigt ist, kann zusätzlich noch eine Aussortierung von Störstoffen durch zum Beispiel Windsichtung und Metallabscheidung erfolgen (WURZER, 2016). Zusätzlich müssen die Feuchtigkeit und das C/N-Verhältnis eingestellt werden, sodass diese weder zu hoch noch zu niedrig sind. Dieses kann durch die Beigabe von Wasser oder durch die Beigabe von Hilfs- und Zuschlagsstoffen erfolgen. Ebenso muss darauf geachtet werden, dass das Material eine gute Struktur (Luftporenvolumen) aufweist, damit der Gasaustauch stattfinden kann (RAUSCHER, 2017).

3.3.2.1 Offene Systeme

Die offenen Systeme werden als die klassischen Kompostiersysteme betrachtet. Sie sind durch den direkten Kontakt des Rottegutes mit der Außenluft gekennzeichnet. Das Rottegut wird in Mieten aufgeschüttet und die bei der Kompostierung entstehenden Emissionen entweichen in die Umgebungsluft. Dies sind sowohl Treibhausgase (Methan, Lachgas) als auch Staub- und Geruchsemissionen. Letztere führen oft zu Problemen bei Anrainen. Deshalb ist ein Mindestabstand der Kompostieranlage zu Siedlungsgebieten notwendig. Das Rottegut ist durch den direkten Kontakt mit der Umwelt Witterungseinflüssen ausgesetzt. Durch Maßnahmen wie die Abdeckung mit Vlies oder auch mit natürlichen Materialien wie Grasschnitt kann das Material geschützt werden.

Generell werden offene Kompostiersysteme anhand ihrer Belüftungsform unterschieden. Es gibt Systeme mit natürlicher Belüftung und welche mit zwangsweiser Belüftung. Bei der ersten Variante erfolgt die Sauerstoffzufuhr in den Rottekörper durch Konvektion. Die erwärmte Luft steigt im Inneren der Miete auf, wird durch die Mietendecke abgeführt und frische Luft strömt über die Seite ein. Für einen guten Gasaustausch ist die Materialstruktur besonders wichtig. Weist das Rottegut zu wenig Struktur auf oder werden zu hohe Mietenabmessungen gewählt, kann es zu einer Verdichtung des Materials und dadurch zu einer Unterversorgung mit Sauerstoff kommen. Es kommt zu einer Anreicherung von CO_2 und Wärme und es entstehen anaerobe Bedingungen. (BINNER et al., 2004).

Das zweite Kompostiersystem ist jenes mit zwangsweiser Belüftung. Hier wird zwischen Systemen mit drückender und saugender Belüftung unterschieden.

Bei beiden Systemen spielt das Umsetzen eine ganz wesentliche Rolle. Es dient primär der Auflockerung und Homogenisierung des Rotteguts. Durch Umsetzen wird verhindert, dass sich anaerobe Bedingungen, bevorzugte Luftkanäle oder Staunässe, bilden.

Umsetzen ist aber auch wichtig zur Hygieniserung. Das Material aus den Randzonen (dort erreicht es nicht die hohen Temperaturen des Mietenkerns) werden in die Hochtemperaturzone des Mietenkerns verlagert. Der Wassergehalt wird meistens während des Umsatzvorganges überprüft und bei Bedarf wird dem Material Wasser hinzugefügt. Die Umsetzintervalle hängen von der Prozessführung, den Materialeigenschaften und der Rottephase ab (AMLINGER et al., 2005b). Während der Intensivrotte sollte ein- bis zweimal pro Woche umgesetzt werden und während der Nachrotte nur noch alle paar Wochen (BINNER, 2020).

3.3.2.2 Geschlossene Systeme

Anders als bei den offenen Systemen ist bei dieser Variante das Rottegut von äußeren Einflüssen weitgehend abgeschlossen. Witterungseinflüsse und Emissionen könne dadurch verhindert werden. Das Material muss aber zwangsbelüftet (Saug- oder Druckbelüftung) werden. Die Kompostierung findet zum Beispiel in geschlossenen Hallen, sogenannten „Rottetunneln“, oder in Reaktoren statt. Durch die Zwangsbelüftung können wichtige Prozessparameter gesteuert werden. Der CO_2-Gehalt in der Abluft gibt Auskunft über die mikrobielle Aktivität im Rottegut und über dessen Sauerstoffversorgung. Bei Bedarf kann die Zuluftmenge gesteigert oder verringert werden. Die Abluft kann gesammelt und behandelt werden. Des Weiteren können die Temperatur und in geringem Maß auch der Wassergehalt, sowie die Belüftung des Materials, gesteuert werden. Durch die Möglichkeit dieser Steuerung zeichnen sich geschlossenen Systeme durch einen hohen Automatisierungsgrad aus. Sie sind jedoch sehr teuer, sowohl in der Anschaffung als auch im Betrieb, und daher wird meist nur die Intensivrotte darin durchgeführt. Diese kann durch die gute Regelung der wichtigsten Rotteparameter und den dadurch sehr guten und gleichbleibenden Rottebedingungen deutlich verkürzt werden. Andererseits besteht jedoch die Gefahr, dass durch die Zwangsbelüftung die Mineralisierung zu stark intensiviert und daher die Humifizierung behindert wird (BINNER et al., 2004).

3.3.3 Rotteparameter

3.3.3.1 Temperatur

Wie bereits in Kapitel 3.3.1 beschrieben, spielt die Temperatur bei der Kompostierung eine sehr bedeutende Rolle und ist ausschlaggebend für den Hygienisierungserfolg. Sie beeinflusst die mikrobielle Aktivität (bzw. wird durch diese beeinflusst) und ist somit einer der wichtigsten Parameter im Rotteprozess. Auf Grund höherer mikrobieller Aktivität steigen CO_2-Emissionen (Mineraliserungsraten) parallel zur Rottetemperatur - übersteigt die Temperatur den Optimalbereich von 50 - 60 °C sinken die Mineraliserungsraten jedoch wieder (BINNER et al., 2004).

3.3.3.2 Wassergehalt

Der Wassergehalt des Rotteguts ist extrem wichtig, da die Mikroorganismen Nährstoffe und Sauerstoff nur in gelöster Form aufnehmen können. Der optimale Wassergehalt ist abhängig von Zusammensetzung und Struktur des Materials (Wasserhaltevermögen). Der Wassergehalt darf weder zu hoch noch zu gering sein. Laut BINNER et al. (2004) findet die höchste mikrobielle Aktivität in der Regel bei einem Wassergehalt zwischen 50 % bis 60 % statt. Bei einem zu geringen Wassergehalt wird die biologische Aktivität gebremst. Laut KROGMANN (1994) wird bei der Kompostierung ein Wassergehalt von mindestens 40 % benötigt. BINNER et al. (2004) sprechen von einer unteren Grenze von 30 % bis 35 %. Ein zu hoher Wassergehalt wiederum, beispielsweise über 60 %, kann die Luftporen des Substrats blockieren und es kommt zu Sauerstoffmangel (KÖRNER, 2009). Durch den Sauerstoffmangel wechseln die biologischen Vorgänge vom aeroben in den anaeroben Bereich.

3.3.3.3 pH-Wert

Der pH-Wert des Rotteguts wird durch dessen Zusammensetzung und Lagerungsdauer beeinflusst. er hat wesentlichen Einfluss auf die Aktivität der Mikroorganismen. Die meisten an der Rotte beteiligten Mikroorganismen sind nicht säuretolerant. Positiv wirken sich daher pH-Werte im schwach alkalischen Bereich (bis maximal 11) aus, während Werte unter 7 im Ausgangsmaterial eher eine Verlangsamung bewirken. Menschliche Fäkalien haben einen durchschnittlichen pH-Wert von 6 bis 7 (BERGER und LORENZ-LADENER, 2008) während Küchenabfälle zum Beispiel einen eher geringen pH-Wert haben (KROGMANN, 1994). Am Beginn der Kompostierung sinkt der pH-Wert durch die Bildung organischer Säuren. Im Verlauf der Rotte steigt dieser dann durch den Abbau dieser Säuren wieder an und erreicht bei einer optimalen Rotte Werte zwischen 7 bis 8,5. Während der Reifephase sinkt der pH-Wert wieder und sollte im leicht alkalischen Bereich liegen (KÖRNER, 2009).

3.3.3.4 Elektrische Leitfähigkeit

Die elektrische Leitfähigkeit ist ein Maß für den Salzgehalt. Dieser steigt durch die steigende Mineralisierung der Ausganssubstanzen und die damit verbundene Abnahme des organischen Materials während der Rotte. Somit steigt auch die Leitfähigkeit. Durch eine hohe Sickerwasserbildung können jedoch Salze aus dem Rottegut ausgewaschen werden und daher kann die Leitfähigkeit wieder sinken. Bioabfallkomposte haben eine durchschnittliche Leitfähigkeit von 2 bis 4 mS/cm. Eine erhöhte Leitfähigkeit bewirkt zwar in der Regel keine Störung des Rotteverlaufs, kann jedoch die Anwendbarkeit des erzeugten Komposts (Pflanzen sind unterschiedlich salztolerant) einschränken (BINNER, 2012; zit. bei LEHNER, 2013).

3.3.3.5 Organikgehalt

Der Gesamtgehalt an organischen Substanzen nimmt während des Rotteverlaufs ab, da die organischen Substanzen von aeroben Mikroorganismen als Energie- und Nährstoffquelle verwertet werden. Dabei nehmen die Mikroorganismen Sauerstoff auf und fixieren einen Teil des Kohlenstoffs in ihrer Zellsubstanz; der restliche Teil wird unter Wärmeentwicklung als CO_2 freigesetzt. Diese Abnahme lässt sich analytisch anhand eines sinkenden Glühverlustes (GV) bzw. sinkenden organischen Gesamtkohlenstoffs (TOC) nachweisen (LECHNER et al., 2005).

3.3.3.6 Stickstoff

Durch die Mineralisierung nimmt auch der Gehalt an Gesamtstickstoff (N) im Rottegut üblicherweise im Laufe der Kompostierung zu. Sinkt er ab, ist dies auf Stickstoffverluste über Sickerwasser (Ammonium (NH_4)) oder die Abluft (Ammoniak (NH_3)) zurückzuführen. Stickstoffverluste sind bei zu engem C/N-Verhältnis zu erwarten. Der vorhandene Stickstoff kann nicht zur Gänze von den Mikroorganismen verwertet werden; dies führt zur Bildung von NH_4. Sobald das Rottegut während der Hauptrotte einen pH-Wert von ca. 7 überschreitet, wird NH_4 in gasförmiges NH_3 umgewandelt wodurch Stickstoff über die Abluft verloren geht. Im Verlauf der Rotte steigt der Stickstoffgehalt dann normalerweise wieder (BINNER, 2020). Die Spannweite des Gesamtstickstoffs bei Komposten liegt üblichen bei 0,6 – 2,3 % TM (BMLFUW, 2001).

3.3.3.7 C/N-Verhältnis

Das Verhältnis von organischem Kohlenstoff zu Stickstoff (C/N) des Rottematerials hat großen Einfluss auf die Abbaurate und (wie im vorangegangenen Kapitel erwähnt) auf die Stickstoffverluste. Mikroorganismen können Kohlenstoffverbindungen nur verwerten, wenn ihnen auch eine ausreichende Menge an Stickstoff zur Verfügung steht. Zu Beginn der Rotte herrschen günstige Bedingungen vor, wenn das C/N-Verhältnis zwischen 20 und maximal 35 liegt. Das C/N-Verhältnis nimmt üblicherweise im Verlauf der Rotte ab, da Kohlenstoff mineralisiert wird, während der Stickstoff (so es nicht zu den im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Verlusten kommt) gleich bleibt. Ist das C/N-Verhältnis zu weit, kommt es zu einer Verlangsamung des

Rotteverlaufs und bei einem zu engen Verhältnis zu Stickstoffverlusten (NH_3 und NH_4) (BINNER et al., 2004).

3.3.4 Atmungsaktivität AT_4

Die Atmungsaktivität (üblicherweise bestimmt über eine Versuchsdauer von vier Tagen), AT_4, gibt den Sauerstoffverbrauch von Mikroorganismen beim Abbau des Rotteguts an und ist ein Parameter, um den Abbaugrad bzw. die biologische Stabilität des Materials zu beschreiben. Die Ergebnisse werden in mg O_2/g TM angegeben. Am Beginn der Rotte sind die AT_4-Werte aufgrund des hohen Anteils an leicht mikrobiell verfügbaren organischen Verbindungen deutlich höher als am Ende der Rotte. Die AT_4-Werte können im Ausgangsmaterial (je nach Rottematerial), bis zu 80 mg O_2/g TM erreichen (AMLINGER und PEYR, 2003). Am Ende der Rotte sind niedrige Werte ein Zeichen dafür, dass fast keine mikrobiell verfügbare organische Substanz mehr vorliegt und das organische Material weitgehend stabilisiert wurde. Der Mittelwert der Atmungsaktivität von 86 am ABF-BOKU untersuchten Bioabfallkomposten beträgt 4,8 mg O_2/g TM (BINNER, 2020).

3.3.5 Huminstoffe

Huminstoffe sind ein wichtiger Qualitätsparameter für Komposte. Sie sind hochmolekulare, heterogen zusammengesetzte Verbindungen und tragen zum Wasser- und Nährstoffhaltevermögen und zur Aggregatstabilität im Boden bei (LECHNER et al., 2008). Zu Beginn werden durch die Zersetzung der organischen Ausgangssubstanzen intermediäre Stoffwechselprodukte unter Energiefreisetzung gebildet. In der Folge können, sobald der mikrobielle Abbauprozess fortgeschritten ist und reaktionsfähige Spaltprodukte vorliegen, unter Energiebindung sekundäre stabile Huminstoffe entstehen. Diese sind neue sehr stabile organische Verbindungen. Darauffolgend bilden sich mit Tonmineralien organomineralische Komplexe und es entsteht ein nur mehr schwer bzw. langfristig mineralisierbarer Humus. Höhere Temperaturen während der Hauptrotte, ab ca. 50 °C, fördern den Huminstoffaufbau. Eine zu schnelle Mineralisierung jedoch wirkt sich negativ darauf aus (LECHNER et al., 2005; BINNER, 2012; zit. bei LEHNER, 2013).

3.3.6 Kompostqualität

Die Qualitätsanforderungen für Komposte werden in Österreich in der Kompostverordnung geregelt. Es gibt drei Qualitätsklassen. Diese sind A+, A und B. Sie unterscheiden sich bezüglich Schadstoffgehalten und Einsatzgebieten. In der österreichischen Landwirtschaft dürfen nur die Qualitätsklassen A+ und A verwendet werden (BMLFUW, 2001).

Grundsätzlich bestimmen die im Kompost vorkommende organische Substanz und die Huminstoffe dessen Qualität. Kompost wird als Produkt kategorisiert, solange er nach den Vorgaben der Kompostverordnung hergestellt wird. Ist dies nicht der Fall (werden beispielsweise nicht ausdrücklich zugelassene Ausgangsmaterialien wie Fäkalien verwendet), gilt der Kompost zwar weiter als Abfall, kann jedoch (als Abfall) verwertet werden (BMFLUW, 2001). Die Ausbringung dieser Abfallkomposte wird durch die Bodenschutzverordnungen der Länder geregelt (BINNER et al., 2004).

3.4 Kompostierung von Fäkalien

Nur Fäkalien zu kompostieren würde sehr lange dauern und nicht gut funktionieren, da in den Fäkalien selbst zwar viel Stickstoff, aber relativ wenig Kohlenstoff enthalten ist. Dadurch ist das C/N-Verhältnis sehr eng (siehe Kapitel 3.4.1). Deshalb müssen zu den Fäkalien Zuschlagsstoffe gegeben werden, die einerseits die Feuchtigkeit binden (vor allem wenn die Fäzes gemeinsam mit dem Urin gesammelt und kompostiert werden) und andererseits verfügbaren Kohlenstoff enthalten, um das C/N-Verhältnis zu erweitern. Weiters müssen die Zuschlagstoffe strukturgebende Bestandteile enthalten. Mögliche Zuschlagsstoffe sind einerseits Toilettenpapier als auch eine Einstreu wie zum Beispiel Rindenmulch, Holzspäne, Stroh oder Heu. Zur Förderung des Rotteprozesses bzw. einer besseren Hygiensierung (Intensivierung des Abbauprozesses

bzw. Erhöhung der Rottetemperaturen) kann biogenes Material unter die Fäkalien gemischt werden (BERGER und LORENZ-LADENER, 2008). Es gibt auch eigens für Komposttoiletten hergestellte Einstreu-Mischungen. Eine davon wird zum Beispiel von der Firma Sonnenerde hergestellt und ist eine Mischung aus Biofasern, Steinmehl, Pflanzenkohle und Kompost. Eine weitere Möglichkeit zur Unterstützung des Rotteprozesses von Fäkalien ist die Zugabe von Hilfsmitteln, wie zum Beispiel einem Mykorrhiza Pilz, der beim Abbau von pathogenen Keimen helfen soll.

Nachfolgend sind die Ausgangsstoffe sowie einige mögliche Zuschlagsstoffe, wie die spezielle Einstreu der Firma Sonnenerde und der Mykorrhiza Pilz näher beschrieben. Am Ende des Kapitels gibt es einen Überblick über die in Fäkalien enthaltenen Pathogene sowie die rechtlichen Grundlagen der Kompostierung von Fäkalien in Österreich.

3.4.1 Ausgangsstoffe

Ein erwachsener Mensch scheidet pro Tag im Durchschnitt 1,4 l Urin und 130 g Fäzes aus (BERGER und LORENZ-LADENER, 2008). Letztere bestehen nicht nur aus Fäzes, sondern enthalten auch unverdaute Essensreste, Ballaststoffe, abgestorbene Darmflora aus dem Dickdarm und auch die Mehrheit der ausgeschiedenen Schwermetalle. Fäzes enthalten sehr viele Keime, unter anderem *Escherichia coli* (*E. coli*), weshalb diese auch als Indikator für eine fäkale Verunreinigung herangezogen werden. Ebenso können im Stuhl auch Viren oder Parasiten vorkommen. Fäzes haben etwa ein C/N-Verhältnis von 10 (ca. 4,9 % TM Stickstoff und 50 % TM Kohlenstoff) (NAUDASCHER, 2001). Urin ist im Gegensatz dazu bei gesunden Menschen frei von Keimen und enthält ca. 90 % des ausgeschiedenen Stickstoffs. Deshalb ist dessen C/N-Verhältnis sehr eng. Auch Hormone und Medikamentenrückstände werden hauptsächlich über den Urin ausgeschieden. Der pH-Wert des Urins ist von der Ernährung abhängig und liegt bei 5 - 8 (BERGER und LORENZ-LADENER, 2008).

3.4.2 Zuschlagsstoffe

Wie bereits in Kapitel 3.4 beschrieben ist eine Aufgabe der Zuschlagsstoffe das C/N-Verhältnis des Rotteguts zu erweitern. Man benötigt sie jedoch auch als Strukturmaterial um das Porenvolumen zu erhöhen, welches für eine ausreichende Sauerstoffversorgung und die Regulierung des Wassergehalts wichtig ist. Man kann diese Zuschlagstoffe nach jedem Toilettengang hinzumischen oder sie können auch nachträglich beigemengt werden (BERGER und LORENZ-LADENER, 2008). Nachfolgend sind ein paar verschiedene Zuschlagsstoffe beschrieben:

- **Toilettenpapier**: Da Toilettenpapier zum Großteil aus Zellstoff besteht, ist dessen C/N-Verhältnis sehr weit. Es ist daher für die Versorgung mit Kohlenstoff sehr wichtig. Ebenso bindet es Flüssigkeit. Der pH-Wert kann, je nach Herstellungsprozess, stark variieren (LEHNER, 2013).
- **Rindenmulch**: Rindenmulch ist aufgrund seiner hohen Porosität extrem saugfähig und strukturbildend und daher ideal als Zuschlagsstoff. Es enthält jedoch auch einen hohen Anteil an Gerbsäuren, welche von den Mikroorganismen nur schwer umgesetzt werden können und daher die Kompostierung negativ beeinflussen (WARNECKE, 2008).
- **Holzspäne**: Holzspäne ist, je nach Herstellungsart (z. B. aufgefasert), so wie Rindenmulch, sehr saugfähig und, je nach Größe der Späne, sehr strukturbildend. Es ist auf eine ausreichende Spangröße zu achten. Ebenso verrotten sie schneller als Rindenmulch und sind daher als Zuschlagsstoff besser geeignet (LEHNER, 2013).
- **Stroh**: Stroh verhält sich ähnlich wie Holzspäne. Es ist sehr saugfähig (trocknet aber auch rasch aus) und verrottet gut (SONNENBERG, 2002). Die Förderung der Struktur wirkt allerdings deutlich kürzer als jene von Holzspänen bzw. Rinden.
- **Heu**: Heu ist, genauso wie Stroh, sehr saugfähig und verrottet gut. Seine strukturbildende Wirkung ist jedoch niedriger (LEHNER, 2013).

- **Biogenes Material**: Unter dem Begriff „biogenes Material“ werden sowohl Essensreste bzw. Reststoffe aus der Essenszubereitung als auch Gartenabfälle zusammengefasst. Diese enthalten einen hohen Anteil an leicht verfügbaren organischen Kohlenstoffen, welche von den Mikroorganismen sehr gut verwertet werden können. Daher ist biogenes Material enorm wichtig für die Kompostierung.

Die nachfolgende Tabelle (Tabelle 1) gibt einen Überblick über das C/N-Verhältnis sowie den pH-Wert der Ausgangsstoffe Urin, Fäzes und Toilettenpapier sowie einiger ausgewählter Zuschlagsstoffe. Ebenso sind deren Auswirkungen auf den Kompostierungsprozess beschrieben. Ein „+“ steht für eine positive Auswirkung, ein „-“ für eine negative und ein „±“ für eine neutrale.

Tabelle 1: Eigenschaften kompostierbarer Materialien nach BERGER und LORENZ-LADENER (2008) und LEHNER (2013)

Material	C/N-Verhältnis	pH-Wert	Absorptions-vermögen	Geruchs-bindung	Struktur-bildung	Rotte-förderung
Ausgangsstoffe						
Fäzes	10	6 - 7	-	-	-	-
Urin	0,8	5 - 8	-	-	-	+
Toilettenpapier	1000	5 - 9	+	-	±	+
Zuschlagsstoffe						
Rindenmulch	100 - 130	4 - 5	+	+	+	-
Feine Holzspäne	100 - 500	4,5 - 6	+	+	+	+
Stroh	50 - 150	5 - 6	±	+	±	+
Heu	30 - 55	7	±	+	±	+
Biogenes Material						
Essensreste	k.A.	k.A.	-	-	-	+
Küchenabfälle	20 - 25	k.A.	-	-	-	+
Rasenschnitt	15 - 20	k.A.	-	-	-	+
Laub	40 - 70	k.A.	+	±	+	±
Baum-/Strauchschnitt	70 - 150	k.A.	±	±	+	+
Shreddermaterial	100 - 230	k.A.	±	±	+	+

- = ungünstig + = günstig ± = neutral k.A. = keine Angaben

3.4.2.1 Sonnenerde Bio Toilettenstreu

Das Bio Toilettenstreu von Sonnenerde (Abbildung 11) ist eine Mischung aus 40 % „Bio Holzfaser“, 30 % „Bio Pflanzenkohle“, 15 % Steinmehl und 15 % „Bio Kompost“. Laut Hersteller werden den Fäkalien damit alle Stoffe zugeführt, um daraus einen hochwertigen „Terra-Preta-Kompost“ zu erzeugen. Der Hersteller gibt an, dass unangenehme Gerüche sofort gebunden und daher nicht freigesetzt werden. Überschüssige Feuchtigkeit wird aufgesaugt und der Rotteprozess durch die zugeführte Mikrobiologie gestartet. Durch das Gesteinsmehl sind auch noch Spurenelemente enthalten.

Abbildung 11: Sonnenerde Bio Toilettenstreu

Empfohlen wird vom Hersteller, je nach Feuchtigkeit der Ausscheidungen, ein bis zwei Handvoll der Einstreu auf die Fäkalien zu streuen. Wenn keine Trocken-Trenntoilette benutzt wird, muss die Streumenge entsprechend erhöht werden, damit die gesamte

Flüssigkeit aufgesaugt werden kann. Nach einer Nachreife (außerhalb des Toilettenraumes) von wenigen Monaten soll so ein „wunderbar riechender schwarzer Kompost“ entstehen, der auf Rasenflächen oder im Zierpflanzenbereich, sowie bei Bäumen und Sträuchern verwendet werden kann. Die Hygienisierung ist jedoch nicht sichergestellt und daher empfiehlt der Hersteller den Kompost nicht im Gemüsebereich zu verwenden.

3.4.2.2 Pilze

Krankheitskeime können nicht nur durch das Erreichen hoher Temperaturen abgetötet werden, sondern auch durch antibiotisch wirkende Stoffwechselprodukte von Bodenpilzen und Bakterien. Diese entwickeln sich normalerweise in der Nachrottephase. Zudem kann die Nahrungskonkurrenz im Kompost zu einer bedeutenden Verringerung der beteiligten Krankheitserreger führen (BERGER und LORENZ-LADENER, 2008).

Im Laufe dieser Arbeit wird untersucht, wie sich eine Zugabe von Pilzsporen auf die Hygienisierung auswirkt. Verwendet wird dazu ein Mykhorriza Granulat der Firma *TYROLER GLÜCKSPILZE*.

Als Mykorrhiza generell wird eine Form der Symbiose bestimmter Pilze mit den Wurzeln höherer Pflanzen bezeichnet. Hier werden Schadstoffe im Boden vom Pilz abgebaut (organische Schadsoffe) und eingebunden (anorganische Schadstoffe), sodass sie nicht von der Pflanze aufgenommen werden.

Das verwendete Granulat beinhaltet 13 sorgfältig ausgewählte Endo- und Ektomykorrhizen sowie Trichoderma-Pilzspezies. Um die Keimung der Mykorrhiza-Sporen und deren Effektivität zu verbessern, ist in dem Granulat ein qualitativ hochwertiges „Biostimulatoren-Paket“ beigemengt, das Kelpnahrung, Humus, Vitamine und Aminosäuren beinhaltet.

1 ml bzw. 1,21 g des Granulats enthält nach Herstellerangaben durchschnittlich 325.030 Pilzsporen und zwar die Ektomykorrhiza-Pilze *Pisolithus tinctorius* (125.000 Sporen), *Rhizopogon villosulus* (3.125 Sporen), *Rhizopogon luteolus* (3.125 Sporen), *Rhizopogon amylopogon* (3.125 Sporen) und *Rhizopogon fulvigleba* (3.125 Sporen), die Endomykorrhiza Pilze *Glomus intraradices* (10 Sporen), *Glomus mosseae* (10 Sporen) und *Glomus aggregatum* (10 Sporen) und die Trichoderma-Pilze *Trichoderma koningii* (93.750 Sporen) und *Trichoderma harzianum* (93.750 Sporen).

3.4.3 Rechtliche Grundlagen

In Österreich gibt es keine gesetzliche Regelung, die speziell die Anwendung von aus Fäkalien hergestellten Produkten, wie Komposten, betrifft (STARKL et al., 2005). Es handelt sich also um eine rechtliche Querschnittsmaterie. In der Kompostverordnung (BMFLUW, 2001) finden sich detaillierte Regelungen für einen technischen Kompostierungsprozess sowie eine Positivliste für Ausgangsmaterialien zur Kompostierung. In der Positivliste finden sich zwar tierische Ausscheidungen, menschliche Fäkalien sind hingegen nicht angeführt. Aus rechtlicher Sicht können hier deswegen die Regelungen der Kompostverordnung nicht angewandt werden. Zur Beurteilung des seuchenhygienischen Risikos, das vom Fäkalkompost ausgeht, gibt es somit keine klaren Regelungen. Es werden daher die Parameter für eine seuchenhygienische Endproduktkontrolle zur Kompostbeurteilung als Ansatzpunkte zur Auswahl geeigneter Parameter zur Fäkalkompostbeurteilung genommen. Diese sind *Pathogene E. coli, Salmonella sp., Campylobacter* und *Listeria sp.*. Bezüglich dieser gibt es in der Kompostverordnung (2001) folgende Anforderungen und Einsatzgebiete:

- Für den Einsatz als Sackware und für die Erhaltung einer vegetationsfähigen Oberbodenschicht bei Sportstätten und bei Freizeitanlagen einschließlich Kinderspielplätzen dürfen in 50 g Probe keine der vier Keime nachgewiesen werden.
- In der Landwirtschaft gibt es keine Anforderungen für *Campylobacter* und *Listerien sp*.. Werden *Pathogene E. coli* nachgewiesen, müssen diese qualitativ ausgewiesen und

bewertet werden. Danach werden entsprechende Anwendungsempfehlungen gegeben. Salmonellen dürfen in 50 g Probe nicht vorhanden sein.

- Für die Herstellung und Erhaltung einer vegetationsfähigen Oberbodenschicht im Landschaftsbau allgemein und als Rekultivierungschicht auf Deponien gibt es keine Anforderungen für *Pathogene E. coli*, *Campylobacter* und *Listerien sp*.. Es dürfen jedoch in 50 g Probe keine Salmonellen nachgewiesen werden.
- Für den Einsatz als Biofiltermaterial gibt es keine Anforderungen.

Ähnliche, etwas detailliertere Angaben sind auch in der ÖNORM S 2204 (2016) zu finden und in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Mindestanforderungen sowie Behandlungs- und Anwendungsvoraussetzungen von Komposten in Abhängigkeit vom mikrobiologischen Untersuchungsergebnis nach ÖNORM S 2204 (2016)

Einsatzgebiet	***Salmonella sp.***	***E. coli (EHEC Serovar O157:H7)***	***Campylobacter sp.***	***Listeria monocytogenes***
Sackware	0	0	0	0
Pflege - Freizeitanlage, Kinderspielplatz, Sportstätten	0	0	0	0
Hobbygarten	0	0	X	X
Flächen mit Abschwemmungsgefahr in Vorfluter, Tränken, Badewasser, Teiche, Beschneiungs- und Irrigationsteiche	0	0	X	X
Grünland (Weideland, Futtergewinnung)	0	Nachrotte und Nachuntersuchung oder sechs Wochen Wartefrist vor der Nutzung[a]	X	X
Ackerbau - Feldfutterbau	0	Nachrotte und Nachuntersuchung oder sechs Wochen Wartefrist vor der Nutzung[a]	X	X
Ackerbau - bodennahes Feldgemüse und Beerenobst, Gartenbau (ausgenommen Zierpflanzen)	0	nur Zur Vofrucht[a]	X	X
Ackerbau - sonstige Feldfrüchte	0	Einackern[a]	X	X
Wien-, Obst- und Hopfenbau	0	Nachrotte und Nachuntersuchung oder sechs Wochen Wartefrist vor der Nutzung[a]	X	X
Gartenbau - Zierpflanzenproduktion	0	Keine Anwendungs-beschränkungen[a]	X	X
Christbaumkulturen	0	Keine Anwendungs-beschränkungen[a]	X	X
Landschaftsbau allgemein	0	X	X	X
Rekultivierung von Deponien	0	X	X	X
Biofiltermaterial	X	X	X	X

0 = nicht nachweisbar

X = keine Untersuchung erforderlich

[a] = Im Falle eines positiven Nachweises von *E. coli* sind die angeführten Maßnahmen zu treffen.

3.4.4 Untersuchte Indikatororganismen

Die mikrobiologische Untersuchung aller seuchenhygienisch relevanten Mikroorganismen des Fäkalkomposts war aus Kosten- und Zeitgründen bei dieser Arbeit nicht möglich. Daher wurden einige, sogenannte Indikatororganismen, ausgewählt, die sich aus vorhergegangenen Arbeiten als repräsentativ herausgestellt haben, nämlich Coliforme (normal und thermotolerant) und Enterokokken. Indikatororganismen müssen typischer Bestandteil der menschlichen Fäzes sein, mit hoher Wahrscheinlichkeit mit pathogenen Mikroorganismen auftreten, kultivierbar, leicht und in großer Anzahl nachweisbar sein und im Abwasser bzw. Fäkalkompost überlebensfähig sein (ZUNABOVIC-PICHLER et al., 2015).

3.4.4.1 Coliforme

Zur Gruppe der Coliformen zählen *Escherichia, Citrobacter, Enterobacter* und *Klebsiella*. Anhand der Bebrütungstemperatur unterscheidet man Gesamtcoliforme und thermotolerante Coliforme, auch Fäkalcoliforme genannt. Erstere werden typischerweise bei 37 °C und letztere bei 44 °C bebrütet. Für die hygienische Beurteilung der Wasserqualität stellt die Coliformenzahl einen wichtigen Fäkalindikator dar (WEBER, 1997).

3.4.4.2 Escherichia Coli

Escheria Coli (E. coli) ist der häufigste und somit wichtigste Vertreter der Coliformen. Er ist eine stäbchenförmige, gramnegative Bakterienart der Gattung Escherichia, die in der menschlichen und tierischen Darmflora vorkommt. In Boden und Wasser nachgewiesen gilt *E. coli* daher als Indikator für fäkale Verunreinigung und ist als solcher auch in der Trinkwasserverordnung angeführt. Im menschlichen Stuhl finden sich 10^7-10^9 *E. Coli* pro Gramm (SCHNEIDER in FUCHS, 2014).

3.4.4.3 Enterokokken

Im menschlichen Kot befinden sich 10^5-10^7 Enterokokken (SCHNEIDER in FUCHS 2014). Grundsätzlich als probiotisch eingestuft werden diese auch zur Fermentation in Lebensmitteln verwendet und sind nur fakultativ pathogen. Sie können bei immunschwachen Personen Infektionen auslösen.

4. Material und Methoden

4.1 Sammlung der Fäkalien

Abbildung 12: Vortrag über Trockentoiletten der Firma Wohnwagon an der BOKU

Um Material (Fäkalien) für die Versuche zu sammeln, wurde von der Firma *wohnwagon* am 16. Mai 2017 eine Trockentrenntoilette der Firma Separett, Modell Villa 9010, auf der BOKU am Standort Muthgasse 18 in einer Toilette im Erdgeschoss aufgestellt. Um die Studenten sowie Mitarbeiter der BOKU zu animieren die Toilette zu verwenden, gab es im Rahmen der Aufstellung einen Vortrag über Trockentoiletten (Abbildung 12). Weiters wurden Infoblätter (Abbildung 13) mit der Bitte um Benützung der Toilette auf der BOKU verteilt.

Die Fäkalien wurden ohne Einstreu und Toilettenpapier gesammelt. Geplant war die Einstreu erst später hinzuzufügen um die vorgesehenen Mischungsverhältnissen exakter einstellen zu können. Hierzu wurde eine Bedienungsanleitung in der Toilette positioniert mit der Bitte das Toilettenpapier im Restmüll zu entsorgen. Da dadurch die geruchsstoffbindende Einstreu fehlte, wurde die Toilette täglich entleert (Abbildung 14). Die Fäkalien wurden anschließend im Chemielabor des SIG vakuumiert (Abbildungen 15 und 16) und danach bei - 18 °C in deren Gefrierraum tiefgefroren. Die Vakuumierung diente in erster Linie, um sicherzustellen, dass sich keine Keime im Gefrierraum ausbreiten, da dort auch andere, zum Teil sehr „heikle“ Wasserproben, gelagert werden.

Abbildung 13: Beschilderung der Trockentoilette an der BOKU

Abbildung 14: Entleerung der Trockentoilette

Zusätzlich wurden die vakuumierten Proben vor dem Tiefkühlen noch in wiederverschließbare Behälter gegeben. Aus Sicherheitsgründen wurde bei dem ganzen Vorgang ein Labormantel sowie Handschuhe und eine Mundschutzmaske getragen.

Die Toilette wurde leider nicht ausreichend frequentiert wodurch die Materialbeschaffung sehr lange dauerte. Des Weiteren gab es eine Beschwerde (einer Reinigungskraft) betreffend Geruchsbelästigung der Toilette, weshalb diese entfernt werden musste. Bis zu diesem Zeitpunkt waren leider nur ca. 12 l Material gesammelt worden.

Abbildung 15: Vakuumierte Probe

Abbildung 16: Vakuumierte Probe in verschließbarem Behälter

Abbildung 17: Trockentoilette beim Wohnprojekt Hasendorf

Als alternative Materialquelle sprangen die Mitarbeiter des Wohnprojekts Hasendorf sowie die Firma *wohnwagon* selbst ein. Im Rahmen eines Wohnprojekts wurde im niederösterreichischen Hasendorf eine kleine Wohnsiedlung errichtet. Auf der Baustelle kam eine Trockentrenntoilette (Abbildung 17) zum Einsatz. Als Einstreu wurde Sägespäne verwendet. Daher wurde die Toilette mit der Einstreu, die bei dem Versuch verwendet wurde, sowie einer Anleitung für deren Verwendung ausgestattet. Die Fäkalien mussten diesmal gemeinsam mit der Einstreu sowie mit dem Toilettenpapier in einem 70 l Behälter gesammelt werden. Eine tägliche Entleerung der Toilette war nicht möglich. Die Gefahr einer Geruchsbelästigung wäre zu groß gewesen, wenn die Toilette ohne Einstreu betrieben worden wäre. Zusätzlich wurden Toilettenabfälle aus dem Wohnwagon in Gutenstein gesammelt, der an Touristen vermietet wird. Die Toilettenabfälle daraus sind ebenso eine Mischung aus Fäkalien, Einstreu sowie Toilettenpapier.

4.2 Rotteversuche

4.2.1 Beschreibung der Rotteversuchsanlage

Um die Rotteversuche unter möglichst realistischen Bedingungen durchführen zu können, wurde jede Versuchsserie sechs Wochen lang in der ABF-Rotteversuchsanlage durchgeführt. Hier sind als Rottereaktoren 12 umgebaute Exsikkatoren aus Glas in einer Klimakammer (in 3 Etagen) aufgestellt. Abbildung 18 zeigt die Klimakammer von innen mit leeren Rottereaktoren und Abbildung 19 mit gefüllten.

Abbildung 18: Klimakammer mit leeren Reaktoren

Abbildung 19: Klimakammer mit gefüllten Reaktoren

Jeder Reaktor fasst ca. 7 l Rottegut. Die Belüftung erfolgt über einen Kompressor und ein Druckminderungsventil. Getrocknete Außenluft wird angesaugt und auf 1 bar atmosphärischen Druck reduziert. Die Luftmenge, welche über einen Schwebekörper-Durchflussregler, für jeden Reaktor exakt eingestellt werden kann, gelangt durch eine Öffnung an der Unterseite in den Reaktor. Die Abluft des Reaktors wird über einen Auslass im abnehmbaren Deckel abgeleitet. Um den Reaktor gasdicht zu verschließen, werden die Deckel mit Klemmen gesichert. Alle Zu- und Abluftleitungen bestehen aus Kunststoff.

In jedem Reaktor (Abbildungen 20 und 21) befindet sich im unteren Bereich ein Kunststoffgitter mit einer Maschenweite von 10 mm, auf dem ein Kunststoffnetz liegt. Darauf wird das Rottegut (Substrat) eingebaut. Das Kunststoffgitter dient zur Schaffung eines freien Luftraumes unter dem Rottegut, das Kunststoffnetz verhinderte das „Durchfallen“ des Rottegutes in den Unterraum. In den Seitenwänden der Reaktoren sind verschließbare Öffnungen angebracht, durch die die Temperaturmessungen erfolgen.

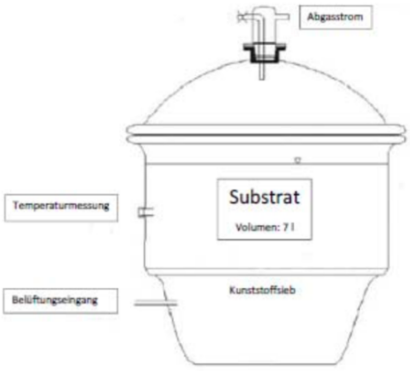

Abbildung 20: Rottereaktor (RAUSCHER, 2017)

Abbildung 21: gefüllter Reaktor in der Klimakammer

Die Abluft wird von jedem Reaktor separat in eine Kondensatfalle geführt, um diese zu „entfeuchten“. Die gesammelte Kondensatmenge kann dann gemessen werden.

Die entfeuchtete Abluft wird über einen Messstellenumschalter zu einem auf Infrarotbasis arbeitenden CO_2-Messgerät geleitet und mittels Gleichspannungsschreibers aufgezeichnet. Zwischen Kondensatfalle und Messgerät ist für jeden Reaktor ein Puffersack (Zwischenspeicher) angeordnet. Das ist notwendig, damit durch die CO_2-Messung kein Unterdruck im Reaktor entsteht.

Das Messintervall für die Messung der CO_2-Konzentrationen kann mittels Zeitschaltuhr eingestellt werden. Die Messung beginnt immer mit Reaktor 1 und dann werden hintereinander die jeweiligen Konzentrationen aus den einzelnen Reaktoren gemessen. Eine Messung dauert ca. zwei Minuten. Danach gelangt die Abluft über ein Rückschlagventil in die Außenluft. In Abbildung 22 ist der schematische Aufbau der Rotteversuchsanlage dargestellt.

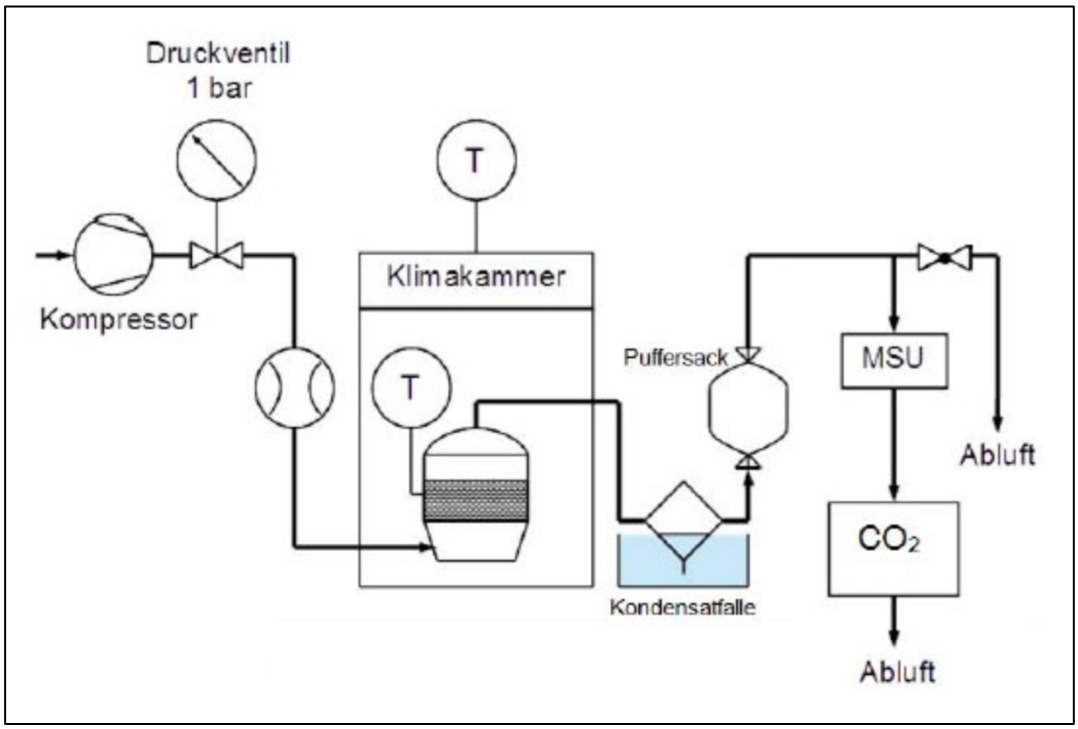

Abbildung 22: Schematischer Aufbau der ABF-Rotteversuchsanlage (Quelle: RAUSCHER, 2017

Die Rottetemperaturen werden mittels Einstichsonde eines mobilen Gerätes gemessen. Zur Messung der in den drei Etagen leicht unterschiedlichen Klimakammertemperaturen (oben um 1 - 2 °C höher als unten) ist in jeder Etage eine Flaschen mit Wasser (1 l Füllmenge) platziert. Anhand der Temperaturmessung des Wassers dieser Flaschen kann die „Umgebungstemperatur“ in der jeweiligen Etage festgestellt wirden.

Die Aufstellung der Reaktoren in einer Klimakammer hat den Zweck Wärmeverluste aus den Reaktoren möglichst gering zu halten. Dadurch können die Temperaturverhältnisse in einer Kompostmiete einer großtechnischen Kompostierungsanlage simuliert werden. Die Temperatur der Klimakammer wird an die Temperatur im Rottegut angepasst. Man will dieses jedoch auch nicht aufheizen, weshalb die Klimakammertemperatur immer ca. 0,5 bis 1 °C unter dem kühlsten Reaktor der obersten Etage eingestellt wird.

4.2.2 Versuchsserien

4.2.2.1 Versuchsserie 1

Bei der ersten Serie wurden drei verschiedene Mischungsverhältnisse von Fäkalien und Einstreu getestet, um den Einfluss der Einstreu auf die Kompostierung feststellen zu können.

Für deren Herstellung wurden die Toilettenabfälle aus Hasendorf und Gutenstein miteinander vermengt, um eine möglichst homogene Mischung zu erzeugen. Die homogene Mischung war zugleich Variante 1. Für Variante 2 wurden die am SIG tiefgefrorenen Proben aufgetaut und eine Teilmenge der homogenen Mischung (Variante 1) mit den aufgetauten (puren) Fäkalien vermischt, um eine Mischung mit höherem Fäkalanteil zu bekommen. Für Variante 3 wurde die homogene Mischung von Variante 1 mit zusätzlicher Einstreu vermengt, um eine Mischung mit viel Einstreu zu erhalten. Bei allen drei Varianten wurde mittels Faustprobe der Wassergehalt eingestellt. Variante 3 war sehr trocken, weswegen Wasser beigemengt werden musste, bis ein Wassergehalt von ca. 50 % erreicht wurde. Von jeder Variante wurden Proben für die Bestimmung des Wassergehaltes und der klassischen Rotteparameter entnommen. Die wesentlichen Unterschiede der drei Varianten sind Tabelle 3 nochmals beschrieben und in den Abbildungen 23 bis 25 sind die Varianten dargestellt.

Tabelle 3: Mischungsverhältnisse Versuchsserie 1

Variante	**Beschreibung**	**Verhältnis Fäkalien (inkl. Toilettenpapier) : Einstreu**
Variante 1	übliches Mischungsverhältnis, wie vom Hersteller empfohlen	50 : 50
Variante 2	Mischung mit geringerem Einstreuanteil	70 : 30
Variante 3	Mischung mit höherem Einstreuanteil	20 : 80

Abbildung 23: Variante 1 (normales Mischungsverhältnis)

Abbildung 24: Variante 2 (wenig Einstreu)

Abbildung 25: Variante 3 (viel Einstreu)

Für Versuchsserie 1 wurden aufgrund von Materialmangel nur 9 der 12 Reaktoren verwendet. Pro Mischungsverhältnis wurde jeweils 1 Reaktor pro Ebene verwendet. Tabelle 4 gibt eine Übersicht über die Aufteilung der Reaktoren in der Klimakammer.

Tabelle 4: Aufteilung der Reaktoren in der Klimakammer bei Versuchsserie 1

Ebene oben „höherer“ Temperaturbereich	Reaktor 1 Variante 1	Reaktor 2 Variante 2	Reaktor 4 Variante 3
Ebene Mitte „mittlerer“ Temperaturbereich	Reaktor 5 Variante 1	Reaktor 6 Variante 2	Reaktor 8 Variante 3
Ebene unten „niedriger“ Temperaturbereich	Reaktor 9 Variante 1	Rektor 10 Variante 2	Reaktor 12 Variante 3

Versuchsserie 1 dauerte 43 Tage. In den ersten Wochen der Kompostierung wurde ein Zielwert von 15 Vol.% CO_2 in der Abluft angestrebt. War der Wert zu hoch, wurde die Zuluft gesteigert und war er zu gering, gedrosselt. Im weiteren Rotteverlauf wurde aufgrund der abnehmenden mikrobiellen Aktivität der Sollwert auf ca. 10 Vol.% gesenkt.

Das Zeitintervall für die Messungen wurde bei beiden Versuchsserien auf drei Stunden eingestellt. Zwei- bis dreimal täglich wurden die Messwerte kontrolliert. Dabei wurden die CO_2-Konzentrationen und Rottetemperaturen der jeweiligen Reaktoren aufgezeichnet. Die Temperatur der Klimakammer wurde laufend an die der Reaktoren angepasst (sie wurde wie bereits in Kapitel 4.2.1 beschrieben ca. 0,5 bis 1 °C niedriger als die niedrigste Rottetemperatur der oberen Etage eingestellt). Wichen die gemessenen CO_2-Konzentrationen vom Zielwert ab, wurde die Belüftungsmenge entsprechend erhöht oder verringert.

Einmal wöchentlich, außer in Woche 5, wurde das Rottegut in den Reaktoren umgesetzt. Dabei wurden auch Proben für die Analysen entnommen.

Beim Umsetzen wurden die Reaktoren einzeln aus der Klimakammer geholt, geöffnet, verwogen, dann wurde das Rottegut in eine Wanne geworfen, durchgemischt und beprobt. Nach Beurteilung des Wassergehaltes mittels Faustprobe wurde bei Bedarf Wasser beigemengt. Danach wurde das Material wieder in den Reaktor eingebaut und dieser nach neuerlichem Verwiegen zurück in die Klimakammer gestellt. Um die Wärmeverluste durch Umsetzen während der offenen Mietenkompostierung zu simulieren, wurde die Klimakammertemperatur danach um ca. 10 - 20 °C gesenkt.

Falls Sickerwasser in den Reaktoren vorhanden war, wurde dessen Menge gemessen und so der Wassergehalt zu gering war wieder zurück zum Rottegut gegeben oder entsorgt, falls der Wassergehalt zu hoch war. Ebenso wurde bei jedem Umsetzen die Kondensatmenge bestimmt.

Das Umsetzen ist generell wichtig während der Kompostierung. Durch Umsetzen wird das Material aufgelockert. Dadurch wird das Luftporenvolmen erhöht und das Rottegut im weiteren Prozess besser mit Sauerstoff versorgt, wodurch wiederum die mikrobiologischen Prozesse angeregt werden. Ebenso wird beim Umsetzen das Material durchgemischt/homogenisiert, wodurch ausgetrocknete Stellen, bevorzugte Luftwegigkeiten oder anaerobe Zonen, beseitigt werden.

Um den Rotteprozess beurteilen zu können, wurden bei beiden Versuchsserien vor dem Start und, wie schon erwähnt, jedes Mal beim Umsetzen Proben entnommen. In Tabelle 5 sind die Tage der Probenahme und die entnommenen Proben bei Versuchsserie 1 aufgelistet.

Tabelle 5: Umsetzen und Probenahmen Versuchsserie 1

Tag	Anzahl der Proben und Verwendungszweck
Tag 0 - Start	3 Proben (1 pro Variante) des Ausgangsmaterials für Rotteparameter
Tag 7	9 Proben (1 pro Reaktor) für Rotteparameter
Tag 14	9 Proben (1 pro Reaktor) für Rotteparameter
Tag 21	9 Proben (1 pro Reaktor) für Rotteparameter
Tag 28	9 Proben (1 pro Reaktor) für Rotteparameter 1 Probe (aus Reaktor 12) für Testdurchgang Mikrobiologie
Tag 42	9 Proben (1 pro Reaktor) für Mikrobiologie
Tag 43 - Ende	9 Proben (1 pro Reaktor) für AT_4, Huminstoffe und Rotteparameter

4.2.2.2 Versuchsserie 2

In Versuchsserie 2 wurden nochmals drei Varianten getestet. Für die Herstellung dieser Imputmischungen wurden wieder die Toilettenabfälle aus Hasendorf und Gutenstein miteinander vermengt. Da die für die Hygienisierung erforderliche Mindesttemperatur von 55 °C in Serie 1 nicht erreicht werden konnte (siehe Kapitel 5.1), wurde für die zweite Versuchsserie biogenes Material (eine Mischung aus Bioabfall und Grünschnitt) vom Kompostwerk Lobau besorgt. Dieses wurde zerkleinert und bei Variante 4 zugemischt. Bei der Kompostierung von biogenem Abfall werden wegen des hohen Anteils an leicht verfügbaren Kohlenstoffverbindungen, Rottetemperaturen von über 60 °C erreicht. Daher wurde angenommen, dass die Temperatur des Kompostguts generell steigt, wenn man Bioabfall untermischt. Variante 5 war eine Wiederholung des üblichen Mischungsverhältnisses aus Serie 1, um eine Vergleichsvariante in dieser Versuchsserie zu haben. Variante 6 war das übliche Mischungsverhältnis aus Serie 1 plus einer Mykorrhiza Pilzmischung (1,5 g pro l Material). Die Varianten 4 - 6 sind in Tabelle 6 nochmals beschrieben und in den Abbildungen 26 bis 28 abgebildet.

Tabelle 6: Mischungsverhältnisse Versuchsserie 2

Variante	Beschreibung	Verhältnis
Variante 4	eine Mischung mit biogenem Material	50 % Toilettenabfälle (Fäkalien inkl. Toilettenpapier und Einstreu im Verhältnis 50 : 50) und 50 % biogenes Material
Variante 5	übliches Mischungsverhältnis, wie vom Hersteller empfohlen (Wiederholung aus Versuchsserie 1)	50 % Fäkalien inkl. Toilettenpapier und 50 % Einstreu
Variante 6	Übliches Mischungsverhältnis, wie vom Hersteller empfohlen plus Mykorrhiza Pilzmischung	50 % Fäkalien inkl. Toilettenpapier und 50 % Einstreu plus Mykorrhiza Pilzmischung (1,5 g Granulat pro l Material)

Abbildung 26: Variante 4 (Zumischung von biogenem Material)

Abbildung 28: Variante 5 (Vergleichsvariante aus Serie 1)

Abbildung 27: Variante 6 (Pilzmischung)

Die Kompostierung erfolge analog zu Versuchsserie 1. Der einzige Unterschied war, dass der Versuch 44 Tage, also einen Tag länger als bei Versuchsserie 1, lief. Die Aufteilung der Varianten in der Klimakammer findet sich in Tabelle 7.

Tabelle 7: Aufteilung der Reaktoren in der Klimakammer bei Versuchsserie 2

Ebene oben „höherer“ Temperaturbereich	Reaktor 1 Variante 4	Reaktor 2 Variante 5	Reaktor 4 Variante 6
Ebene Mitte „mittlerer“ Temperaturbereich	Reaktor 5 Variante 4	Reaktor 6 Variante 5	Reaktor 8 Variante 6
Ebene unten „niedriger“ Temperaturbereich	Reaktor 9 Variante 4	Rektor 10 Variante 5	Reaktor 12 Variante 6

Die Temperaturen von Variante 4 waren wie erwartet höher als jene der anderen beiden Varianten (siehe Kapitel 5.1) und daher wurden die Temperaturen der Klimakammer an die höheren Temperaturen der Variante 4 angepasst,. Dadurch wurden die anderen Varianten „künstlich“ aufgeheizt, wodurch man den Einfluss höherer Temperaturen auf diese Varianten feststellen konnte. In Variante 6 wurde also der Einfluss der erhöhten Temperatur in Kombination mit dem Einfluss des Pilzes getestet.

Die Tage der Probenahme und die entnommenen Proben bei Versuchsserie 2 sind in Tabelle 8 aufgelistet.

Tabelle 8: Umsetzen und Probenahmen Versuchsserie 2

Tag	Anzahl der Proben und Verwendungszweck
Tag 0 - Start	3 Proben (1 pro Variante) des Ausgangsmaterials für Rotteparameter
Tag 7	9 Proben (1 pro Reaktor) für Rotteparameter
Tag 14	9 Proben (1 pro Reaktor) für Rotteparameter
Tag 21	9 Proben (1 pro Reaktor) für Rotteparameter
Tag 29	9 Proben (1 pro Reaktor) für Rotteparameter 1 Probe (aus Reaktor 10) für Testdurchgang Mikrobiologie
Tag 43	9 Proben (1 pro Reaktor) für Mikrobiologie
Tag 44 - Ende	9 Proben (1 pro Reaktor) für AT4, Huminstoffe und Rotteparameter

4.3 Aufbereiten der Proben

4.3.1 Wassergehaltsbestimmung und Trocknen der Proben

Abbildung 29: frische Laborproben

Zur Wassergehaltsbestimmung wurde eine Teilprobe der frischen Laborproben in eine davor gewogene Aluminiumtasse gegeben (Abbildung 29). Danach wurde die Tasse samt Probe noch einmal gewogen und anschließend 24 - 48 Stunden bei 105 °C in einem Trockenschrank getrocknet. Nach dem Trocknen wurde die Tasse samt Probe erneut gewogen. Durch die Gewichtsdifferenz vor und nach dem Wiegen wird der Wassergehalt ermittelt. Jene Proben von denen auch Huminstoffe analysiert werden sollten, wurden drei Wochen an der Luft getrocknet, da die Hitze im Trockenschrank zur Verfärbung der Proben führen kann und dadurch die photometrische Huminstoffanalyse stört. Auch diese Proben wurden vor und nach dem Trocknen gewogen. Zur Bestimmung des Wassergehaltes wurden Teilproben auch bei 105 °C getrocknet.

4.3.2 Probenzerkleinerung und Homogenisierung

Nach dem Trocknen wurden die ausgekühlten Proben zuerst mit einer Schneidmühle SM 2000 der Firma RETSCH vorzerkleinert. Hierzu wurde die Probe zuerst mit einem 10 mm Sieb, anschließend mit einem 4 mm Sieb und zuletzt mit einem 0,5 mm Sieb gemahlen. Am Schluss wurde die Probe noch mit einer Ultrazentrifugalmühle ZM 1000 der Firma RETSCH mit einem < 0,5 mm Sieb vermahlen. Die fertig aufbereiteten Analysenproben wurden gewogen und in eine beschriftete Kunststoffdosen gefüllt. Die Abbildungen 30 bis 33 zeigen die einzelnen Schritte beim Mahlen der Probe.

Abbildung 30: Probe nach Mahldurchgang mit 10 mm Sieb

Abbildung 31: Probe nach Mahldurchgang mit 4 mm Sieb

Abbildung 32: Probe nach Mahldurchgang mit 0,5 mm Sieb

Abbildung 33: Probe nach Mahldurchgang mit der Zentrifugalmühle

Für die Huminstoffanalyse wurden die luftgetrockneten Proben mit einer Scheibenschwingmühle RS 1 der Firma RETSCH vermahlen. Beim Mahlen mit einer Scheibenschwingmühle entsteht keine Hitze. Anschließend wurden die Proben auf < 0,63 mm abgesiebt. Jetzt war auch diese Probe fertig für die Analysen. Die Abbildungen 34 bis 36 zeigen die einzelnen Schritte beim Mahlen der Probe für die Huminstoffanalyse.

Abbildung 34: Vorzerkleinerung der Probe

Abbildung 35: Probe vor dem Mahldurchgang mit der Scheibenschwingmühle

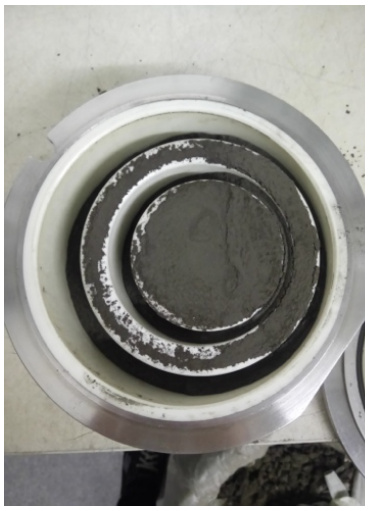

Abbildung 36: Probe nach dem Mahldurchgang mit der Scheibenschwingmühle

Eine Übersicht darüber, welche Probenart für welchen Zweck verwendet wurde ist in Tabelle 9 dargestellt:

Tabelle 9: Probenart und Verwendungszweck

Probeart	Verwendungszweck
Frische Laborprobe	Mikrobiologische Untersuchungen, Wassergehalt, AT_4
Bei 105 °C getrocknet und anschließend in der Schneidmühle und Zentrifugalmühle auf < 0,5 mm gemahlen (bei 105 °C getrocknete Analysenprobe)	Rotteparameter
Luftgetrocknet und anschließend mit der Scheibenschwingmühle gemahlen und auf < 0,63 mm abgesiebt (luftgetrocknete Analysenprobe)	Huminstoffe

4.4 Untersuchung der Proben

4.4.1 Glühverlust

Die Bestimmung des Glühverlustes erfolgte im Doppelansatz. In ausgeglühte Keramiktiegel wurden jeweils ca. 10 g der < 0,5 mm gemahlenen Analysenprobe eingewogen. Um die Restfeuchte zu bestimmen, wurden die Tiegel danach für zwei bis drei Stunden bei 105 °C getrocknet. Danach wurden sie zum Auskühlen in einen Exsikkator gegeben. Dieser Exsikkator enthält ein Trockenmittel, welches die Luftfeuchtigkeit der Luft im Exsikkator absorbiert. Diese gilt somit als trocken und die Tiegel können auskühlen ohne Luftfeuchtigkeit aufzunehmen. Nachdem die Tiegel im Exsikkator ausgekühlt waren, wurden sie erneut gewogen. Dies dient zur Bestimmung der Restfeuchte für alle Analysen aus der Analysenprobe. Im Anschluss wurden die Tiegel in einen Muffelofen der Firma NABERTHERM gestellt. Der Vorgang im Muffelofen dauert in Summe zwölf Stunden. In den ersten sieben Stunden heizt sich der Ofen langsam auf 550 °C auf und dann wird diese Temperatur für fünf Stunden gehalten. Bei diesem Vorgang wird der gesamte organische Anteil in der Probe langsam verglüht. Nach den zwölf Stunden wurden die Tiegel zum Auskühlen wieder in den Exsikkator mit dem Trockenmittel gegeben und gewogen, sobald sie abgekühlt waren. Was nun am Ende übrig ist, ist der sogenannte Glührückstand. Die Differenz (Glühverlust) ist ein Maß für den organischen Anteil einer Probe. und der Glühverlust ist ein Summenparameter für organische Substanz, der nichts über die Reaktivität bzw. Abbaubarkeit aussagt.

4.4.2 Total organic carbon (TOC) und Total inorganic carbon (TIC)

Der TOC gibt den gesamten Gehalt des organischen Kohlenstoffs in einer Probe an. Er wird durch die Differenz des Gesamtkohlenstoffs, kurz TC, und des Gehalts des anorganischen Kohlenstoffes, kurz TIC berechnet.

Die Bestimmung von TC und TIC wurde in einem VARIO-MAX der Firma ELEMENTAR durchgeführt. Hierbei wird die Probe in einem Hauptverbrennungsrohr schockartig bei 900 °C unter O_2 Unterstützung verbrannt. Dabei entstehen NO_X und CO_2. Diese werden zur Oxidation in ein Nachverbrennungsrohr, das ebenfalls 900 °C hat, geleitet. Es folgt ein Trockenrohr und danach in ein Reduktionsrohr, wo bei 840 °C Halogene abgefangen werden. Es folgt abermals ein Trockenrohr und danach ein CO_2-Absorber. Hier wird das CO_2 nun bei Raumtemperatur absorbiert. Das NO_X kann ungehindert weiter und erreicht nun einen Wärmeleitfähigkeitsdetektor, wo N detektiert und auf die Einwaage bezogen umgerechnet wird. Danach wird der CO_2 Absorber auf 250 °C aufgeheizt und das CO_2 wird ausgetrieben. Dieses erreicht nun einen zweiten

Detektor, wo C detektiert und wiederum auf die Einwaage bezogen umgerechnet wird. Als Trägergas wird Helium verwendet.

Der TC-Wert wurde aus der getrockneten Analysenprobe ermittelt und für die Bestimmung des TIC-Werts wurde der Glührückstand aus der Glühverlustanalyse herangezogen.

4.4.3 N_{Dumas} und C/N-Verhältnis

Die Ermittlung des N_{Dumas}-Werts erfolgte parallel zur Bestimmung des TC aus der getrockneten Analysenprobe mittels VARIO-MAX (siehe Kapitel 4.4.2). Das C/N-Verhältnis wird durch die Division der Werte des TOC und des N_{Dumas} berechnet.

4.4.4 pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit

Für die Bestimmung des pH-Werts und der elektrischen Leitfähigkeit wurde ein Eluat aus der getrockneten Analysenprobe hergestellt. Dafür wurden 10 g Analysenprobe mit 100 ml Deionat in einem Kunststofffläschchen vermischt und anschließend drei Stunden lang mittels Überkopfschüttlers eluiert. Die Mischung wurde anschließend über einen Faltenfilter (Durchmesser 185 mm) filtriert. Das Filtrat wurde zur Bestimmung des pH-Werts (pH-Meter WTW 531) und der elektrischen Leitfähigkeit (Konduktometer WTW pH 531) herangezogen. Vor der Messung muss das Messgerät kalibriert werden. Dafür wurde ein pH 7,0 Standard zur Bestimmung der Asymmetrie und ein pH 10,0 Standard zur Bestimmung der Steilheit der Kurve verwendet, da angenommen wurde, dass sich die pH-Werte in diesen Bereichen befinden. Die Messung der Eluate fand bei Raumtemperatur statt.

4.4.5 Atmungsaktivität AT_4

Für die Untersuchung der Atmungsaktivität wurde ein Sapromat E der Firma VOITH verwendet. Es wurden nur die Endproben beider Versuchsserien untersucht. Als Probematerial diente die frische Laborprobe, die zur Stabilisierung direkt nach der Entnahme bei - 22 °C tiefgefroren und erst vor der Untersuchung schonend aufgetaut wurde.

Das Probenmaterial wurde im Doppeleinsatz in Reaktionsgefäße gefüllt. Diese wurden anschließend in ein auf 20 °C temperiertes Wasserbad gestellt, um gleichbleibende Versuchstemperatur zu gewährleisten. Durch mikrobielle Stoffwechselvorgänge wird unter Sauerstoffverbrauch organische Substanz abgebaut. Dabei wird ein dem Sauerstoffverbrauch äquivalentes Volumen an CO_2 gebildet. Das CO_2 wird anschließend durch im CO_2-Absorber befindliche NaOH-Plätzchen absorbiert. Der dadurch entstehende Unterdruck wird in einer Messeinheit (Druckindikator) registriert. Zum Ausgleich des entstandenen Unterdrucks wird eine Sauerstofffreisetzung über eine Kupfersulfatlösung ($CuSO_4$) gestartet, bis der Unterdruck wieder ausgeglichen ist. Der Sauerstoffverbrauch wird anhand der dafür benötigen Strommenge berechnet und als kontinuierliche Summenlinie über mindestens vier Tage Messdauer dargestellt.

4.4.6 Huminstoffanalyse

Die Huminstoffanalyse wurde nach der am ABF modifizierten Methode nach Danneberg durchgeführt und dauert vier Tage in Folge. Hierzu wurde für die Extraktion und Fraktionierung von Humin- und Fulvosäuren die luftgetrocknete, mit der Scheibenschwingmühle gemahlene, Probe verwendet.

Pro zu untersuchende Probe wurden dazu 10 g Probe in eine 250 ml Kunststoffgefäß eingewogen, mit 50 ml Natriumpyrophosphat aufgefüllt und über Nacht auf den Überkopfschüttler gehängt. Durch das Drehen am Überkopfschüttler werden die Huminsäuren aus der Probe eluiert. Am nächsten Tag wurde die Probe vom Überkopfschüttler genommen und 20 Minuten bei 4.500 Umdrehungen pro Minute zentrifugiert. Durch das Zentrifugieren werden Fest- und

Flüssigphase getrennt. Der flüssige Überstand wurde in ein Zentrifugenröhrchen überführt und nochmals 20 Minuten bei 13.500 Umdrehungen pro Minute zentrifugiert. Die festen Bestandteile haben sich abermals am Boden des Zentrifugenröhrchens gesammelt. Der Überstand wurde in einen 100 ml Kolben gefüllt und mit deionisiertem Wasser auf 100 ml aufgefüllt. Dies war nun der Ausgangsextrakt für die Messung.

Der Ausgangsextrakt ist in der Regel sehr dunkel und muss daher vor der photometrischen Bestimmung der optischen Dichte mit einer Pufferlösung, die einen pH-Wert von 10 hat, verdünnt werden. Der Verdünnungsgrad hängt von der Farbe des Gesamtextraktes ab. An den ersten Messtagen hat sich eine Verdünnung von 1:25 bewährt, später kann die Verdünnung 1:5 betragen.

Zur Bestimmung der Fulvosäurenfraktion wurden 25 ml des Ausgangsextraktes mit 0,5 ml 37 %iger Salzsäure versetzt und kurz stehen gelassen, damit die Huminsäuren ausfallen können. Danach wurde die Lösung fünf Minuten bei 8.000 Umdrehungen pro Minute zentrifugiert. Wieder haben sich die festen Bestandteile (die ausgefällten Huminsäuren) abgesetzt. Der Überstand wurde in 50 ml Messkolben gefüllt und der Niederschlag verworfen. Zum Überstand wurden 0,6 ml 40 %ige NaOH gegeben um die Säure zu neutralisieren. Anschließend wurde der Kolben mit der Pufferlösung auf 50 ml aufgefüllt.

Durch photometrische Bestimmung der optischen Dichten (OD) von Gesamtextrakt und Fulvosäurenextrakt können Fulvosäuren und Huminsäuren (aus Differenz Gesamtextrakt minus Fulvosäurenextrakt) bestimmt werden. Die Ergebnisse werden jeweils als OD/g o TM angegeben. Es ist daher notwendig, den Restwasser- und Organikgehalt der lufttrockenen Probe zu bestimmen.

Um eine möglichst vollständige Extraktion der Huminstoffe zu gewährleisten, muss die Prozedur zur Extraktion an vier aufeinander folgenden Tagen wiederholt werden, Für die zweite Extraktion wurden die festen Rückstände aus der ersten und zweiten Zentrifugation vom ersten Tag mit 50 ml Natriumpyrophosphat versetzt und wieder über Nacht auf dem Überkopfschüttler eluiert. Die Durchführung der Analysen an den folgenden Tagen erfolgte wie am ersten Tag. Die Ergebnisse (OD/g o TM) der vier Tage werden aufsummiert.

4.4.7 Mikrobiologische Untersuchungen

Die mikrobiologischen Untersuchungen zur Überprüfung der Hygienisierung des Fäkalkompostes wurden im Labor der Abteilung Lebensmittel- und Qualitätssicherung (LQS) des Instituts für Lebensmittelwissenschaften- und technologie durchgeführt und von zwei Mitarbeiterinnen des Labors SIG unterstützt. Da es für Fäkalkomposte keine eigenen Normen gibt, wurden die Untersuchungen in Anlehnung an die Normen ÖNORM EN ISO 9308-1 (2017) für Coliforme und ÖNORM EN ISO 7899-1 (2000) sowie ÖNORM EN ISO 7899-2 (2000) für Enterokokken untersucht. Es wurde für beide Versuchsserien jeweils eine Testuntersuchung nach vier Wochen Rottedauer und die eigentliche Hauptuntersuchung zu Versuchsende nach sechs Wochen Rottedauer durchgeführt. Die Untersuchungen fanden im Labor LQS und nicht im Labor SIG statt, da im Labor SIG fast ausschließlich gering belastete Wasserproben untersucht werden und die Kontaminierungsgefahr (des Labors) zu groß gewesen wäre. Um sich bei den Probenahmen und den Untersuchungen persönlich zu schützen, wurden immer ein Labormantel, eine Atemschutzmaske sowie Handschuhe getragen.

4.4.7.1 Verwendete Nährmedien

Nachfolgend werden die für die Untersuchung verwendeten Nährmedien näher erklärt. Alle Medien wurden von der Firma MERCK bezogen.

- **Gepuffertes Peptonwasser**: Gepuffertes Peptonwasser wird für die Voranreicherung vor der selektiven Anreicherung verwendet. Es hat einen hohen Nährstoffgehalt und ermöglicht so eine hohe Wiederbelebungsrate von Zellen. Es ist klar und gelblich.
- **Chromocult Coliform Agar (CCA)**: Der CCA wird als Selektivmedium zur Anreicherung von Coliformen und *E. coli* verwendet. Das hergestellte Medium ist leicht trübe und gelblich. Coliforme Kolonien erscheinen darauf rötlich und *E. coli* Kolonien bläulich.
- **Violet Red Bile Agar (VRB)**: Der VRB wird ebenso als Selektivmedium zur Anreicherung von Coliformen verwendet. Das hergestellte Medium ist klar und rötlich und die Kolonien der Coliforme erscheinen darauf violett-rötlich mit einem Durchmesser von mindestens 0,5 mm.
- **Kanamycin Esculine Azide Agar (KAA)**: Der KAA wird als Selektivmedium zur Anreicherung von Enterokokken verwendet. Das hergestellte Medium ist klar und braun-bläulich. Enterokokken Kolonien erscheinen darauf als braun-schwarze Punkte.
- **Slanetz and Bartley Agar (SBA)**: Der SBA wird ebenso als Selektivmedium zur Anreicherung von Enterokokken verwendet. Das hergestellte Medium ist klar bis trübe und rötlich. Enterokokken Kolonien erscheinen darauf rötlich, rotbraun oder pink.

Die nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 37 bis 41) zeigen die unterschiedlichen Nährmedien und wie die jeweils bebrüteten Kolonien darauf aussehen.

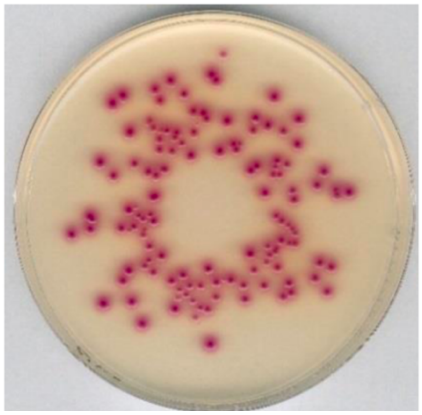

Abbildung 39: Coliforme Kolonien auf CCA
Quelle: merckmillipore.com

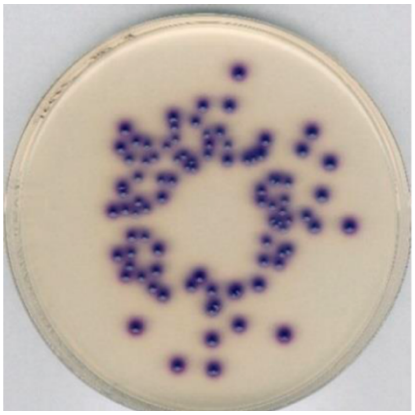

Abbildung 38: *E. Coli* Kolonien auf CCA
Quelle: merckmillipore.com

Abbildung 37: Enterokokken Kolonien auf VRB
Quelle: merckmillipore.com

Abbildung 40: Enterokokken Kolonien auf KAA
Quelle: merckmillipore.com

Abbildung 41: Coliforme Kolonien auf SBA
Quelle: merckmillipore.com

4.4.7.2 Most-Probable-Number (MPN) Verfahren Enterolert

Mit dem statistischen Most-Probable-Number (MPN) Verfahren Enterolert werden Enterokokken bestimmt. Es stellt in der Mikrobiologie ein alternatives Verfahren zur Kultivierung dar, das in der Wasserwirtschaft besonders zur vergleichsweisen schnellen und unkomplizierten Beurteilung von Trinkwasser verwendet wird. Das verwendete Verfahren stammt von der Firma IDEXX. Dabei werden 100 ml Probe mit einem vorgesehenen Medium vermischt, in einen Blister (Quanti-Tray) bestehend aus 2 x 48 Kammern gefüllt, verschweißt, und danach 24 Stunden bei 44 °C bebrütet. Danach werden die einzelnen Kammern des Trays unter einer UV-Lampe ausgezählt. Die mit Enterokokken positiven Kammern fluoreszieren blau. Die einzelnen Kammern geben nur einen positiven oder negativen Nachweis. Die Quantifizierung der Enterokokken erfolgt über einen Abgleich der ausgezählten Kammern mit einer MPN-Tabelle und gibt die wahrscheinlichste Zahl an. Abhängig von den ausgewerteten Verdünnungsstufen liegt die Nachweisgrenze hier bei dem 0,3-fachen der niedrigsten vorhandenen Verdünnungsstufe. Bei der Untersuchung von Fäkalkomposten ist die Aussagekraft dieses Verfahrens jedoch gering (ZUNABOVIC-PICHLER, 2013; zit. bei HOCHWARTER, 2017).

4.4.7.3 Testuntersuchung Versuchsserie 1

Die Testuntersuchung für die Versuchsserie 1 fand am 23. August 2017 statt. Dazu wurde am 21. August 2017 (nach vier Wochen Rottedauer) von einer Mitarbeiterin des Labors SIG 183 g Frischprobe aus Reaktor 12 mit einem Mikrobiologie-Untersuchungsbeutel, einem sogenannten Stomacherbeutel (ohne Filter), entnommen (Abbildungen 42 und 43). Um eine möglichst repräsentative Probe zu erhalten wurde Stichproben an verschiedenen Stellen (Rand und Mitte des Reaktors) entnommen. Der Beutel wurde wie ein Handschuh um die Hand gestülpt und die Probe wurde direkt in den Beutel entnommen. Dieser wurde mit einem Clip verschlossen und über bis zur Untersuchung am 23. August 2017 am ABF in einem Kühlschrank bei 4 °C gelagert.

Abbildung 42: Probenahme mit Stomacherbeutel ohne Filter bei der Testuntersuchung

Abbildung 43: Probenahme mit Stomacherbeutel ohne Filter bei der Testuntersuchung

Um am Tag der Untersuchung Zeit zu sparen, wurde am Tag vor der Untersuchung bereits das benötigte Peptonwasser nach Anleitung hergestellt. Ebenso wurde das Medium KAA nach Anleitung hergestellt und in Petrischalen gegossen (ca. 20 ml pro Schale). Diese wurden, nachdem das Medium fest geworden war, bei 4 °C kopfüber gekühlt.

Am Tag der Untersuchung wurde die Probe in einer Kühlbox mit Kühlakkus ins Labor LQS gebracht. Dort wurde die Probe „trocken“ (ohne Zugabe von Peptonwasser) eine Minute lang mit einem Smasher der Firma BIOMÉRIEUX gestomacht, um das Material zu zerkleinern und zu homogenisieren (Abbildung 44). Danach wurden 20 g der Probe in einen Stomacherbeutel mit Filter eingewogen, mit 180 ml Peptonwasser aufgefüllt, und eine weitere Minute lang gestomacht. Beim Öffnen des Smashers stellte sich allerdings heraus, dass der Stomacherbeutel gerissen war. Dies geschah auch bei einem erneuten Versuch. Die Ursache dafür lag an teilweise kleinen harten Komponenten in der Probe, wahrscheinlich von der Einstreu, die den Beutel perforierten. Daher wurde als Alternative 20 g der Probe in eine Laborflasche eingewogen, mit 180 ml Peptonwasser aufgefüllt und anschließend gut geschüttelt (Abbildungen 45 und 46).

Abbildung 44: Gesmashte Probe in Stomacherbeutel

Abbildung 45: Probe in Laborflasche

Abbildung 46: Probe mit Peptonwasser vermischt

Der Inhalt der Flasche wurde dann in einen Stomacherbeutel mit Filter übergeführt. Diese Beutel bestehen aus zwei Kammern, die durch eine Filtermembran getrennt sind. Die gelöste Probe wird dabei in die eine Kammer gefüllt und durch die Membrane in die zweite Kammer gepresst, wodurch es zur Filterung kommt. Nun kann die Probe zur Analyse entnommen werden. Anschließend wurden 10 ml der Lösung hinter dem Filter herauspipettiert und in eine leere Eprouvette überführt. Diese Lösung war bereits eine - 1 Verdünnung und daraus wurden noch die Verdünnungsreihen - 2, - 3 und - 4 hergestellt. Dazu wurden aus der jeweils kleineren Verdünnungsreihe 1 ml Probe in eine Eprouvette pippetiert und mit 9 ml Peptonwasser aufgefüllt. Die einzelnen Verdünnungsreihen sind in Abbildung 47 dargestellt.

Für die Untersuchung der thermotoleranten Coliformen wurden der CCA und der VRB am Tag der Untersuchung nach Anleitung hergestellt.

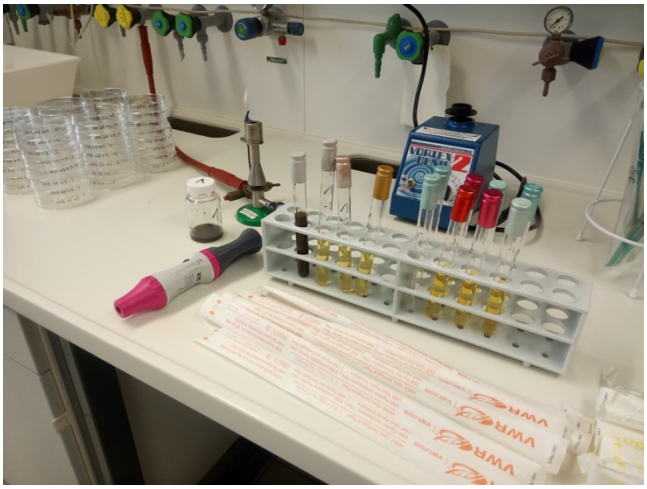

Abbildung 47: Verdünnungsreihen

Es wurden ebenfalls vier Verdünnungsstufen (- 1, - 2, - 3, und - 4) hergestellt und im Gussplattenverfahren untersucht. Hierzu wurden die Petrischalen geöffnet, dann wurde jeweils 1 ml der jeweiligen Verdünnungslösungen in die Platte pipettiert und anschließend mit ca. 20 ml des jeweiligen Mediums übergossen und wieder geschlossen. Danach wurde die Schale geschwenkt, damit sich die Probe besser verteilt. Anschließend wurde gewartet, bis das Medium fest war. Über VRB wurde nach dem Festwerden noch eine dünne Schicht Medium, ein sogenannter Overlay, gegossen (ca. 4 ml). Anschließend wurden die CCA und VRB Schalen kopfüber in einem Brutschrank für 24 - 48 Stunden bei 44 °C inkubiert.

Für die Untersuchung der Enterokokken wurde der KAA und das Spatelplattenverfahren angewandt. Hierzu wurde auf die am Tag davor bereits vorbereiteten Platten jeweils 0,1 ml der Verdünnungsreihen - 1, - 2 und - 3 mittels sterilem L-Spatel auf dem Agar verstrichen. Da nur 0,1 ml der Probe verwendet wurden, erhielt man automatisch eine Verdünnung höher. Das heißt es wurden die Verdünnungen - 2, - 3, und - 4 getestet und die Verdünnungsreihe - 4 wurde bei dieser Untersuchung nicht verwendet, da man sonst eine - 5 Verdünnung erhalten hätte. Die Platten hätten anschließend für 24 Stunden bei 37 °C inkubiert werden sollen, wurden aber versehentlich ebenso bei 44 °C inkubiert.

Die Probe wurde im Doppelansatz untersucht. Ebenso wurde bei jedem Agar eine Kontrollplatte gegossen. Diese zur Überprüfung ob etwaige Kolonien, die nicht aus der Probe stammen, durch ein unreines Arbeiten in die Platten gelangt sind. In den Kontrollplatten sollten daher im Idealfall keine Kolonien nachgewiesen werden.

Zusätzlich wurde für die Bestimmung der Enterokokken noch das MPN Verfahren Enterolert mit 100 ml der - 1 Verdünnung angewandt. Die Trays wurden jedoch aus Versehen 24 Stunden bei 37 °C anstatt 44 °C inkubiert.

Die Platten wurden bei jeder Untersuchung nach dem Inkubieren am LQS auch dort mit Hilfe eines Koloniezählers (Abbildung 48) ausgezählt.

Abbildung 48: Auszählen der Platten mit dem Koloniezähler

Eine Übersicht über die bei der Testuntersuchung von Versuchsserie 1 untersuchten Parameter sowie über die verwendeten Verfahren, Medien und die Inkubationstemperatur und -dauer ist in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Übersicht über die bei der Testuntersuchung von Versuchsserie 1 verwendeten Verfahren

Parameter	Medium	Verfahren	Verdünnungs-stufen	Inkubationstemperatur und -dauer
Thermotolerante Coliforme	CCA	Gussplattenverfahren	- 1, - 2, - 3, - 4	24 - 48 h bei 44 °C
Thermotolerante *E. coli*	VRB	Gussplattenverfahren mit Overlay	- 1, - 2, - 3, - 4	24 - 48 h bei 44 °C
Enterokokken	KAA	Spatelplattenverfahren	- 2, - 3, - 4	24 h bei 44 °C statt 37 °C
		MPN	- 1	24 h bei 37 °C statt 44°C

4.4.7.4 Hauptuntersuchung Versuchsserie 1

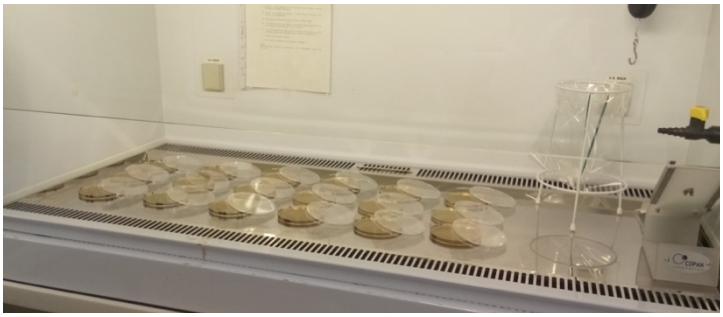

Abbildung 49: Platten beim Trocknen

Die Hauptuntersuchung der Versuchsserie 1 fand am 4. September 2017, nach 43 Tagen Rottedauer, statt. Hierzu wurden pro Reaktor ca. 100 - 150 g Frischprobe entnommen. Diese wurden gleich danach in einer Kühlbox mit Kühlakkus ins LQS gebracht. Die Untersuchung erfolgte analog zu der Testuntersuchung. Es wurden ebenfalls ein paar Tage davor, am 1. September 2017, das für die Untersuchung benötigte Peptonwasser und die KAA Platten hergestellt. Die Proben wurden am Anfang nur trocken gestomacht, da sich das Stomachen mit Peptonwasser bei der Testuntersuchung als nicht erfolgreich herausgestellt hat. Für die Untersuchung der thermotoleranten Coliforme wurde ein CCA und ein VRB und die Verdünnungsstufen - 1, - 2, - 3 und - 4 verwendet. Für die Untersuchung der Enterokokken ein KAA und die Verdünnungsstufen - 2, - 3 und - 4. Diesmal wurden die KAA Platten vor dem Beimpfen kurz getrocknet (Abbildung 49), da sich durch die längere Lagerung im Kühlschrank (die Platten wurden ca. drei Tage vor der Untersuchung gegossen) Kondenswasser gebildet hatte. Alle Proben wurden im Doppelansatz bestimmt und es wurden Kontrollplatten gegossen. Ebenso wurden die Enterokokken zusätzlich noch mittels Enterolert untersucht, genauso wie bei der Testuntersuchung. Leider wurden die Platten für die Enterokokken und der Enterolert wieder falsch inkubiert. Die Platten hätten 24 Stunden bei 37 °C inkubiert werden sollen, wurden jedoch 24 - 41 Stunden bei 44 °C inkubiert und der Enterolert wurde 24 Stunden bei 37 °C inkubiert statt 24 Stunden bei 44 °C. Die Platten für CCA und VRB wurden für 24 - 65 Stunden (also länger als bei der Testuntersuchung) bei 44 °C inkubiert.

Eigentlich hätte die Testuntersuchung am 23. August 2017 Aufschluss darüber geben sollen, ob wirklich alle Verdünnungsstufen bei der Hauptuntersuchung untersucht werden müssen. Jedoch wurde leider bei der Testuntersuchung falsch ausgezählt und daher wurden wieder alle Verdünnungsstufen getestet. Dies resultierte in einer sehr hohen Anzahl an Platten.

Eine Übersicht über die bei der Hauptuntersuchung von Versuchsserie 1 untersuchten Parameter sowie über die verwendeten Verfahren, Medien und die Inkubationstemperatur und -dauer ist in Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 11: Übersicht über die bei der Hauptuntersuchung von Versuchsserie 1 verwendeten Verfahren

Parameter	**Medium**	**Verfahren**	**Verdünnungs-stufen**	**Inkubationstemperatur und -dauer**
Thermotolerante Coliforme	CCA	Gussplattenverfahren	- 1, - 2, - 3, - 4	24 - 65 h bei 44°C
Thermotolerante *E. coli*	VRB	Gussplattenverfahren mit Overlay	- 1, - 2, - 3, - 4	24 - 65 h bei 44°C
Enterokokken	KAA	Spatelverfahren	- 2, - 3, - 4	24 - 41 h bei 44°C statt 37°C
		MPN	- 1	24 h bei 37°C statt 44°C

4.4.7.5 Testuntersuchung Versuchsserie 2

Am 11. Oktober 2017 wurde als Vorbereitung auf die Untersuchung der Serie 2 am 24. Oktober 2017 eine Testuntersuchung durchgeführt. Hierfür wurde am 10. Oktober 2017 eine Frischprobe von ca. 141 g aus Reaktor 10, wie bei den Vorversuchen, mit einem Stomacherbeutel ohne Filter entnommen und über Nacht am ABF bei 4 °C gekühlt. Am nächsten Morgen wurde die Probe in einer Kühlbox mit Kühlakkus ins LQS gebracht.

Abbildung 50: Platten im Brutschrank

Da die Untersuchung und die Ergebnisse aus Serie 1 nicht sehr zufriedenstellend waren, wurden bei der Testuntersuchung zusätzliche Varianten getestet: Es wurden folgende Agars und Verdünnungsstufen getestet:

- CCA - 1 Verdünnung mit und ohne Overlay bei 37 °C und 44 °C inkubiert
- VRB - 1 Verdünnung mit Overlay bei 37 °C und 44 °C inkubiert
- KAA - 2 Verdünnung bei 37 °C und 44 °C inkubiert und
- SBA - 2 Verdünnung bei 37 °C und 44 °C inkubiert

Der Grund weshalb bei CCA eine Variante mit Overlay getestet wurde (dies ist unüblich bei CCA) war das Auftreten einer sehr großen Begleitflora bei Serie 1. Es wurde vermutet, dass diese durch den Overlay eingeschränkt werden kann, da die Coliforme anaerobe Bakterien sind und das Wachstum der aeroben Bakterien durch den Overlay gehemmt wird. Ebenso wurde jeweils nur eine Verdünnungsstufe getestet, da sich die weiteren Verdünnungsstufen bei den vorhergegangenen Untersuchungen als nicht notwendig herausstellten. Coliforme wurden bei. 37 °C inkubiert, die thermotoleranten bei 44 °C (Abbildung 50). Die Inkubationszeit betrug 24 - 48 Stunden und die Platten wurden dazwischen immer wieder kontrolliert.

Auf die Untersuchung mit dem Enterolert wurde diesmal verzichtet, da die Ergebnisse aus den Vorversuchen nicht zufriedenstellend waren und dieser Test bei Fäkalkomposten laut ZUNABOVIC-PICHLER (2013) wenig Aussagekraft hat (siehe Kapitel 4.4.7.2).

Eine Übersicht über die bei der Testuntersuchung von Versuchsserie 2 untersuchten Parameter sowie über die verwendeten Verfahren, Medien und die Inkubationstemperatur und -dauer ist in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: Übersicht über die bei der Testuntersuchung von Versuchsserie 2 verwendeten Verfahren

Parameter	Medium	Verfahren	Verdünnungs-stufen	Inkubationstemperatur und -dauer
Coliforme und thermotolerante Coliforme *E. coli* und thermotolerante *E. coli*	CCA	Gussplattenverfahren	- 1	24 - 48 h bei 37 °C und 44 °C
		Gussplattenverfahren mit Overlay	- 1	24 - 48 h bei 37 °C und 44 °C
	VRB	Gussplattenverfahren mit Overlay	- 1	24 - 48 h bei 37 °C und 44 °C
Enterokokken	KAA	Spatelverfahren	- 2	24 - 48 h bei 37 °C und 44 °C
	SBA	Spatelverfahren	- 2	24 - 48 h bei 37 °C und 44 °C

4.4.7.6 Hauptuntersuchung Versuchsserie 2

Die Untersuchung der Endproben aus Serie 2 erfolgte am 24. Oktober 2017, nach 44 Tagen Rottedauer. Aufgrund der Ergebnisse der Voruntersuchung vom 11. Oktober 2017 wurde beschlossen für die Enduntersuchung CCA - 1 Verdünnung ohne Overlay bei 44 °C inkubiert, VRB - 1 Verdünnung bei 44 °C inkubiert und KAA - 2 Verdünnung bei 37 °C inkubiert anzuwenden. Das Peptonwasser und die KAA Platten wurden wieder am Tag vor der Untersuchung vorbereitet. Die Proben wurden am 24. Oktober 2017, wie bei den Vorversuchen mittels Stomacherbeutel, von einer Mitarbeiterin des Labors SIG entnommen, gekühlt ins LQS gebracht und anschließend untersucht. Vor dem Beimpfen der Platten wurden die mit Peptonwasser vermischten Proben (in sterilisierten Glasflaschen) diesmal jedoch eine Stunde mittels Überkopfschüttlers (Abbildung 51) am ABF eluiert um eine bessere Homogenisierung zu erreichen.

Abbildung 51: Mit Peptonwasser vermischte Proben auf dem Überkopfschüttler (Glasflaschen)

Alle Platten wurden 24 - 72 Stunden inkubiert, da die Voruntersuchung gezeigt hatte, dass die ersten Ergebnisse wahrscheinlich erst nach 72 Stunden sichtbar sein werden (siehe Kapitel 5.12.2).

Auch bei dieser Untersuchung wurde der Enterolert weggelassen.

Eine Übersicht über die bei der Hauptuntersuchung von Versuchsserie 2 untersuchten Parameter sowie über die verwendeten Verfahren, Medien und die Inkubationstemperatur und -dauer ist in Tabelle 13 dargestellt.

Tabelle 13: Übersicht über die bei der Hauptuntersuchung von Versuchsserie 2 verwendeten Verfahren

Parameter	**Medium**	**Verfahren**	**Verdünnungs-stufen**	**Inkubationstemperatur und -dauer**
Thermotolerante Coliforme Thermotolerante *E. coli*	CCA	Gussplattenverfahren	- 1	24 - 72 h bei 44 °C
	VRB	Spatelverfahren	- 2	24 - 72 h bei 44 °C
Enterokokken	KAA	Spatelverfahren	- 2	24 - 72 h bei 37 °C

5. Ergebnisse und Diskussion

5.1 Temperatur

Die Temperaturverläufe für die drei Reaktoren von Variante 1 in Versuchsserie 1 sind als Beispiel in Abbildung 52 dargestellt. Die Temperaturunterschiede der jeweils drei Reaktoren sind durch die Aufstellung der Reaktoren in drei unterschiedlichen Etagen erklärbar. Die markanten Sprünge bei den Temperaturkurven zeigen die Umsetzzeitpunkte.

Zur besseren Vergleichbarkeit der Varianten werden in den Abbildungen 53 bis 55 jeweils alle 6 Varianten je Aufstellungsetage dargestellt.

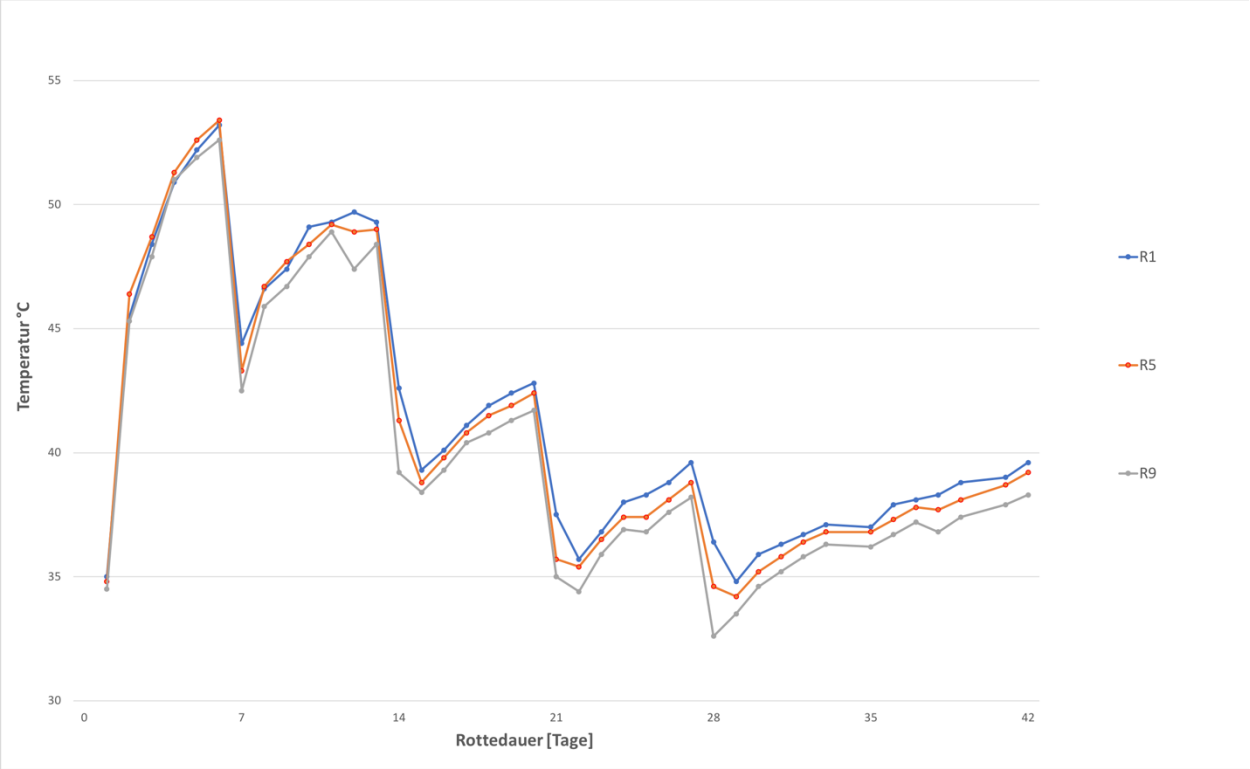

Abbildung 52: Temperaturkurve von Variante 1 (normale Mischung) in Versuchsserie 1

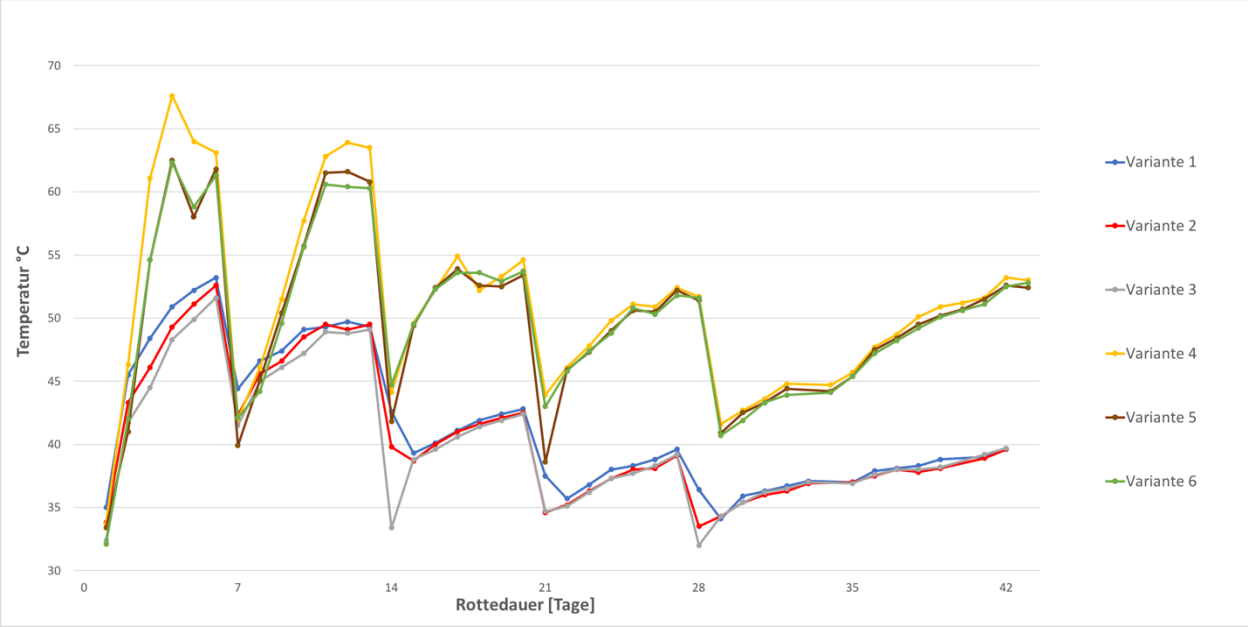

Abbildung 53: Temperaturkurve der Varianten 1 bis 6 in der obersten Etage

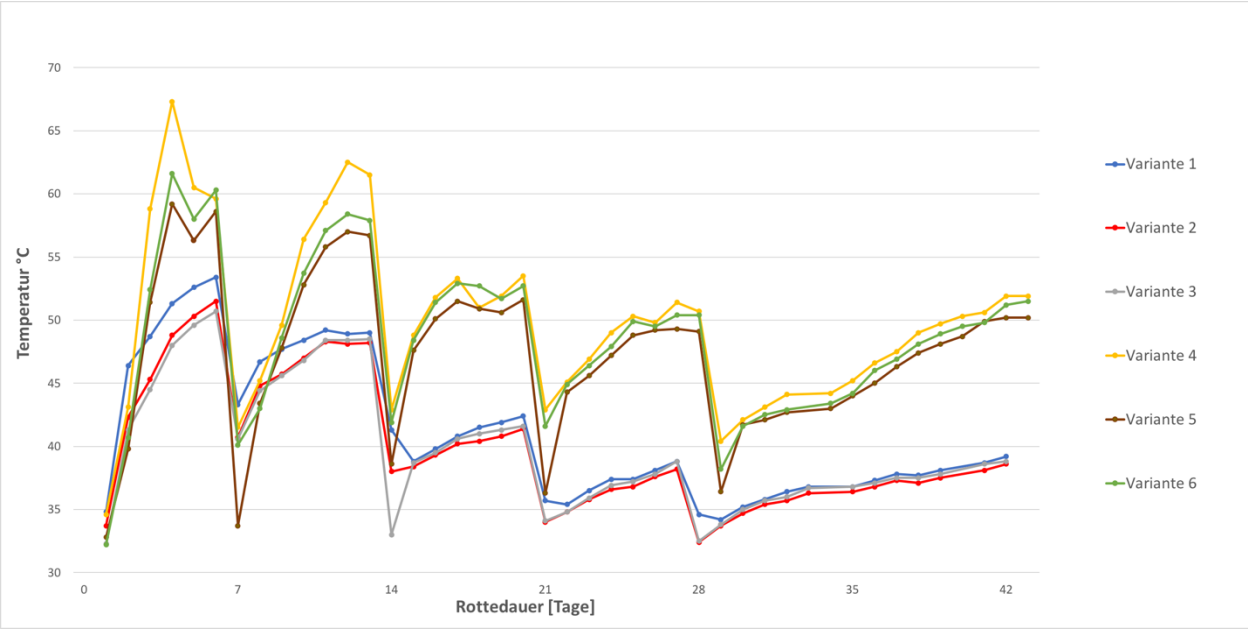

Abbildung 54: Temperaturkurve der Varianten 1 bis 6 in der mittleren Etage

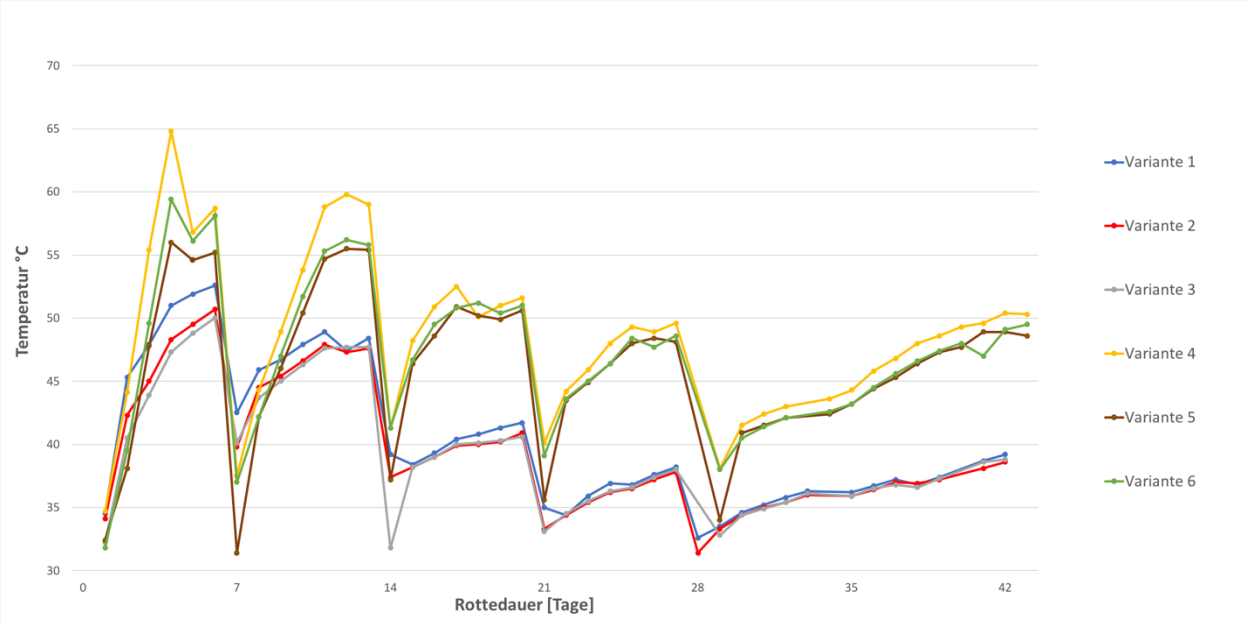

Abbildung 55: Temperaturkurve der Varianten 1 bis 6 in der untersten Etage

In Versuchsserie 1 wurde die in der Kompostverordnung (BMLFUW, 2001) für die Hygienisierung geforderte Mindesttemperatur von 55 °C bei keinem der Reaktoren erreicht. Die Höchsttemperatur trat am Tag 7 mit 53,4 °C bei Variante 1 (normale Mischung) in Rektor 5 (mittlere Etage) auf (Abbildung 54). Generell erreichten die Reaktoren nur an zwei bis drei Tagen Temperaturen von über 50 °C.

In Versuchsserie 2 waren die Rottetemperaturen höher und die in der Kompostverordnung (BMLFUW, 2001) für die Hygienisierung geforderten Temperaturen (siehe Kapitel 3.3.1.2) wurden in allen Reaktoren erreicht. Die höchsten Temperaturen wurden bei Variante 4 (Biozumischung) in Reaktor 1 gemessen (insgesamt 7 Tage $\geq$ 60 °C, davon in der ersten Woche vier Tage in Folge und in der zweiten Woche drei Tage in Folge – Abbildung 53). Grund für die höheren Rottetemperaturen ist die Zumischung von biogenem Material. Auch bei Variante 5 (Vergleichsvariante) in Reaktor 2 und Variante 6 (Pilzzumischung) in Reaktor 4 wurden drei Tage in Folge $\geq$ 60 °C erreicht (Abbildung 53). Dies liegt an der höhere Klimakammertemperatur, denn diese wurde ja an die mit biogenem Material versehenen Variante angepasst. Reaktor 5 und Reaktor 9 (beide Variante 4) erreichten vier Tage in Folge $\geq$ 55 °C (Abbildung 54).

5.2 Kohlendioxidkonzentrationen (CO_2) in der Abluft und Zuluftmengen

Die CO_2-Konzentrationen in der Abluft sind ein Maß für die mikrobielle Aktivität des Materials und laufen daher in der Regel parallel mit den Rottetemperaturen. Beeinflusst werden sie aber auch von den Zuluftmengen. Bei ausreichender Sauerstoffversorgung wirkt eine Erhöhung der Zuluftmenge verdünnend. Zu Beginn der Rotte wurde versucht eine CO_2-Konzentrationen in der Abluft von ca. 15 Vol.% einzuhalten (das entspricht in etwa der Situation bei der offenen Mietenkompostierung). Waren die Werte zu hoch, wurde die Zuluftmenge erhöht und umgekehrt. Mit zunehmendem Abbau während der Rotte zeigten die CO_2-Konzentrationen wie üblich abnehmende Tendenz. Gegen Ende der Rotte konnte daher ein Regelwert von ca. 5 Vol.% CO_2 nicht mehr überschritten werden. Auch bei diesen Diagrammen sind die Umsetzvorgänge sehr schön durch Sprünge erkennbar.

Die Abbildungen 56 bis 58 zeigen die Verläufe der CO_2-Konzentrationen in der Abluft der Rottereaktoren sowie jene der gewählten Zuluftmengen der einzelnen Varianten in Versuchsserie 1. Auch hier ist der Einfluss der Reaktoraufstellung in den unterschiedlichen Etagen erkennbar. Die „Umkehrung“ der Konzentrationshöhe nach dem ersten Umsetzen ist auf die höheren Zuluftmengen („Verdünnungseffekt“) in Reaktor 1 zurückzuführen.

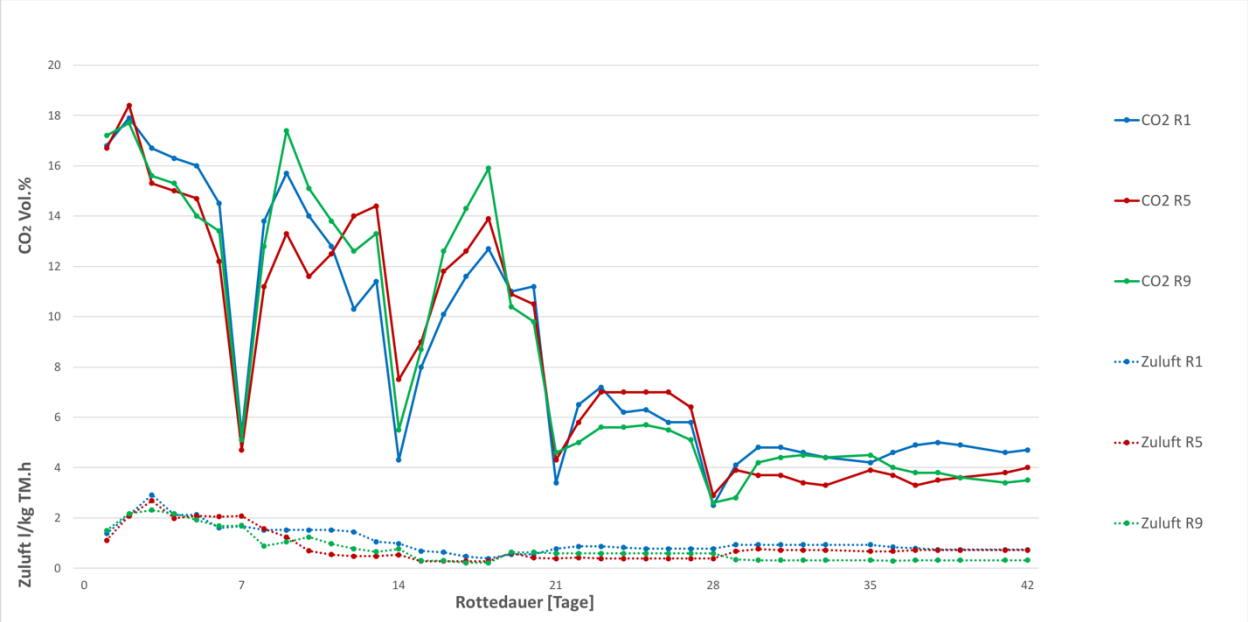

Abbildung 56: Kurve der CO_2-Konzentrationen und der Zuluftmengen von Variante 1 (normale Mischung) in Versuchsserie 1

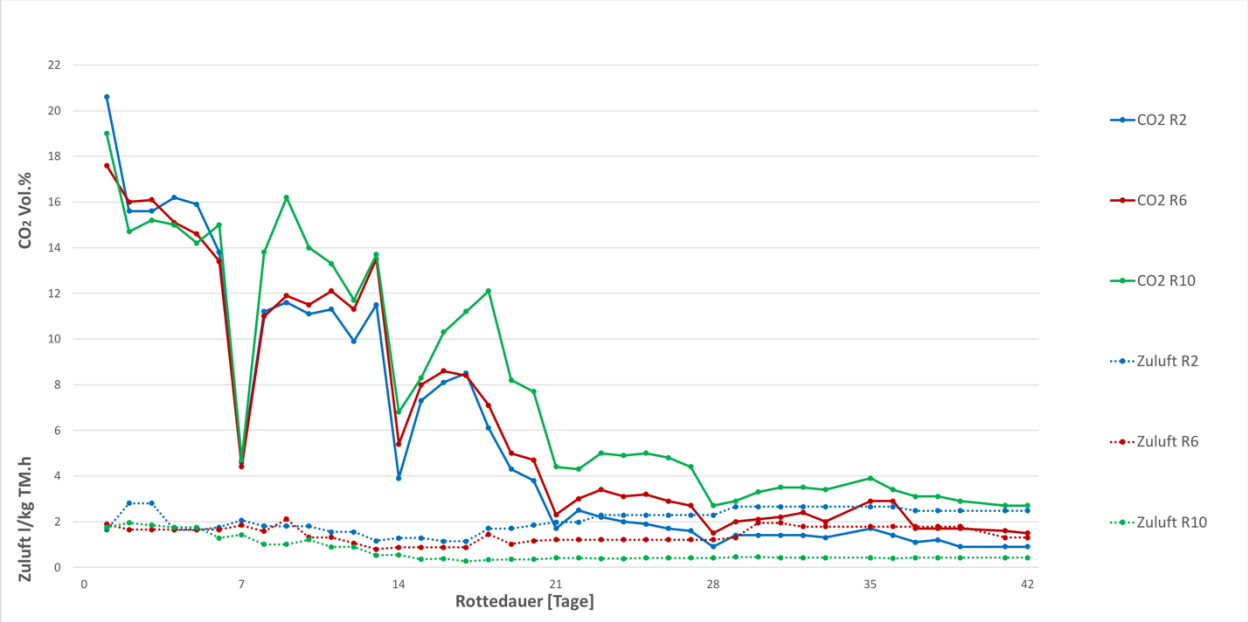

Abbildung 57: Kurve der CO_2-Konzentrationen und der Zuluftmengen von Variante 2 (wenig Einstreu) in Versuchsserie 1

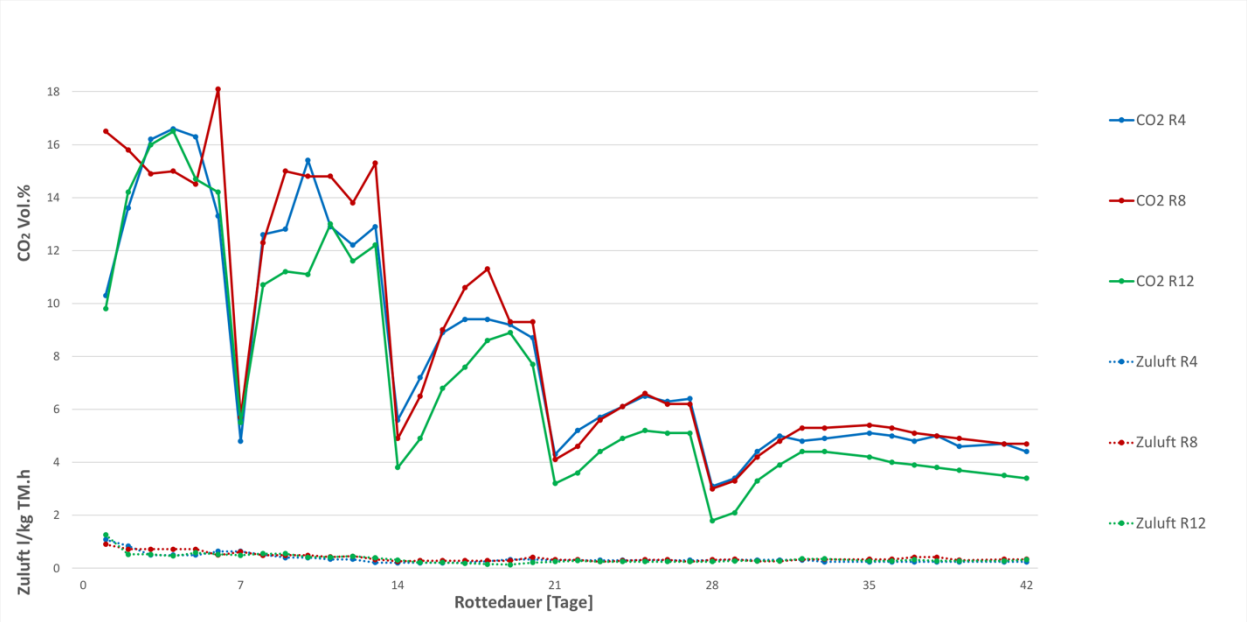

Abbildung 58: Kurve der CO_2-Konzentrationen und der Zuluftmengen von Variante 3 (viel Einstreu) in Versuchsserie 1

Die höchsten CO_2-Konzentrationen traten bei Variante 1 (normale Mischung) in Reaktor 1 auf (Abbildung 56). Daher wurde hier auch die höchste Zuluftmenge eingestellt, was dann nach dem ersten Umsetzen in Reaktor 1 und 2 (oberste Etage) zu leicht überhöhten Zuluftmengen führte, weshalb die CO2-Konzentrationen unter jene der anderen (schwächer belüfteten) Etagen fiel. Variante 2 (wenig Einstreu) hatte die zweithöchsten CO_2-Konzentrationen (Abbildung 57) und Variante 3 (viel Einstreu) die niedrigsten und daher auch die geringste Zuluftmenge (Abbildung 58).

Die Kurven der CO_2-Konzentrationen in der Abluft der Rottereaktoren sowie der Zuluftmengen der einzelnen Varianten in Versuchsserie 2 werden in den Abbildungen 59 bis 61 dargestellt.

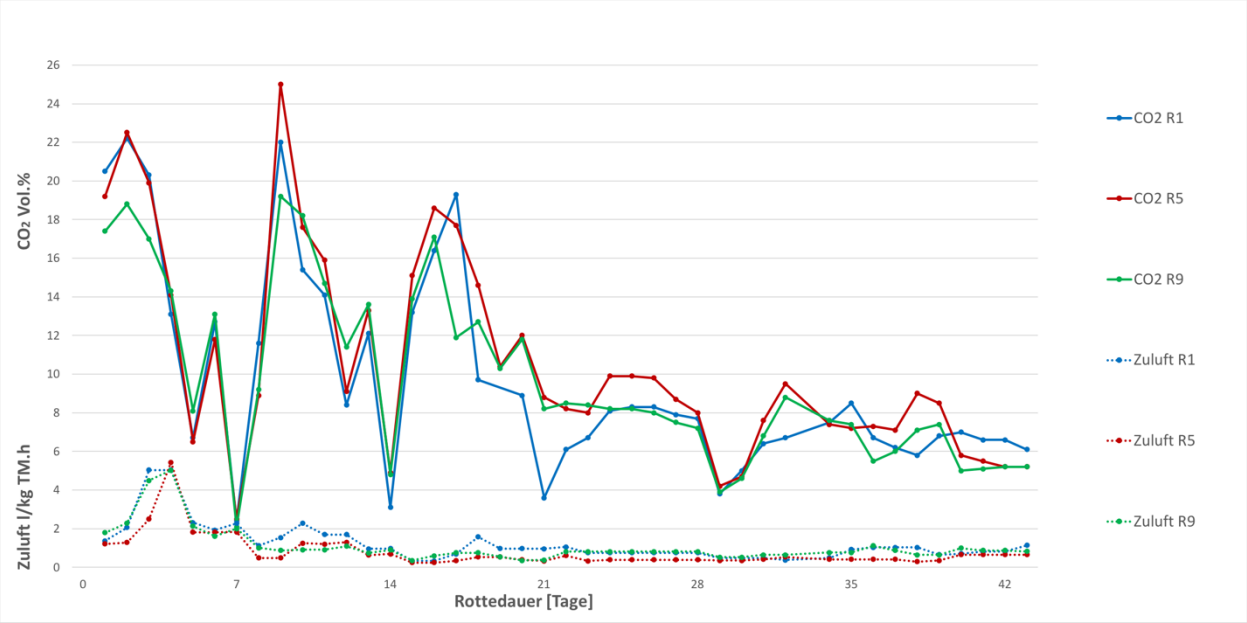

Abbildung 59: Kurve der CO_2-Konzentrationen und der Zuluftmengen von Variante 4 (Biozumischung) in Versuchsserie 2

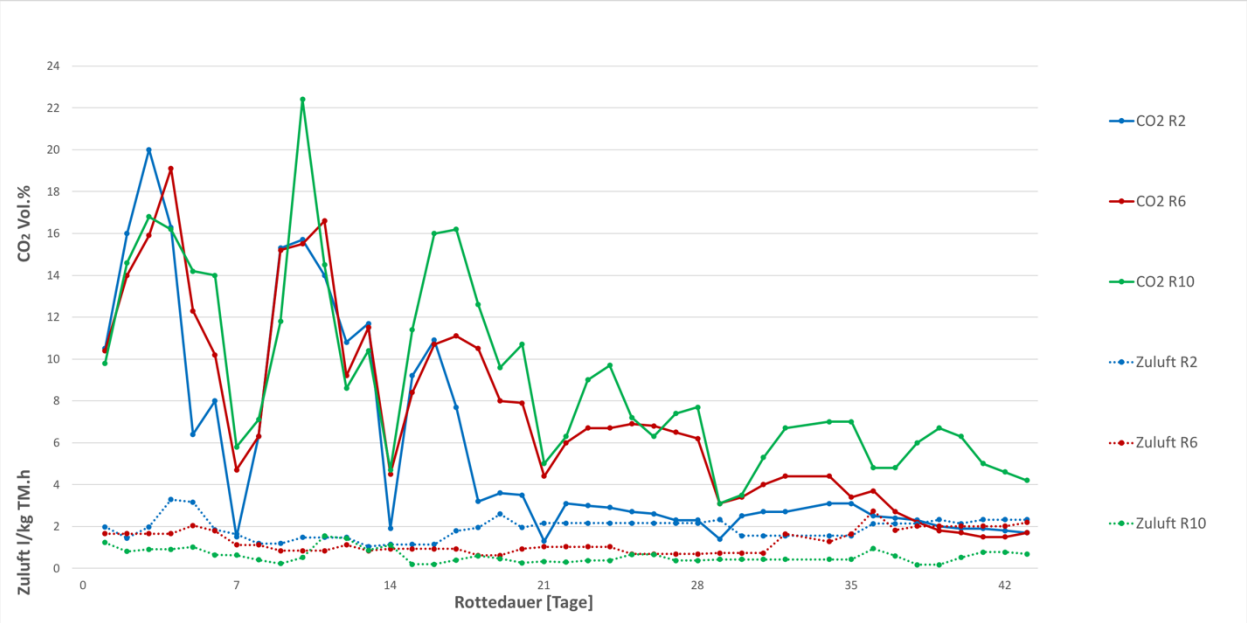

Abbildung 60: Kurve der CO_2-Konzentrationen und der Zuluftmengen von Variante Variante 5 (Vergleichsvariante) in Versuchsserie 2

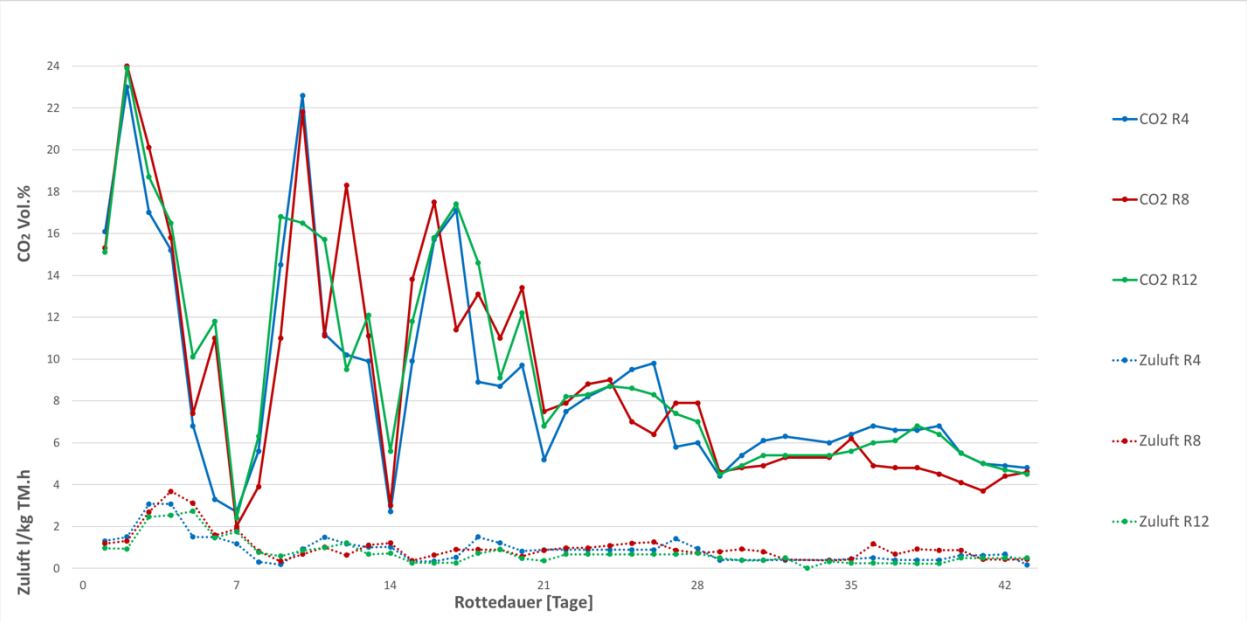

Abbildung 61: Kurve der CO_2-Konzentrationen und der Zuluftmengen von Variante 6 (Pilzzumischung) in Versuchsserie 2

In Serie 2 traten wie zu erwarten die höchsten CO_2-Konzentratione bei Variante 4 (Biozumischung) auf (Abbildung 59). Dadurch wies diese Variante auch die höchsten Zuluftmengen auf. Variante 6 (Pilzzumischung) hatte die zweithöchsten CO_2-Werte und Belüftungsmengen (Abbildung 61) und das Schlusslicht bildete Vergleichsvariante 5 (Abbildung 60).

5.3 Wassergehalt

Der Verlauf der gemittelten Wassergehaltswerte pro Variante ist in Abbildung 62 dargestellt. Die Proben wurden immer während des Umsetzens vor einer eventuellen Feuchtigkeitszugabe entnommen. Beim Umsetzen wurde, wie schon in Kapitel 4.2.2.1 beschrieben, der Wassergehalt mittels Faustprobe kontrolliert und eventuell angepasst indem Wasser, oder das angefallene Sickerwasser, komplett oder teilweise dazugegeben wurde. War eine Probe schon feucht genug, wurde das Sickerwasser weggeleert.

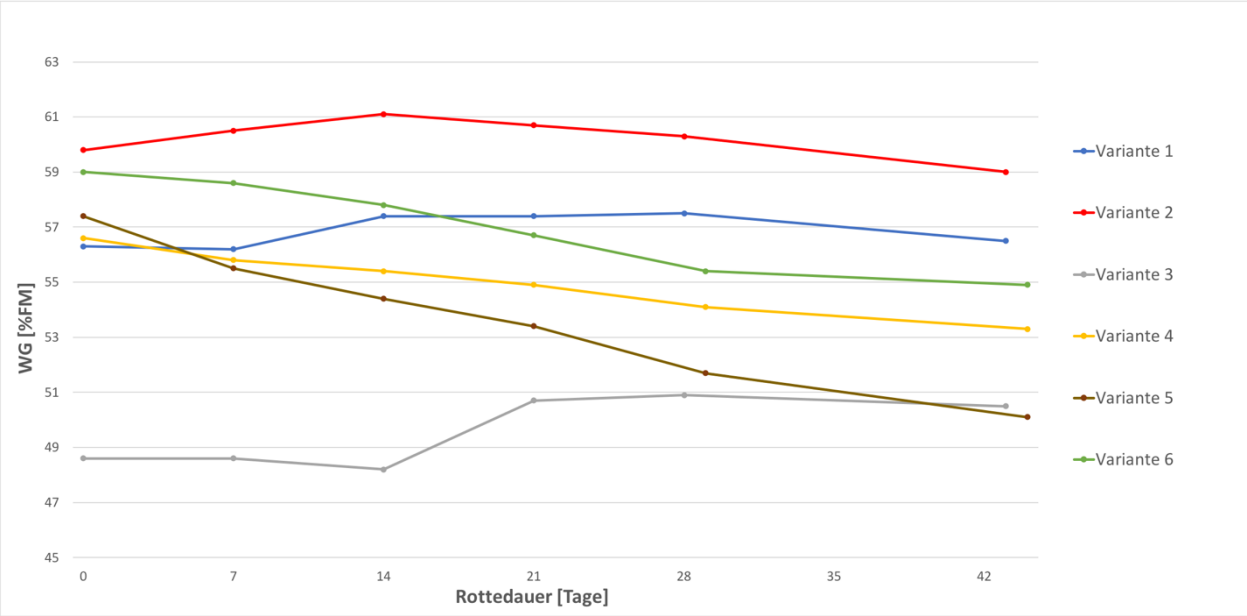

Abbildung 62: Gemittelte Wassergehaltswerte der sechs Varianten über die gesamte Versuchsdauer

Wie bereits in Kapitel 3.3.3.2 erwähnt liegt der optimale Wassergehalt für die Bioabfallkompostierung laut BINNER et al. (2004) zwischen 50 % und 60 % und wurde daher als Zielbereich für diesen Kompostierversuch angesetzt. Beim Einbau des Materials konnte für alle Varianten (mit Ausnahme der Variante 3 mit viel Einstreu) ein ähnlicher Wassergehalt zwischen 56 - 60 % FM eingestellt werden. Bei allen Varianten konnte der Wassergehalt über die gesamte Versuchsdauer innerhalb der Bandbreite des optimalen Bereichs gehalten werden.

Die Unterschiede ergaben sich durch die unterschiedliche Materialzusammensetzung in den einzelnen Varianten. In Versuchsserie 1 war der Wassergehalt in Variante 2 (wenig Einstreu) am höchsten und in Variante 3 am geringsten. Dies war am Anfang sowie am Ende der Rotte bei beiden Varianten der Fall und liegt an dem hohen Anteil an Fäkalien in Variante 2 und dem hohen Anteil an Einstreu in Variante 3. In Versuchsserie 2 hatte Variante 6 (Pilzzumischung) über die gesamte Rottedauer den höchsten Wassergehalt, gefolgt von Variante 4 (Biozumischung) am Beginn und Variante 5 (Vergleichsvariante) am Ende der Rotte. In beiden Versuchsserien hat am Beginn sowie am Ende der Rotte Variante 2 eindeutig den höchsten Wassergehalt und Variante 3 am Beginn den geringsten und am Ende den zweitniedrigsten. Interessant ist der Unterschied in den beiden Vergleichsvarianten (1 und 5). Liegen diese zu Beginn noch im selben Bereich, driften sie mit zunehmender Rottedauer aufgrund eines höheren Wasseraustrags bei Variante 5 (siehe Tabelle 14 und 15) auseinander.

Zusammenfassend kann ausgesagt werden, dass in allen Varianten über die gesamte Rottedauer ein für den biologischen Abbau günstiger Wassergehalt aufrechterhalten werden konnte.

Ein Überblick über die Flüssigkeitsmengen in ml (entweder Wasser oder Sickerwasser), die während der Rotte hinzugefügt oder entnommen wurden, um den Wassergehalt über die gesamte Versuchsdauer in einem günstigen Bereich zu halten, ist in den Tabellen 14 und 15 dargestellt. War eine Probe beispielsweise zu trocken, wurde Wasser hinzugefügt und war sie zu feucht, wurde das beim Umsetzen entnommene Kondens- bzw. Sickerwasser komplett oder teilweise weggeleert. Ein positives Vorzeichen bei den einzelnen Werten gibt an, wenn zusätzliches Wasser hinzugefügt wurde und ein negatives, wenn überflüssiges Kondens- oder Sickerwasser weggeleert wurde.

Tabelle 14: Hinzugefügte (+) und entnommene (-) (Kondens- und Sickerwasser) Wassermengen in ml in Versuchsserie 1 pro Reaktor (R) und gerundeter Mittelwert (MW) pro Variante

	Variante 1				**Variante 2**				**Variante 3**			
Tag	**R1**	**R5**	**R9**	**MW**	**R2**	**R6**	**R10**	**MW**	**R4**	**R8**	**R12**	**MW**
7	0 - 50	0 - 55	0 - 50	**0** **- 52**	0 - 40	0 - 40	0 - 15	**0** **-32**	0 - 20	0 - 20	0 - 32	**0** **- 24**
14	0 - 35	0 - 30	0 - 30	**0** **- 32**	0 - 40	0 - 30	0 - 25	**0** **- 32**	+ 350 - 15	+ 350 - 15	+ 350 - 15	**+ 350** **- 15**
21	0 - 10	0 - 8	0 - 5	**0** **- 8**	0 - 22	0 - 9	0 - 4	**0** **- 12**	0 - 7	0 - 5	0 - 4	**0** **- 5**
28	0 - 9	0 - 5	0 - 6	**0** **- 7**	0 - 44	0 - 46	0 - 24	**0** **- 38**	0 - 4	0 - 2	0 - 6	**0** **- 4**
43	0 - 20	0 - 72	0 - 69	**0** **- 54**	0 - 53	0 - 67	0 - 80	**0** **- 67**	0 - 15	0 - 10	0 - 9	**0** **- 11**
GESAMT	0 - 124	0 - 170	0 - 160	**0** **- 151**	0 - 197	0 - 192	0 - 148	**0** **- 179**	+ 350 - 61	+ 350 - 52	+350 - 66	**+ 350** **- 60**

Es ist sehr gut erkennbar, dass in Versuchsserie 1 Variante 3 (viel Einstreu) am trockensten war. Dies liegt an der hohen Menge an Einstreu in dieser Variante, die ein geringes Wasserhaltevermögen hat. In dieser Variante wurde über die gesamte Rottedauer kein Sickerwasser entnommen. Der Wasseraustrag fand lediglich über Verdunstung statt. Es mussten sogar in der zweiten Woche pro Reaktor 350 ml Wasser hinzugefügt werden, damit der optimale Wassergehalt erhalten blieb. In der dritten Woche war der Wassergehalt zwar immer noch höher als in der Woche davor, trotzdem lag er immer noch deutlich unter den anderen Varianten. Variante 2 (wenig Einstreu) war aufgrund des hohen Anteils an Fäkalien am feuchtesten. Hier musste in den letzten zwei Wochen der Rotte, wie auch bei Variante 1 (normale Mischung) in der letzten Woche, neben dem Kondenswasser auch Sickerwasser entnommen werden.

Tabelle 15: Entnommene (Kondens- und Sickerwasser) Wassermengen in ml in Versuchsserie 2 pro Reaktor (R) und gerundeter Mittelwert (MW) pro Variante

	Variante 4				**Variante 5**				**Variante 6**			
Tag	**R1**	**R5**	**R9**	**MW**	**R2**	**R6**	**R10**	**MW**	**R4**	**R8**	**R12**	**MW**
7	- 357	- 310	- 308	**- 325**	- 150	- 145	- 92	**- 129**	- 313	- 335	- 380	**- 343**
14	- 144	- 145	- 129	**- 140**	- 140	- 159	- 195	**- 165**	- 182	- 148	- 190	**- 173**
21	- 85	- 62	- 62	**- 70**	- 80	- 72	- 70	**- 74**	- 110	- 111	- 80	**- 100**
29	- 68	- 60	- 55	**- 61**	- 60	- 60	- 35	**- 52**	- 91	- 90	- 24	**- 68**
44	- 90	- 86	- 94	**- 90**	- 75	- 75	- 22	**- 58**	- 90	- 78	- 73	**- 80**
GESAMT	- 744	- 663	- 648	**- 685**	- 505	- 511	- 414	**- 477**	- 786	- 762	- 747	**- 765**

In Versuchsserie 2 war der Anfangswassergehalt an der oberen Grenze des günstigen Bereiches. Daher musste über die gesamte Rottedauer bei allen Varianten und in allen Reaktoren kein zusätzliches Wasser zugefügt werden. Sickerwasser und Kondenswasser musste laufend entnommen werden. Der Wasseraustrag in Variante 6 (Pilzzumischung) war in dieser Versuchsserie über die gesamte Rottedauer am höchsten. Verglichen mit Variante 5 (Vergleichsvariante) könnte der Pilz in dieser Variante einen Einfluss darauf gehabt haben. Bei Variante 4 (Biozumischung) musste am zweitmeisten Wasser entnommen werden und bei Variante 5 am wenigsten.

5.4 pH-Wert

Der pH-Wert ist ein Parameter, der zur Kontrolle eines optimalen Rotteprozesses herangezogen werden kann (Kapitel 3.3.3.3). Der Verlauf der gemittelten pH-Werte (kompensiert auf 20 °C) pro Variante beider Versuchsserien ist in Abbildung 63 ist dargestellt.

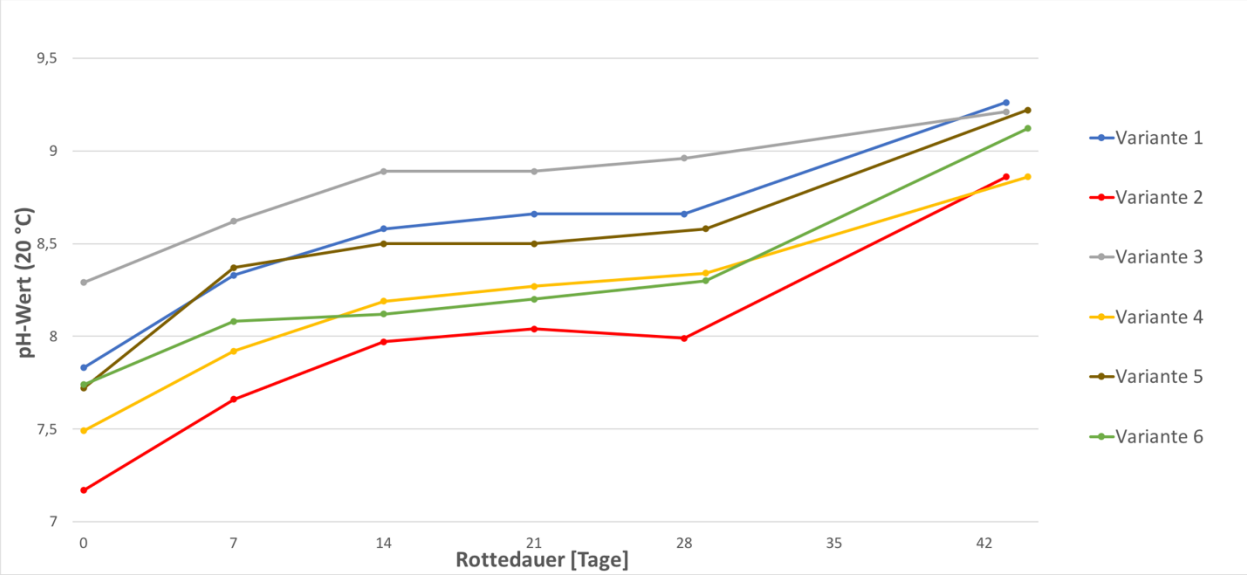

Abbildung 63: Gemittelte pH-Werte (kompensiert auf 20 °C) der sechs Varianten über die gesamte Versuchsdauer

Bereits zu Beginn der Rotte wiesen alle Varianten pH-Werte im alkalischen Bereich auf (7,7 bis 8,6). Das liegt am hohen Anteil an Fäkalien in Variante 2 (vergleiche Kapitel 3.4.2) bzw. dem hohen Anteil an Einstreu in Variante 3, die neben anderen Komponenten auch Kompost enthält. Generell sind die Ausgangswerte als hoch anzusehen - bei Bioabfällen liegen diese normalerweise im leicht sauren Milieu (BINNER et al., 2004). Bei der Kompostierung von Bioabfällen ist am Beginn der Rotte in der ersten mesophilen Phase normalerweise ein Absinken des pH-Wertes zu beobachten. Dieses Absinken kann laut BILITEWSKI und HÄRDTLE (2013) auf durch Hydrolysevorgänge freigesetzte niedere Carbonsäuren bzw. die damit verbundene Bildung von CO_2 zurückgeführt werden. Bei den gegenständlichen Versuchen konnte jedoch in keiner Variante ein Absinken erkannt werden. Fäkalien und Einstreu puffern offensichtlich die Säurebildung ab. Auch bei der mit 50 % Bioabfällen gemischten Variante 4 ist keine Versäuerung zu beobachten. Im weiteren Rotteprozess steigen die Werte, wie üblich, leicht an und am Versuchsende hat Variante 1 (normale Mischung) mit einem Mittelwert von 9,3 den höchsten Wert und Variante 2 und Variante 4 haben beide mit 8,9 den niedrigsten. Generell liegen jedoch alle Werte am Ende eng beieinander.

5.5 Elektrische Leitfähigkeit

Der Verlauf der gemittelten Werte der elektrischen Leitfähigkeit (kompensiert auf 20°C) pro Variante ist in Abbildung 64 dargestellt.

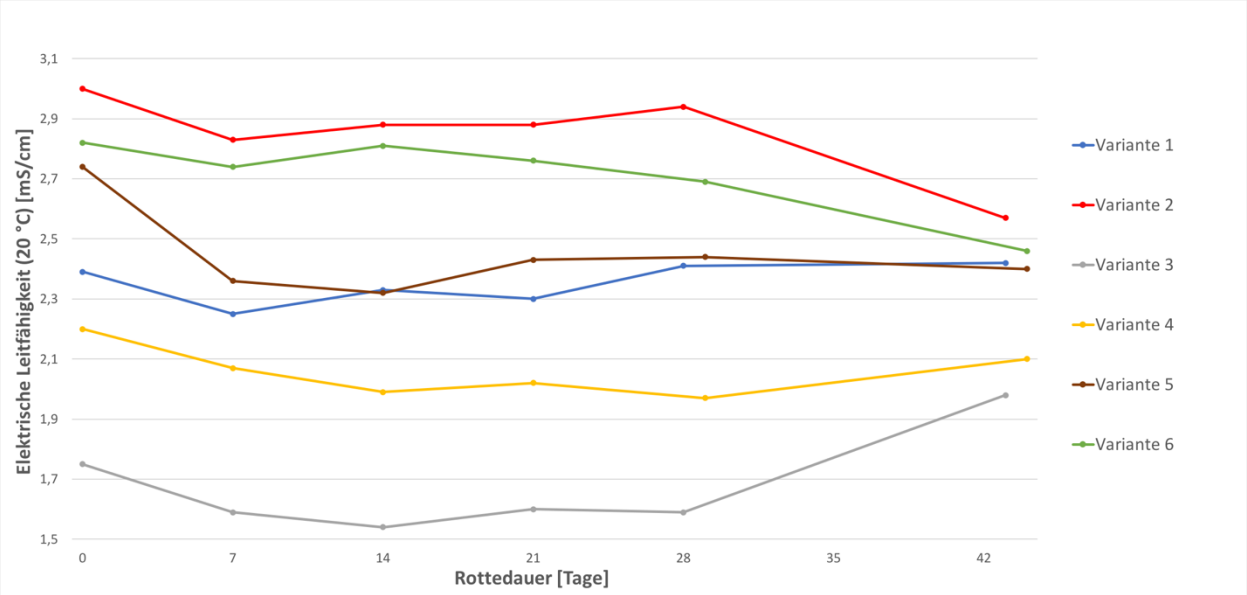

Abbildung 64: Gemittelte Werte der elektrischen Leitfähigkeit (kompensiert auf 20 °C) der sechs Varianten über die gesamte Versuchsdauer

Die gemittelten Werte der Leitfähigkeit liegen in einer Bandbreite von 1,75 mS/cm bei Variante 3 (viel Einstreu) bis zu 3,0 mS/cm bei Variante 2 (wenig Einstreu) am Beginn der Rotte und bei 1,98 mS/cm bei Variante 3 bis zu 2,57 mS/cm bei Variante 2 am Ende der Rotte. Mit Ausnahme von Variante 3 ist bei allen Varianten eine Abnahme der Leitfähigkeit während der Rotte zu beobachten, am meisten bei Variante 2. Dies liegt am Auswaschen von Salzen durch das Sickerwasser. Da bei Variante 3 als einzige Variante kein Sickerwasser aus dem System entfernt wurde (vergleiche Kapitel 5.3) ist dies bei dieser Variante nicht der Fall. Generell sind die Werte am Ende der Rotte für Komposte im für eine Kompostanwendung günstigen Bereich. Sie könnten nicht nur in der Landwirtschaft, sondern auch im Hobbygartenbau oder als Sackware eingesetzt werden, hier liegt der Grenzwert bei 3 mS/cm (BMLFUW, 2001).

5.6 Glühverlust

Die Glühverlust-Ergebnisse als Mittelwerte pro Variante in beiden Versuchsserien dargestellt sind in Abbildung 67 dargestellt.

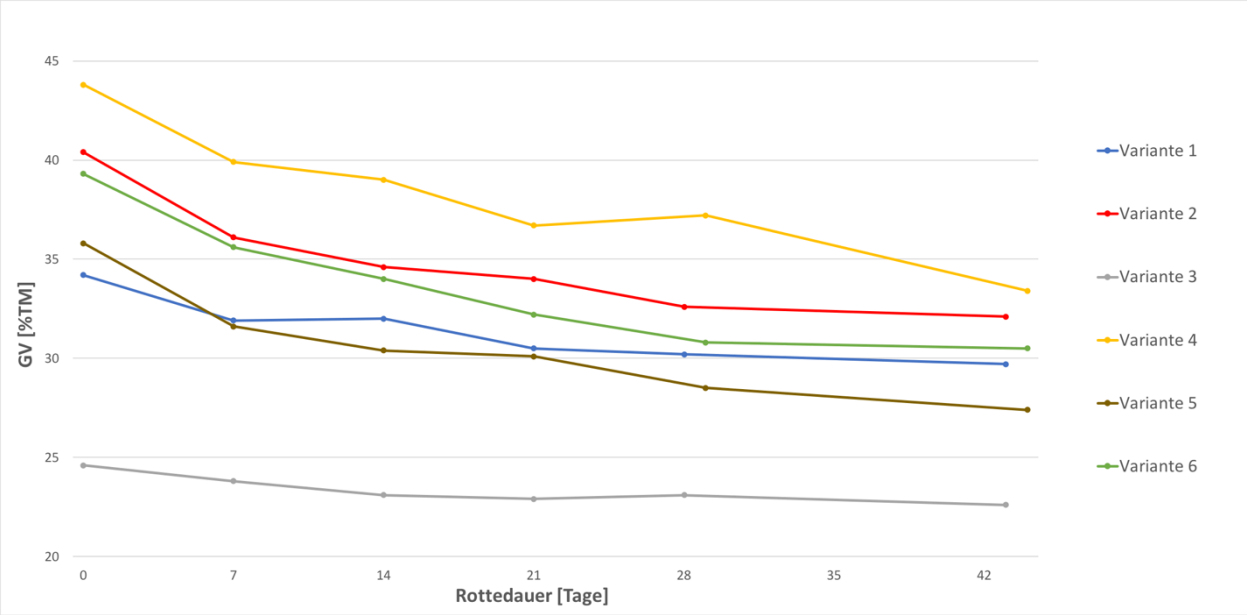

Abbildung 65: Gemittelte Glühverlustwerte aller sechs Varianten über die gesamte Versuchsdauer

Die Werte aller Varianten sind generell als niedrig einzustufen und zeigen deutliche Unterschiede zwischen den Varianten. Variante 4 (Biozumischung) hat mit einem Mittelwert von 39,9 % TM am Beginn der Rotte und mit einem Mittelwert von 33,4 % TM am Versuchsende den jeweils höchsten Wert. Dies ist auf die Zumischung von Bioabfall in dieser Variante zurückzuführen. Als nächstes kommt Variante 2 (wenig Einstreu) mit einem Mittelwert von 36,1 % TM am Versuchsbeginn und 32, 1 % TM am Ende. Das Schlusslicht bildet Variante 3 (wenig Einstreu) mit einem Mittelwert von 23,8 % TM am Versuchsbeginn und von 22,6 % TM am Ende. Die anderen Varianten liegen dazwischen. Die Werte von Variante 6 (Pilzzumischung) liegen geringfügig über den Werten von Variante 1 (normale Mischung) und Variante 5 (Vergleichsvariante). Der Unterschied ist jedoch nicht sehr groß und liegt wahrscheinlich an den doch nicht ganz gleichen Mischungsverhältnissen dieser Varianten (der Einfluss des Pilzes ist vernachlässigbar). Klar ersichtlich ist, dass die Organik bei allen Varianten während des Rotteverlaufs abnimmt. Auch hier hat in beiden Versuchsserien Variante 4 (Biozumischung) mit einer Abnahme von 16 % den höchsten Wert und Variante 3 (viel Einstreu) mit einer Abnahme von 5 % den geringsten (zurückzuführen auf schwer abbaubare Komponenten in der Einstreu). Variante 6 (Pilzzumischung) nimmt mit einer Abnahme von 14 % den zweiten Platz ein, Variante 5 (Vergleichsvariante) mit 13 % den dritten, Variante 2 (wenig Einstreu) mit 11 % den vierten und Variante 1 (normale Mischung) mit 7 % den vorletzten. Betrachtet man die Versuchsserien jedoch getrennt, so hat in Versuchsserie 1 Variante 2 die höchste Abnahme, gefolgt von Variante 1 und Variante 3. In Versuchsserie 2 hat Variante 4 die höchste Abnahme, gefolgt von Variante 6 und Variante 5. Die generell höheren Abbauraten in Versuchsserie 2 im Vergleich zu Serie 1 (vor allem wenn man die Varianten 1, 5 und 6 vergleicht) liegen an der höheren Temperatur in dieser Serie und generell ist eine höhere Mineralisierungsrate bei den Varianten mit mehr biogenem Material zu verzeichnen. Bei Variante 1, Variante 3 und Variante 4 kommt es im Verlauf der Rotte während den einzelnen Probenahmen teilweise zu leichten Zunahmen des Glühverlusts. Dies ist wahrscheinlich auf Materialinhomogenitäten in den Reaktoren zurückzuführen.

5.7 TOC

Die gemittelten TOC Werte pro Variante in beiden Versuchsserien sind in Abbildung 66 dargestellt.

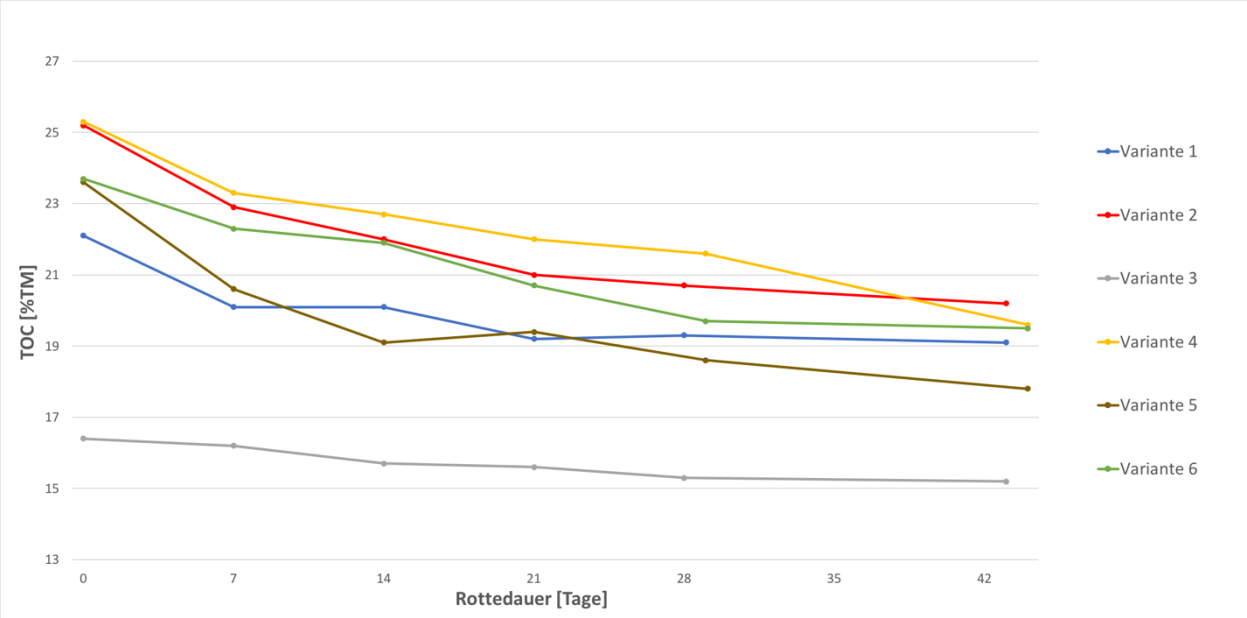

Abbildung 66: Gemittelten TOC Werte der sechs Variante über die gesamte Versuchsdauer

Die TOC Werte verlaufen relativ „parallel“ zu jenen des Glühverlustes und sind auch analog zu interpretieren. Die Werte sind ebenfalls als niedrig einzustufen. Vergleicht man beide Versuchsserien miteinander hat Variante 4 (Biozumischung) am Beginn der Rotte den höchsten Mittelwert mit 23,3 % TM und Variante 3 (viel Einstreu) den niedrigsten mit 16,2 % TM. Die hohen Werte in Variante 4 sind wiederum auf den hohen Anteil an biogenem Material zurückzuführen. Den höchsten Wert am Ende hat jedoch nicht Variante 4, sondern Variante 2 mit einem Wert von 19,6 % TM und den geringsten Wert hat Variante 3 mit 15,2 % TM. Die beiden Varianten liegen jedoch am Beginn sowie am Ende sehr knapp beieinander. Die Varianten 1, 5 und 6 liegen dazwischen. Es ist jedoch ersichtlich, dass die Werte von Variante 1 (normale Mischung) am Beginn ein bisschen niedriger sind als die Werte von Variante 5 (Vergleichsvariante) und Variante 6 (Pilzzumischung). Dies liegt wahrscheinlich ebenfalls an der nicht ganz homogenen Ausgangsmaterialmischung in diesen Varianten. Die höchste Abbaurate in beiden Serien hat Variante 4 mit einem Rückgang von 16 %, gefolgt von Variante 5 mit einem Rückgang von 14 %, Variante 6 mit 13 %, Variante 2 mit 12 %, Variante 3 mit 6 % und das Schlusslicht bildet Variante 1 mit einem Rückgang von 5 %. Auch hier ist gut erkennbar, dass ein hoher Anteil an biogenem Material und eine höhere Temperatur einen positiven Einfluss auf die Abbaurate haben. Der Einfluss der höheren Temperatur ist bei den Varianten 5 und 6 ist im Vergleich zu Variante 1 ersichtlich.

5.8 Stickstoff

Die gemittelten Werte des Gesamtstickstoffs der 6 Varianten über die gesamte Rottedauer zeigt Abbildung 67.

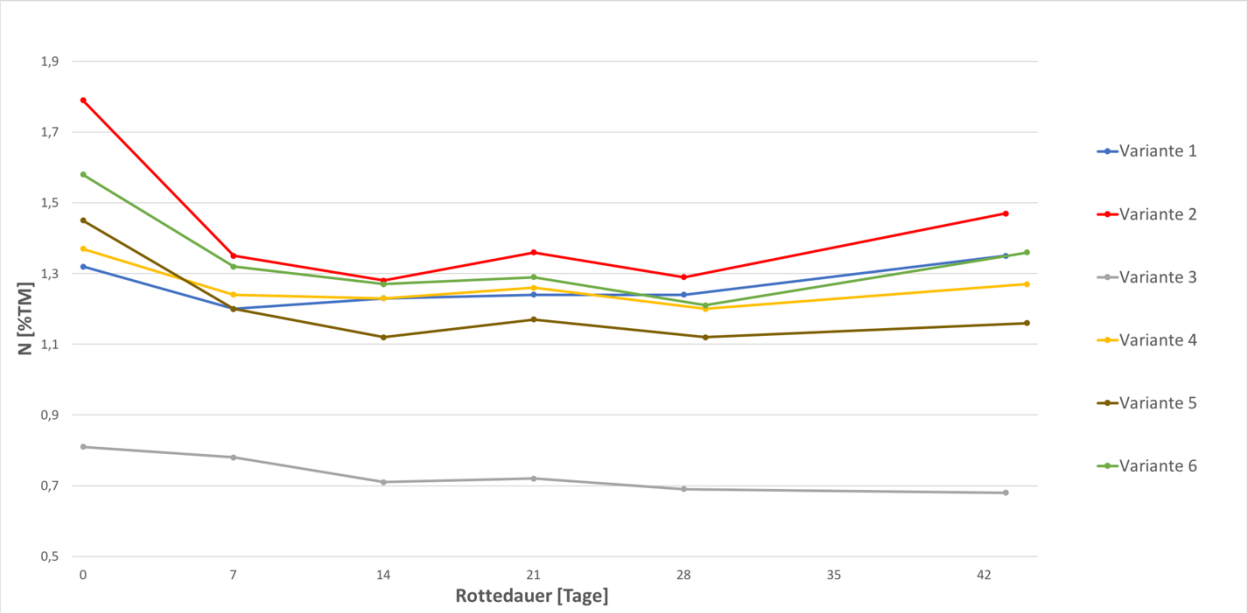

Abbildung 67: Gemittelte Stickstoffwerte der sechs Varianten über die gesamte Versuchsdauer

Die Stickstoffwerte sind mit Ausnahme von Variante 3 (viel Einstreu) eher im oberen Durchschnitt (0,7 bis 1,5 % TM) der Spannweite von 0,6 - 2,3 % TM einzuordnen. Variante 2 (wenig Einstreu) wiest von allen Varianten mit einem Wert von 1,47 % TM am Ende der Rotte den höchsten Stickstoffgehalt auf. Dies lässt sich anhand des hohen Anteils an den Fäkalien, die sehr viel Stickstoff enthalten, erklären. Variante 3 hat mit einem Wert von 0,68 % TM am Ende der Rotte den geringsten Stickstoffanteil. Auch dies ist durch den geringen Fäkalienanteil (bzw. hohen Einstreuanteil) in dieser Variante nachvollziehbar. In Abbildung 63 ist ersichtlich, dass die Stickstoffwerte in der ersten Rottephase bei allen Varianten abgenommen haben. Da alle Varianten bereits am Beginn der Rotte einen pH-Wert über 7 und geringe C/N-Verhältnisse aufwiesen ist dies durch Stickstoffverluste über Ammoniak erklärbar. Es wurde in der Klimakammer zu dieser Rottephase auch der typische Ammoniakgeruch wahrgenommen. Danach stieg der Gesamtstickstoff, wie für die Kompostierung üblich, bei allen Varianten wieder. Nur bei Variante 3 nimmt der Stickstoffgehalt im gesamten Verlauf der Rotte ab. Die Verluste sind jedoch nur sehr gering und daher nicht wirklich ausschlaggebend. Dass hier kein Stickstoff-Anstieg stattfindet, liegt an geringen Kohlenstoffabbau (geringer Fäkalienanteil, daher wenig mikrobiell verfügbare Organik) in dieser Variante (BINNER, 2020).

5.9 C/N–Verhältnis

Die Mittelwerte der C/N-Verhältnisse der 6 Varianten über die gesamte Rottedauer sind in Abbildung 68 dargestellt.

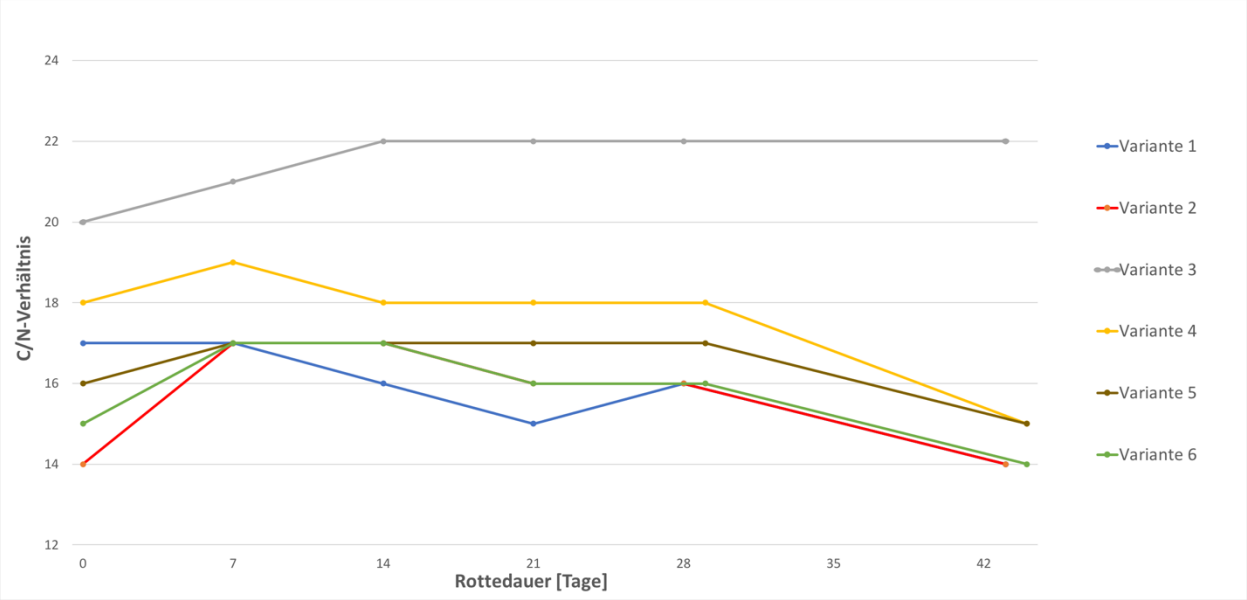

Abbildung 68: Gemittelte Werte der C/N-Verhältnisse der sechse Varianten über die gesamte Versuchsdauer

Wie bereits in Kapitel 3.3.3.5 beschrieben liegt laut BINNER et al. (2004) am Beginn der Rotte ein optimales C/N-Verhältnis vor, wenn die Werte zwischen 20 und 35 liegen. Die C/N-Verhältnisse in den Ausgangsmaterialien der verschiedenen Varianten sind mit Werten zwischen 14 bis 20 daher unter dem optimalen Bereich. Die besten Werte der Ausgangsmaterialien liefert Variante 3 (viel Einstreu) in Versuchsserie 1 mit einem C/N–Verhältnis von 20 am Anfang der Rotte. Zu Beginn der Rotte steigen die C/N-Verhältnisse aufgrund von Stickstoffverlusten leicht an und nehmen dann durch die Aufkonzentration des Stickstoffs (Rotteverlust) im weiteren Verlauf der Rotte wieder ab. Bei den Varianten 2, 4, 5 und 6 zeigt sich dies deutlich. Bei Variante 3 steigt das C/N-Verhältnis jedoch zwischen der zweiten und der dritten Woche abermals leicht an und bleiben dann konstant. Dies ist zu erklären, da auch der Kohlenstoffgehalt zwischen der zweiten und dritten Woche fällt, danach leicht ansteigt und dann relativ konstant bleibt. Auch Variante 1 (normale Mischung) zeigt zwischen der dritten und vierten Woche einen kleinen Sprung nach oben, dies könnte jedoch an der Inhomogenität des Rotteguts (TOC-Wert) liegen.

5.10 Atmungsaktivität AT_4

Die Ergebnisse der Atmungsaktivitätsuntersuchung nach 4 Tagen (AT_4) der Endproben der sechs Varianten beider Versuchsserien sind in Abbildung 69 dargestellt.

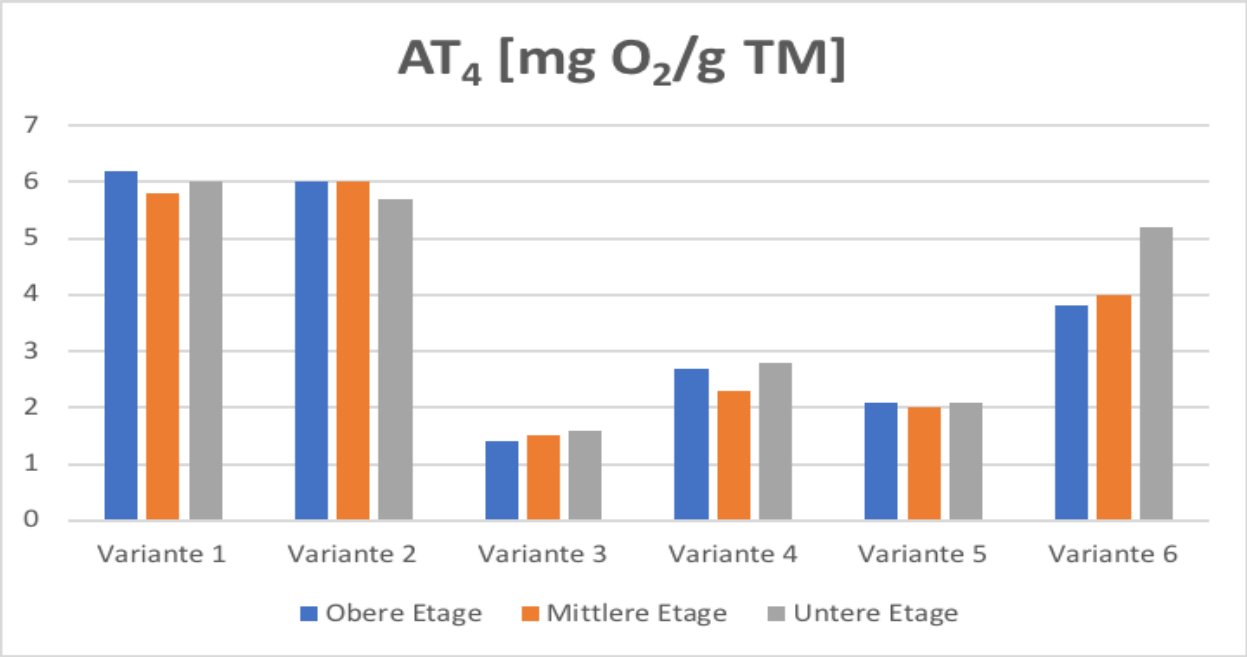

Abbildung 69: Gemittelte AT_4-Werte der Endproben der sechs Varianten beider Versuchsserien

Der AT_4-Mittelwert von 86 am ABF-BOKU untersuchten Bioabfallkomposten liegt bei 4,8 mg O_2/g TM (BINNER, 2020). Die im Labor hergestellten Fäkalienkomposte liegen alle um diesen Wert, können also als ausreichend gut stabilisiert angesehen werden. Variante 3 (viel Einstreu) zeigte die geringste Reaktivität (bzw. beste Stabilisierung), gefolgt von den Varianten 5 (Vergleichsvariante) und Variante 4 (Biozumischung). Variante 6, die sich nur durch Pilzzugabe von Variante 5 unterschiedet, zeigt geringfügig höhere Reaktivität. Die höchste Reaktivität weisen die Varianten 1 (normale Mischung) und Variante 2 (wenig Einstreu) auf. Generell sind jedoch alle Werte als niedrig einzustufen und es ist zu beobachten, dass die Werte in Versuchsserie 1, mit Ausnahme von Variante 3, höher sind als in Versuchsserie 2. Dies könnte an der höheren Temperatur und den dadurch verursachten besseren mikrobiellen Abbau in Versuchsserie 2 liegen. Der Wert von Variante 6 ist mehr als doppelt so hoch wie der Wert von Variante 5. Hier könnte der Pilz einen hemmenden Einfluss auf den mikrobiologischen Abbau in Variante 6 verursacht haben.

5.11 Huminstoffanalyse

Die gemittelten Huminsäure-Werte der Endproben der sechs Varianten beider Versuchsserien sind in Abbildung 70 dargestellt. Die Braunhuminsäuren-Werte der Endproben der einzelnen Reaktoren der sechs Varianten beider Versuchsserien zeigt Abbildung 71.

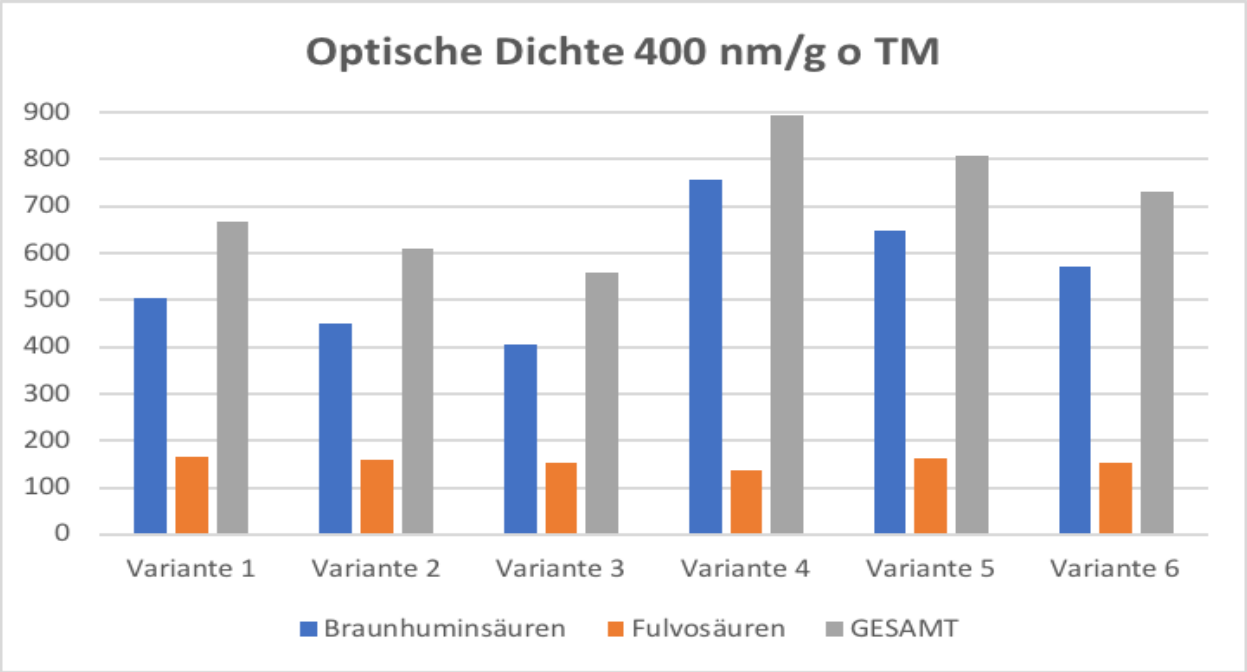

Abbildung 70: Gemittelte Huminsäuren-Werte der Endproben der sechs Varianten beider Versuchsserien

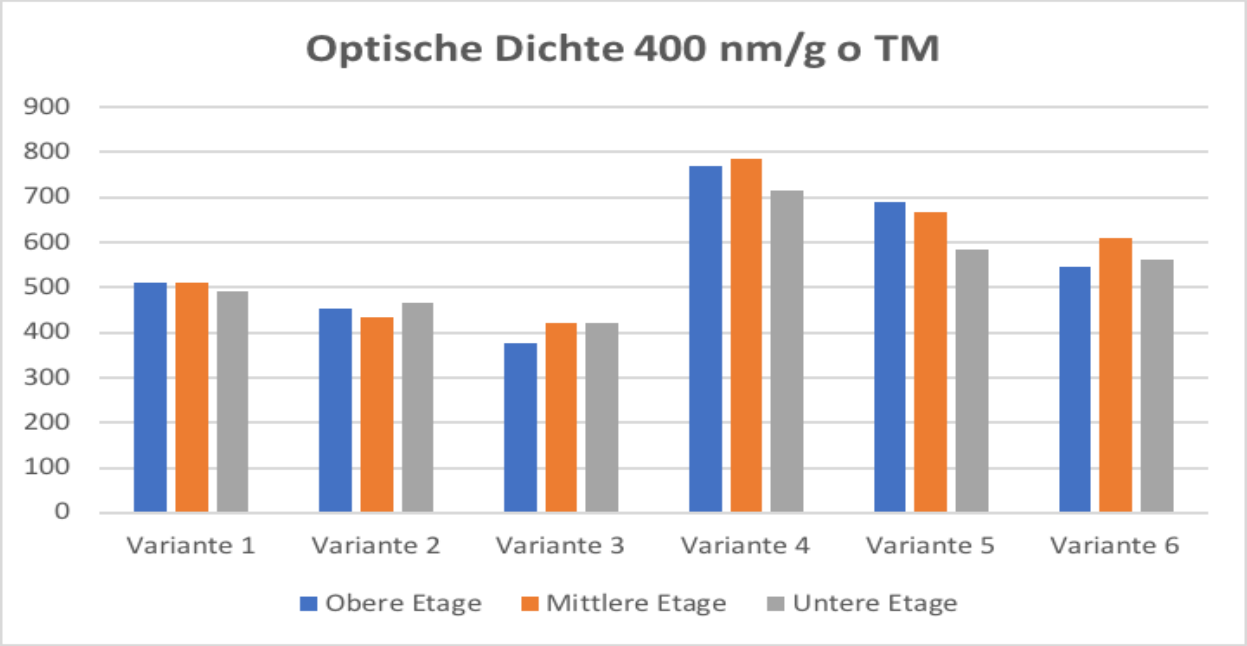

Abbildung 71: Braunhuminsäuren-Werte der der Endproben der einzelnen Reaktoren der sechs Varianten beider Versuchsserien

In Versuchsserie 2 wurden etwas mehr Huminsäuren gebildet. Hier liegt Variante 4 (Biozumischung) mit einem Mittelwert von in Summe 900 OD/g o TM an der Spitze, gefolgt von Variante 5 (Vergleichsvariante) mit einem gemittelten Gesamtwert von 800 OD/g o TM und Variante 6 (Pilzzumischung) mit 730 OD/g o TM. In Versuchsserie 1 hat Variante 1 (normale

Mischung) mit 670 OD/g o TM den höchsten Mittelwert, gefolgt von Variante 2 (wenig Einstreu) mit 600 OD/g o TM und das Schlusslicht bildet Variante 3 (viel Einstreu) mit 560 OD/g o TM. Die Laborrotteversuche bestätigen die aus der Literatur bekannten positiven Effekte von Temperatur (Serie 2) und höherem Anteil an leicht verfügbaren organischen Substanzen (Variante 4 durch Bioabfallzumischung) auf die Huminsäurenbildung. Der Temperatureinfluss ist beim Vergleich der Variante 1 mit Varianten 5 und 6 ersichtlich.

Alle Huminsäurenwerte sind jedoch generell als sehr niedrig einzustufen. Bei 110 am ABF-BOKU untersuchten Bioabfallkomposten (BINNER, 2020) liegt der Mittelwert bei 2.150 OD/g o TM (das Maximum lag bei 4.100 OD/g o TM, das Minimum bei 750 OD/g o TM). Diese sehr geringe Huminsäurenbildung ist einerseits auf die geringe Reaktivität von Fäkalien zurückzuführen (auch Klärschlammkomposte weisen meist geringere Huminsäurenbildung auf). Bei 28 am ABF-BOKU untersuchten Klärschlammkomposten ergab sich ein Bereich zwischen 630 und 2.600 OD/g o TM (Mittelwert 1.650 OD/g o TM).

Andererseits bewirkt die in den Versuchsreaktoren sehr intensive Sauerstoffversorgung ein Forcieren der Mineralisierung, was zu geringerer Huminsäurenbildung führt (siehe Kapitel 3.3.2.2). Bei der großtechnischen offenen Mietenkompostierung findet in der Regel keine derart intensive Mineralisierung statt (BINNER, 2020).

5.12 Mikrobiologische Untersuchungen

5.12.1 Versuchsserie 1

Die mikrobiologische Testuntersuchung von Versuchsserie 1 war nicht auswertbar. Bei der Hauptuntersuchung wurden zur Auswertung der Coliforme und *E. coli* die CCA Platten und für die Enterokokken die KAA Platten verwendet. Sie wurden nach 24 Stunden kontrolliert und es waren schon Kolonien sichtbar, jedoch nur ganz leicht und daher wurden die Platten erst nach 41 Stunden und die CCA Platten nochmals nach 65 Stunden ausgezählt. Die VRB Schalen (auch für die Kultivierung von Coliformen) waren nicht auswertbar, da sie komplett gelb geworden sind und Risse bekommen hatten.

Ein Überblick über die Ergebnisse der mikrobiologischen Hauptuntersuchung von Versuchsserie 1 nach 41 bzw. 65 Stunden Inkubationsdauer (Mittelwerte einer Doppelbestimmung in KBE/g FM) ist in den Tabellen 16 und 17 dargestellt.

Tabelle 16: Ergebnisse der mikrobiologischen Hauptuntersuchung von Versuchsserie 1 nach 41 Stunden Inkubationsdauer (Mittelwerte einer Doppelbestimmung in KBE/g FM)

	Variante 1			**Variante 2**			**Variante 3**		
	R1	**R5**	**R9**	**R2**	**R6**	**R10**	**R4**	**R8**	**R12**
Coliforme	995	> 3.000	> 3.000	70	65	595	< 1	835	1.210
E. coli	170	2.000	2.000	130	185	555	< 1	5	45
Gesamtkeimzahl	1165	> 3.000	> 3.000	200	250	1.150	< 1	840	1.255
Enterokokken	< 1	< 1	750	50	< 1	750	< 1	150	< 1

Tabelle 17: Ergebnisse der mikrobiologischen Hauptuntersuchung von Versuchsserie 1 nach 65 Stunden Inkubationsdauer (Mittelwerte einer Doppelbestimmung in KBE/g FM)

	Variante 1			**Variante 2**			**Variante 3**		
	R1	**R5**	**R9**	**R2**	**R6**	**R10**	**R4**	**R8**	**R12**
Coliforme	> 3.000	> 3.000	> 3.000	2.000	> 3.000	> 3.000	445	1.210	> 3.000
E. coli	> 3.000	> 3.000	> 3.000	> 3.000	> 3.000	> 3.000	205	465	80
Gesamtkeimzahl	> 3.000	> 3.000	> 3.000	> 3.000	> 3.000	> 3.000	650	1.675	> 3.000

Die Ergebnisse der mikrobiologischen Hauptuntersuchung von Versuchsserie 1 zeigen, dass nach 41 Stunden Inkubationsdauer alle Proben bis auf Probe R4 (Variante 3 – viel Einstreu) noch stark mit Coliforme und *E. coli* kontaminiert waren. Am meisten Coliforme Kolonien befanden sich in Variante 1 (normale Mischung) und nicht wie erwartet in Variante 2 (wenig Einstreu). Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass beim Sammeln der Toilettenabfälle ein Teil der Fäkalien für das Mischungsverhältnis mit mehr Fäkalien und wenig Einstreu zur Stabilisierung tiefgefroren wurden, was ebenso zu einer Verringerung der Keime beigetragen haben könnte. Dass sich in Probe R4 keine Coliforme und in R1, R5, R6, R4 und R12 keine Enterokokken befinden ist eher unwahrscheinlich. Generell war die Untersuchung eine Herausforderung, da die Homogenisierung der Proben ein großes Problem darstellte. Ebenso hätten die Enterokokken bei 37 °C inkubiert werden sollen, wurden aber versehentlich bei 44 °C inkubiert, weshalb die Ergebnisse mit Vorsicht betrachtet werden müssen.

Die Coliforme wurden länger als bei der Testuntersuchung inkubiert und nach 65 Stunden nochmals ausgezählt. Dabei konnten dann auch in R4 Kolonien nachgewiesen werden.

Generell zeigt die Untersuchung jedoch deutlich, dass in Variante 3 am wenigsten Kolonien nachgewiesen wurden. Dies lässt sich aus dem geringen Anteil der Fäkalien in dieser Variante erklären.

Ein paar inkubierte Petrischalen aus der mikrobiologischen Hauptuntersuchung von Versuchsserie 1 nach 41 sowie 65 Stunden Inkubationsdauer sind in den Abbildungen 72 bis 75 dargestellt. Einen Überblick über die Anordnung der Petrischalen auf den Abbildungen 72 bis 74 gibt Tabelle 18.

Tabelle 18: Anreihung der Petrischalen auf den Abbildungen 72 - 74

R1 Probe A	R1 Probe B	R2 Probe A	R2 Probe B	R4 Probe A	R4 Probe B
R5 Probe A	R5 Probe B	R6 Probe A	R6 Probe B	R8 Probe A	R8 Probe B
R9 Probe A	R9 Probe B	R10 Probe A	R10 Probe B	R12 Probe A	R12 Probe B

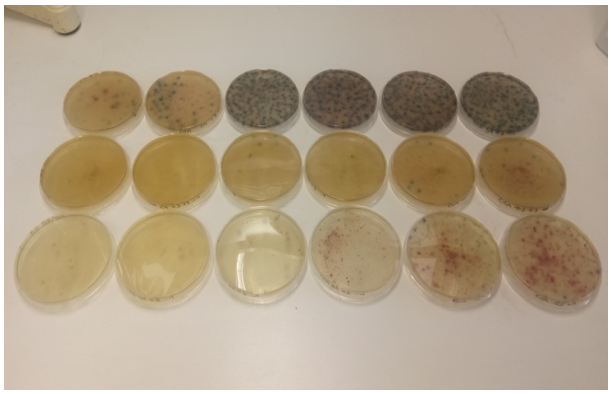

Abbildung 72: CCA - 1 Verdünnung nach 41 Stunden Inkubationsdauer bei der mikrobiologischen Hauptuntersuchung von Versuchsserie 1

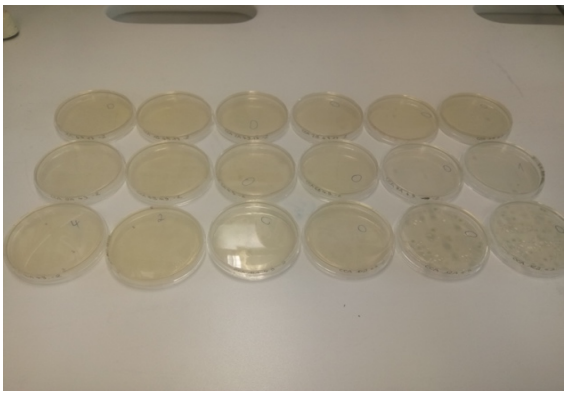

Abbildung 73: CCA - 2 Verdünnung nach 41 Stunden Inkubationsdauer bei der mikrobiologischen Hauptuntersuchung von Versuchsserie 1

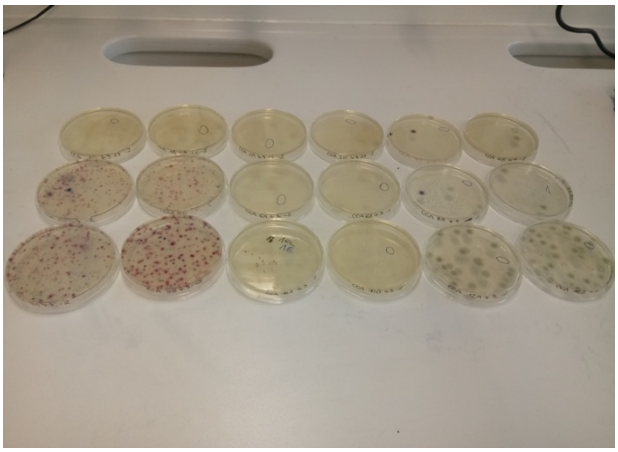

Abbildung 75: CCA - 2 Verdünnung nach 65 Stunden Inkubationsdauer bei der mikrobiologischen Hauptuntersuchung von Versuchsserie 1

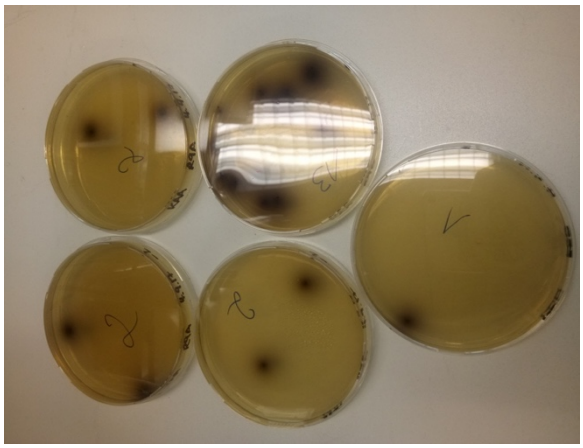

Abbildung 74: Einige KAA Platten (- 2 Verdünnung) nach 41 Stunden Inkubationsdauer bei der mikrobiologischen Hauptuntersuchung von Versuchsserie 1

5.12.2 Versuchsserie 2

Bei der Testuntersuchung, wie auch bei der Hauptuntersuchung, konnten nach 48 Stunden Inkubationszeit auf keinen Platten Kolonien nachgewiesen werden. Daher wurden die Schalen bei der Hauptuntersuchung länger inkubiert. Nach 72 Stunden sind dann auf den CCA (Coliforme und *E. coli*) und auf den KAA (Enterokokken) Platten Kolonien gewachsen. Die VRB (Coliforme) und SBA (Enterokokken) Platten waren nicht auswertbar.

Einen Überblick über die Ergebnisse der mikrobiologischen Hauptuntersuchung von Versuchsserie 2 nach 72 Stunden Inkubationsdauer (Mittelwerte einer Doppelbestimmung in KBE/g FM) gibt Tabelle 19.

Tabelle 19: Ergebnisse der mikrobiologischen Hauptuntersuchungen von Versuchsserie 2 nach 72 Stunden Inkubationsdauer (Mittelwerte einer Doppelbestimmung in KBE/g FM)

	Variante 4			**Variante 5**			**Variante 6**		
	R1	**R5**	**R9**	**R2**	**R6**	**R10**	**R4**	**R8**	**R12**
Coliforme	> 3.000	> 3.000	> 3.000	470	265	20	240	305	85
E. coli	5	25	50	40	< 1	150	15	< 1	< 1
Gesamtkeimzahl	> 3.000	> 3.000	> 3.000	510	265	170	255	305	85
Enterokokken	300	400	300	500	850	700	< 1	150	100

Die Ergebnisse der mikrobiologischen Hauptuntersuchung von Versuchsserie 2 zeigen, dass nach 72 Stunden Inkubationsdauer in allen Proben Keime nachgewiesen wurden. Am meisten Coliforme wurden in Variante 4 (Biozumischung) gefunden. Das ist unerwartet, denn in diesen Reaktoren herrschten die höchsten Temperaturen. Gegenüber den Ergebnissen nach 65 Stunden Inkubationsdauer von Versuchsserie 1 sind die Koloniezahlen der Coliforme in Versuchsserie 2 jedoch um einiges geringer. Vor allem wurden deutlich weniger *E. Coli* nachgewiesen (in R6, R8 und R12 sogar unter der Nachweisgrenze).

Auch diese Ergebnisse sind mit Vorsicht zu genießen. Die Untersuchung funktionierte zwar deutlich besser als bei Versuchsserie 1, aber es kann trotzdem sein, dass die Homogenisierung noch immer nicht ganz funktioniert hat. Auch der Mykorrhiza Pilz könnte laut den Ergebnissen einen positiven Einfluss auf den Abbau der Keime haben. Jedoch sind für eine Bestätigung hierfür noch weitere Untersuchungen notwendig. Bei den Enterokokken wurden außer in R4 (Variante 6 – Pilzzumischung) nach 72 Stunden Inkubationsdauer sehr hohe Koloniezahlen nachgewiesen. Gesichert ist der positive Einfluss der höheren Temperatur bei Variante 5 (aus dem Vergleich mit Variante 1).

Ein paar inkubierten Platten aus der mikrobiologischen Hauptuntersuchung von Versuchsserie 2 nach 72 Stunden Inkubationsdauer sind in den Abbildungen 76 bis 77 dargestellt. Einen Überblick über die Position der Petrischalen auf den Abbildungen bekommt man durch Tabelle 20.

Tabelle 20: Anreihung der Petrischalen auf den Abbildungen 76 – 77

R1 Probe A	R1 Probe B	R2 Probe A	R2 Probe B	R4 Probe A	R4 Probe B
R5 Probe A	R5 Probe B	R6 Probe A	R6 Probe B	R8 Probe A	R8 Probe B
R9 Probe A	R9 Probe B	R10 Probe A	R10 Probe B	R12 Probe A	R12 Probe B

Abbildung 77: CCA - 1 Verdünnung nach 72 Stunden Inkubationsdauer bei der mikrobiologischen Hauptuntersuchung von Versuchsserie 2

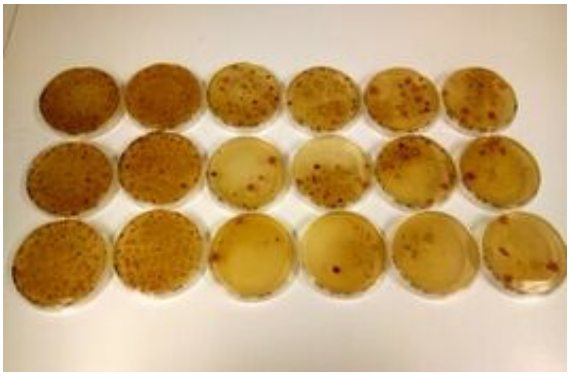

Abbildung 76: KAA - 1 Verdünnung nach 72 Stunden Inkubationsdauer bei der mikrobiologischen Hauptuntersuchung von Versuchsserie 2

6. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Ziel dieser Arbeit war es das derzeit von der Firma *wohnwagon* verwendete Trockentoiletten-System hinsichtlich Hygiene- und Kompostparameter zu untersuchen und eventuelle Optimierungsmöglichkeiten sowie Einsatzgebiete für den entstandenen Kompost zu finden. Im Betrieb der Toiletten wird als Einstreu eine Mischung aus Kompost, Pflanzenkohle, Biofasern und Steinmehl verwendet. Es wurden Toilettenabfälle gesammelt und in zwei Durchgängen in einer Laborrotteanlage kompostiert und begleitend untersucht. Im ersten Durchgang wurden die Auswirkungen unterschiedlicher Mischungsverhältnisse (Fäklien zu Einstreu) auf den Rotteprozess und die Endproduktqualität getestet. Weiters wurde im zweiten Durchgang untersucht welchen Einfluss es auf den Hygienisierungs- und Rotteprozess hat, wenn neben Toilettenabfällen und Einstreu, auch biogenes Material oder ein Mykorrhiza Pilz, welcher beim Abbau von pathogenen Keimen helfen soll, beigemengt wird.

Da es keine Normen für die Untersuchung für Fäkalkomposte gibt, wurden die mikrobiologischen Untersuchungen für die Beurteilung der Hygieneparameter in Anlehnung an die Normen ÖNORM EN ISO 9308-1 (2017) für Coliforme und ÖNORM EN ISO 7899-1 (2000) sowie ÖNORM EN ISO 7899-2 (2000) für Enterokokken durchgeführt. Erstere fordert für Coliforme eine Untersuchung mittels CCA Agar und eine maximale Inkubationszeit von 21 - 24 Stunden bei 36 ± 2 °C. ÖNORM EN ISO 7899-1 (2000) ist eine Norm für die Untersuchung von Enterokokken nach dem MPN Verfahren. Das Verfahren hat jedoch nicht gut funktioniert und daher sind dessen Ergebnisse in dieser Arbeit nicht angeführt. ÖNORM EN ISO 7899-2 (2000) gibt für Enterokokken eine Untersuchung mittels SBA Agar und eine Inkubationszeit von 44 ± 4 Stunden bei 36 ± 2 °C an.

Um alle Anforderungen der Kompostverordnung hinsichtlich Hygienisierung zu erfüllen, hätten die Proben noch auf Salmonellen, Listerien und *Campolybacter* untersucht werden müssen. Dies war jedoch aus Kosten- und Zeitgründen nicht möglich.

Aufgrund der Untersuchungen können für die drei Fragestellungen der Arbeit folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

Fragestellung 1: *Wie können die Einstreumenge und die Kompostbedingungen derart optimiert werden, dass mit einer möglichst geringen Menge des Einstreumaterials eine gute und hygienisch unbedenkliche Kompostqualität erreicht werden kann?*

In Versuchsserie 1, wo die Fäkalien nur mit der Einstreu kompostiert wurden, herrschte bei Variante 1 (normale Mischung) bei der Kompostierung die höchste Temperatur. Auch bei der Huminsäurebildung schnitt diese Variante etwas besser ab als die anderen beiden. Der Wassergehalt war in Variante 3 (viel Einstreu) teilweise zu gering und in Variante 2 (wenig Einstreu) sehr hoch. Die Ergebnisse der anderen Kompostparameter waren in allen drei Varianten ähnlich.

Bei den mikrobiologischen Untersuchungen wurden bereits nach 24 Stunden Inkubationsdauer in allen Varianten erste Kolonien nachgewiesen. Daher ist bei dieser Versuchsserie mit Sicherheit bei keinem Mischungsverhältnis eine ausreichende Hygienisierung erfolgt. Dies ist auch nicht überraschend, da auch während der Rotte die laut Kompostverordnung (BMLFUW, 2001) für die Hygienisierung erforderlichen Temperaturen (siehe Kapitel 3.3.1.2) nicht erreicht wurden. Generell schnitt in dieser Versuchsserie Variante 3 (viel Einstreu) bezüglich Hygieniserung am besten ab. Dies lässt sich aus dem geringen Anteil der Fäkalien in dieser Variante erklären. Am meisten Coliforme Kolonien befanden sich in Variante 1 (normale Mischung) und nicht wie erwartet in Variante 2 (wenig Einstreu). Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass beim Sammeln der Toilettenabfälle ein Teil der Fäkalien für das Mischungsverhältnis mit mehr Fäkalien und wenig Einstreu zur Stabilisierung tiefgefroren wurden, was ebenso zu einer Verringerung der Keime beigetragen haben könnte.

Wenn man nur Fäkalien und Einstreu kompostiert, bleibt somit das vom Hersteller empfohlene Mischungsverhältnis von 50% Fäkalien und 50 % empfehlenswert. Bei zu viel Einstreu war der Wassergehalt nämlich teilweise zu niedrig und bei zu wenig sehr hoch. Jedoch ist es generell nicht empfehlenswert, die Fäkalien nur mit der Einstreu zu kompostieren, da hier keine Hygieniserung gewährleistet werden kann.

Die Kompostierung kann optimiert werden, wenn zusätzlich noch biogenes Material und/oder ein Mykorrhiza Pilz unter die Mischung gemischt wird (siehe Fragestellung 2). Am besten hat sich die Mischung von Variante 4 – 25% Fäkalien, 25 Einstreu und 50 % biogenes Material bewährt.

Auch kann die Hygienisierung (LEHNER, 2013) und der Aufbau von Huminstoffen (BINNER, 2020) optimiert werden, wenn der Kompost nach der Hauptrottephase noch ein paar Wochen zur Nachrotte liegen gelassen wird.

Fragestellung 2: *Welchen Einfluss hat es auf den Hygienisierungs- und Rotteprozess, wenn neben Toilettenabfällen und Einstreu auch biogenes Material oder ein Mykorrhiza Pilz verwendet wird?*

Die Arbeit zeigt eindeutig, dass bei der Kompostierung durch die Zugabe von biogenem Material in Versuchsserie 2 während der Rotte weitaus höhere Temperaturen herrschten. Dies deutet auf eine höhere mikrobielle Aktivität in dieser Variante hin, was auf die leicht verfügbaren organischen Verbindungen im biogenen Material zurückzuführen ist. Die in der Kompostverordnung (BMLFUW, 2001) für die Hygienisierung geforderten Temperaturen (siehe Kapitel 3.3.1.2) wurden in allen Reaktoren erreicht.

Auch die CO_2-Konzentrationen während der Rotte waren weitaus höhere als in Versuchsserie 1, was ebenso auf eine höhere mikrobielle Aktivität in dieser Variante deutet. Die Werte waren in Variante 4 (Biozumischung) am höchsten und in Variante 6 (Pilzzumischung) am zweithöchsten. Dies könnte auf einen positiven Einfluss des Pilzes auf den Rotteprozess deuten.

Bezüglich mikrobiologischer Parameter wurden in Versuchsserie 2 erst nach 72 Stunden Inkubationsdauer Keime nachgewiesen. Die Norm fordert eine maximale Inkubationszeit von 48 Stunden und daher wäre hier rein theoretisch, auf die untersuchten Parameter Coliforme, *E. coli* und Enterokokken bezogen, in allen Reaktoren die Hygieniserung erfolgt.

Wenn man die Keimzahlen nach 72 Stunden Inkubationsdauer von Versuchsserie 2 mit denen nach 65 Stunden Inkubationsdauer von Versuchsserie 1 vergleicht, ist eindeutig zu erkennen, dass die Koloniezahlen der Coliforme in Versuchsserie 2 um einiges geringer sind. Vor allem wurden deutlich weniger *E. Coli* nachgewiesen - in R6 (Vergleichsvariante), R8 und R12 (beide Pilzzumischung) sogar unter der Nachweisgrenze). Daher könnte der Mykorrhiza Pilz einen positiven Einfluss auf den Abbau der Keime haben.

Jedoch sind die Ergebnisse hinsichtlich mikrobiologischer Parameter mit Vorsicht zu betrachten, da bei den mikrobiologischen Untersuchungen einige Probleme auftraten. Beispielsweise war das Homogenisieren und Eluieren der Proben mittels Laborflasche und Stomacherbeutel eine Herausforderung. Auch wurde bei der Untersuchung für Enterokokken ein KAA, und nicht, wie in der Norm gefordert, ein SBA verwendet. Die Untersuchung mit dem SBA hat aufgrund der wahrscheinlich zu hohen Begleitflora nicht funktioniert. Bei Komposten ist generell eine viel größere Begleitflora als bei Wasserproben vorhanden und diese könnte auch das Wachstum der Keime verzögert bzw. unterdrückt haben. Das würde erklären warum beispielsweise auch in Versuchsserie 2 nach 72 Stunden Inkubationszeit Keime nachgewiesen wurden. Komischerweise wurden dann auch in Variante 4 (Biozumischung), in der auch die höchsten Temperaturen

herrschten, die höchsten Keimzahlen gemessen. Variante 6 (Pilzzumischung) wies die niedrigste Keimzahl auf.

Bezüglich der Kompostparameter schnitt Versuchsserie 2 im Bezug auf die Huminstoffbildung besser ab als Versuchsserie 1, vor allem Variante 4 (Biozumischung). Jedoch waren die Werte im Vergleich mit anderen Komposten als eher niedrig einzustufen. Die restlichen Kompostparameter waren sehr ähnlich. Der Wassergehalt lag in allen Varianten (bis auf Variante 3 mit viel Einstreu) am Beginn der Rotte im Normalbereich und konnte auch über die gesamte Rottedauer im Normalbereich gehalten werden. Die pH-Werte waren zu Beginn der Rotte bei allen Varianten etwas höher als bei normalen Komposten. Diese liegen hier normalerweise im leicht sauren Milieu. Die Fäkalien und die Einstreu puffern die Säurebildung jedoch etwas ab. Die Leitfähigkeitswerte waren bei allen Varianten im Normalbereich. Die Ergebnisse der GV- und TOC-Analysen waren als eher niedrig einzustufen und die N-Werte aufgrund des hohen Anteils an Fäkalien als eher hoch (außer in Variante 3 mit viel Einstreu). Die C/N-Verhältnisse und die Ergebnisse der AT_4-Untersuchung waren in allen Varianten im Normalbereich.

Fragestellung 3: *Welche Einsatzmöglichkeiten gibt es für den entstandenen Kompost?*

Für die Komposte gäbe es theoretisch einige Einsatzgebiete. Die Komposte aus Versuchsserie 1 sowie 2 könnten ohne Probleme für den Einsatz als Biofiltermaterial verwendet werden. Hier gibt es nämlich laut Kompostverordnung (BMLFUW, 2001) keine Hygienisierungs-Anforderungen.

Für den Einsatz als Sackware und für die Erhaltung einer vegetationsfähigen Oberbodenschicht bei Sportstätten und bei Freizeitanlagen einschließlich Kinderspielplätzen dürfen in 50 g Probe weder Salmonellen, noch *E. coli*, *Campolybacter* oder Listerien nachgewiesen werden. War die Hygieniserung in Versuchsserie 2 jedoch wirklich erfolgreich, könnten die entstandenen Komposte rein theoretisch auch hier eingesetzt werden – vorausgesetzt sie enthalten keine Salmonellen, denn das wurde nicht untersucht.

In der Landwirtschaft gibt es keine Anforderungen für *Campylobacter* und Listerien. Werden *E. coli* nachgewiesen, müssen diese qualitativ ausgewiesen und bewertet werden. Danach werden entsprechende Anwendungsempfehlungen gegeben. Hier ist zum Beispiel beim Einsatz im Ackerbau für Futtergewinnung eine Wartefrist vor der Nutzung vorgeschrieben. Salmonellen dürfen in 50 g Probe nicht vorhanden sein. Rein theoretisch könnten also die Komposte aus beiden Versuchsserien zum Beispiel zur Futtermittelproduktion eingesetzt werden, wenn sie keine Salmonellen enthalten.

Für die Herstellung und Erhaltung einer vegetationsfähigen Oberbodenschicht im Landschaftsbau allgemein und als Rekultivierungsschicht auf Deponien gibt es keine Anforderungen für *E. coli*, *Campylobacter* und Listerien. Es dürfen jedoch in 50 g Probe keine Salmonellen nachgewiesen werden. Das heißt alle Komposte könnten auch hier (nach einem negativen Nachweis von Salmonellen) eingesetzt werden.

7. Verzeichnisse

7.1 Literaturverzeichnis

AMLINGER, F., PEYR, S. (2003): Umweltrelevanz der dezentralen Kompostierung - klimarelevante Gasemissionen, flüssige Emissionen, Massenbilanz, Hygienisierungsleistung, vorläufiger Endbericht

AMLINGER, F., MÜSKEN, U., CUHLS, J., PEYR., C., CLEMENS, S. (2005a): Stand der Technik der Kompostierung – Richtlinie. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Wien

AMLINGER, F., PEYR, S., HILDEBRANDT, U., MÜSKEN, J., CUHLS, C., CLEMENS, J. (2005b): Stand der Technik der Kompostierung – Grundlagenstudie. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien

BERGER, W., LORENZ-LADENER, C. (2008): Kompost-Toiletten Sanitärtechnik ohne Wasser, Ökobuch Verlag, Staufen bei Freiburg

BILITEWSKI, B., HÄRDTLE, G. (2013): Abfallwirtschaft: Handbuch für die Praxis und Lehre. 4. Auflage. Springer

BINNER, E. (2020): Persönliche Mitteilung

BINNER, E. (2012): Persönliche Mitteilung zit. bei LEHNER (2013)

BINNER, E., LECHNER, P., SMIDT, E. (2004): Biologische Behandlung. In: Lechner, P. (Hrsg.), Kommunale Abfallentsorgung. Facultas Verlag, Wien. S. 137- 194

BMLFUW (2001): BGBl. II Nr. 292/2001 - Verordnung über die Qualitätsanforderungen an Komposte aus Abfällen (Kompostverordnung) Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Wien

HOCHWARTER, C. (2017): Mikrobiologische Untersuchung des Komposttoilettenbetriebes. Masterarbeit am Institut für Siedlungswasserbau, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz, Wasservorsorge, Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt, Universität für Bodenkultur Wien

HUBER-HUMER, M., LECHNER, P. (2018): VO Abfallwirtschaft und Abfallentsorgung - Aerobe Behandlung - Kompostierung I (813.101). Universität für Bodenkultur, Wien

KÖRNER, I. (2009): Stickstoffhaushalt bei der Kompostierung: Bilanzen, Gehalte, Umsetzungs- und Austragsprozesse. Verlag Abfall aktuell, Stuttgart

KROGMANN, U. (1994): Kompostierung: Grundlagen zur Einsammlung und Behandlung von Bioabfällen unterschiedlicher Zusammensetzung. Economia Verlag, Bonn

LECHNER, P. (Hg.) (2004): Kommunale Abfallentsorgung, Facultas Verlags- und Buchhandels AG, Wien

LECHNER, P., LINZNER, R., MOSTBAUER P., BINNER E., SMIDT E. (2005): Klimarelevanz der Kompostierung unter Berücksichtigung der Verfahrenstechnik und Kompostanwendung (KliKo), Endbericht, Universität für Bodenkultur, Wien

LECHNER, P., SMIDT, E., BINNER, E. EBNER, T. (2008): Huminstoffe als Qualitätsparameter für Komposte und zur verfahrenstechnischen Optimierung von Kompostanlagen, Universität für Bodenkultur, Wien

LEHNER, A. (2013): Optimierung von Trockentoiletten für den Einsatz bei alpinen Objekten. Masterarbeit am Institut für Siedlungswasserbau, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz, Wasservorsorge, Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt, Universität für Bodenkultur Wien

LINZNER, R., MOSTBAUER, P., BINNER, E., SMIDT, E. (2005): Klimarelevanz der Kompostierung unter Berücksichtigung der Verfahrenstechnik und Kompostanwendung (KliKo). Wien. Endbericht im Auftrag der MA 48

NAUDASCHER, I. (2001): Kompostierung menschlicher Ausscheidungen durch Verwendung biologischer Trockentoiletten – mit besonderer Berücksichtigun des Kleingartenbereiches. Dissertation am Institut f. Siedlungswasserwirtschaft der Universität Karlsruhe. Schriftenreihe des ISWW Band 100, Karlsruhe

ÖNORM EN ISO 7899-1(2000): Wasserbeschaffenheit - Nachweis und Zählung von intestinalen Enterokokken - Teil 1: Miniaturisiertes Verfahren (MPN-Verfahren) für Oberflächenwasser und Abwasser; Österreichisches Normungsinstiut, Wien

ÖNORM EN ISO 7899-2 (2000): Wasserbeschaffenheit - Nachweis und Zählung von intestinalen Enterokokken - Teil 2: Membranfiltrationsverfahren; Österreichisches Normungsinstitut, Wien

ÖNORM EN ISO 9308-1 (2017): Wasserbeschaffenheit - Zählung von Escherichia coli und coliformen Bakterien - Teil 1: Membranfiltrationsverfahren für Wässer mit niedriger Begleitflora; Österreichisches Normungsinstitut, Wien

ÖNORM S 2204 (2016): Kompost - Hygieneanforderungen - Escherichia coli, Salmonella sp., Listeria sp., Campylobacter sp. - Probenahme, Untersuchungsmethoden und Ergebnisdarstellung; Österreichisches Normungsinstiut, Wien

RAUSCHER, P. (2017): Einsatz eines FTIR-Monitorings zur Überwachung des Abbaus von biologisch abbaubaren Kunststoffen. Masterarbeit am Institut für Abfallwirtschaft, Department für Wasser, Atmosphäre und Umwelt, Universität für Bodenkultur, Wien

SCHNEIDER, E. (2014): Mikroorganismen als Symbionten und Antagonisten, in FUCHS G. (Hg.): Allgemeine Mikrobiologie; S. 638-683, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York

SCHWAIGHOFER, C. (2017): Betriebsempfehlung für Komposttoiletten in Extremlagen. Masterarbeit am Institut für Siedlungswasserbau, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz, Wasservorsorge, Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt, Universität für Bodenkultur Wien

SONNENBERG, H. (2002): Mechanische Aufbereitung von Einstreu-Material für die Tierhaltung zur Verbesserung der Qualität. Universität Kassel, Kassel

STARKL, M., BINNER, E., FÜRHACKER, M., HOLUBAR, P., KOECK, S., LENZ, K., MASCHER, F., ORNETZEDER, M., POLLAK, M., HABERL, R. (2005): Nachhaltige Strategien der

Abwasserentsorgung im ländlichen Raum - SUS-SAN, Endbericht an das Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien

WAGNER, A., ILLMER, P. (2004): Kompostierung – neue Betrachtung einer alten Technik. Bericht des naturwissenschaftlichen-medizinischen Vereins Innsbruck 91, S. 293-321

WARNECKE, C. (2008): Stoffliche Nutzung von Baumrinde, Seite 1-2, Vdm Verlag Dr. Müller

WEBER, H. (Hg.) (1997): Wörterbuch der Mikrobiologie, Gustav Fischer Verlag, Jena

WURZER, C. (2016): Auswirkungen von Pflanzenkohle auf die N_2O-Emissionen während der Kompostierung. Masterarbeit am Institut für Abfallwirtschaft, Department für Wasser, Atmosphäre und Umwelt, Universität für Bodenkultur, Wien

ZUNABOVIC-PICHLER, M. (2013): Persönliche Mitteilung zit. bei HOCHWARTER (2017)

ZUNABOVIC-PICHLER, M., LINDNER, G., HOCHWARTER, C., WIESSENBACHER, N. (2015): Hygieneuntersuchungen bei der Fäkalkompostierung. Universität für Bodenkultur Wien, Wiener Mitteilungen, Band 238, S. I1-I17

7.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wohnwagon Quelle: wohnwagon.at 3
Abbildung 2: Wohnwagon mit Pool Quelle: wohnwagon.at 3
Abbildung 3: Badezimmer im Wohnwagon Quelle: wohnwagon.at 3
Abbildung 4: Trockentoilette im Wohnwagon Quelle: wohnwagon.at 3
Abbildung 5: Inneneinrichtung im Wohnwagon Quelle: wohnwagon.at 3
Abbildung 6: Aufbau einer Trockentoilette mit biologischem Abbau (LEHNER, 2013) 4
Abbildung 7: Systemvarianten von Trockentoiletten (LEHNER, 2013) 5
Abbildung 8: Trenneinsatz für Trockentoiletten Quelle: separett.com 6
Abbildung 9: Trenneinsatz für Trockentoiletten mit verschließbarer Klappe Quelle: separett.com 6
Abbildung 10: Rotteverlauf der Kompostierung (HUBER-HUMER und LECHNER, 2018) 7
Abbildung 11: Sonnenerde Bio Toilettenstreu 13
Abbildung 12: Vortrag über Trockentoiletten der Firma Wohnwagon an der BOKU 18
Abbildung 13: Beschilderung der Trockentoilette an der BOKU 18
Abbildung 14: Entleerung der Trockentoilette 18
Abbildung 15: Vakuumierte Probe 19
Abbildung 16: Vakuumierte Probe in verschließbarem Behälter 19
Abbildung 17: Trockentoilette beim Wohnprojekt Hasendorf 19
Abbildung 18: Klimakammer mit leeren Reaktoren 20
Abbildung 19: Klimakammer mit gefüllten Reaktoren 20
Abbildung 20: Rottereaktor (RAUSCHER, 2017) 20
Abbildung 21: gefüllter Reaktor in der Klimakammer 20
Abbildung 22: Schematischer Aufbau der ABF-Rotteversuchsanlage (RAUSCHER, 2017) 21
Abbildung 23: Variante 1 (normales Mischungsverhältnis) 22
Abbildung 24: Variante 2 (wenig Einstreu) 22
Abbildung 25: Variante 3 (viel Einstreu) 22
Abbildung 26: Variante 4 (Zumischung von biogenem Material) 25
Abbildung 27: Variante 5 (Vergleichsvariante aus Serie 1) 25
Abbildung 28: Variante 6 (Pilzmischung) 25
Abbildung 29: frische Laborproben 26
Abbildung 30: Probe nach Mahldurchgang mit 10 mm Sieb 27
Abbildung 31: Probe nach Mahldurchgang mit 4 mm Sieb 27
Abbildung 32: Probe nach Mahldurchgang mit 0,5 mm Sieb 27
Abbildung 33: Probe nach Mahldurchgang mit der Zentrifugalmühle 27
Abbildung 34: Vorzerkleinerung der Probe 27
Abbildung 35: Probe vor dem Mahldurchgang mit der Scheibenschwingmühle 27

Abbildung 36: Probe nach dem Mahldurchgang mit der Scheibenschwingmühle 27
Abbildung 37: Coliforme Kolonien auf CCA 31
Abbildung 38: *E. Coli* Kolonien auf CCA 31
Abbildung 39: Enterokokken Kolonien auf VRB 31
Abbildung 40: Enterokokken Kolonien auf KAA 31
Abbildung 41: Coliforme Kolonien auf SBA 31
Abbildung 42: Probenahme mit Stomacherbeutel ohne Filter bei der Testuntersuchung 32
Abbildung 43: Probenahme mit Stomacherbeutel ohne Filter bei der Testuntersuchung 32
Abbildung 44: Gesmashte Probe in Stomacherbeutel 33
Abbildung 45: Probe in Laborflasche 33
Abbildung 46: Probe mit Peptonwasser vermischt 33
Abbildung 47: Verdünnungsreihen 34
Abbildung 48: Auszählen der Platten mit dem Koloniezähler 34
Abbildung 49: Platten beim Trocknen 35
Abbildung 50: Platten im Brutschrank 36
Abbildung 51: Mit Peptonwasser vermischte Proben auf dem Überkopfschüttler (Glasflaschen) 37
Abbildung 52: Temperaturkurve von Variante 1 (normale Mischung) in Versuchsserie 1 39
Abbildung 53: Temperaturkurve der Varianten 1 bis 6 in der obersten Etage 40
Abbildung 54: Temperaturkurve der Varianten 1 bis 6 in der mittleren Etage 40
Abbildung 55: Temperaturkurve der Varianten 1 bis 6 in der untersten Etage 41
Abbildung 56: Kurve der CO_2-Konzentrationen und der Zuluftmengen von Variante 1 (normale Mischung) in Versuchsserie 1 42
Abbildung 57: Kurve der CO_2-Konzentrationen und der Zuluftmengen von Variante 2 (wenig Einstreu) in Versuchsserie 1 42
Abbildung 58: Kurve der CO_2-Konzentrationen und der Zuluftmengen von Variante 3 (viel Einstreu) in Versuchsserie 1 43
Abbildung 59: Kurve der CO_2-Konzentrationen und der Zuluftmengen von Variante 4 (Biozumischung) in Versuchsserie 2 43
Abbildung 60: Kurve der CO_2-Konzentrationen und der Zuluftmengen von Variante Variante 5 (Vergleichsvariante) in Versuchsserie 2 44
Abbildung 61: Kurve der CO_2-Konzentrationen und der Zuluftmengen von Variante 6 (Pilzzumischung) in Versuchsserie 2 44
Abbildung 62: Gemittelte Wassergehaltswerte der sechs Varianten über die gesamte Versuchsdauer 45
Abbildung 63: Gemittelte pH-Werte (kompensiert auf 20 °C) der sechs Varianten über die gesamte Versuchsdauer 47
Abbildung 64: Gemittelte Leitfähigkeitswerte (kompensiert auf 20 °C) der sechs Varianten über die gesamte Versuchsdauer 48
Abbildung 65: Gemittelte Glühverlustwerte aller sechs Varianten über die gesamte Versuchsdauer 49

Abbildung 66: Gemittelten TOC Werte der sechs Variante über die gesamte Versuchsdauer .. 50

Abbildung 67: Gemittelte Stickstoffwerte der sechs Varianten über die gesamte Versuchsdauer 51

Abbildung 68: Gemittelte Werte der C/N-Verhältnisse der sechse Varianten über die gesamte Versuchsdauer..... 52

Abbildung 69: Gemittelte AT_4-Werte der Endproben der sechs Varianten beider Versuchsserien 53

Abbildung 70: Gemittelte Huminsäuren-Werte der Endproben der sechs Varianten beider Versuchsserien 54

Abbildung 71: Braunhuminsäuren-Werte der der Endproben der einzelnen Reaktoren der sechs Varianten beider Versuchsserien..... 54

Abbildung 72: CCA - 1 Verdünnung nach 41 Stunden Inkubationsdauer bei der mikrobiologischen Hauptuntersuchung von Versuchsserie 1 57

Abbildung 73: CCA - 2 Verdünnung nach 41 Stunden Inkubationsdauer bei der mikrobiologischen Hauptuntersuchung von Versuchsserie 1 57

Abbildung 74: CCA - 2 Verdünnung nach 65 Stunden Inkubationsdauer bei der mikrobiologischen Hauptuntersuchung von Versuchsserie 1 57

Abbildung 75: Einige KAA Platten (- 2 Verdünnung) nach 41 Stunden Inkubationsdauer bei der mikrobiologischen Hauptuntersuchung von Versuchsserie 1 57

Abbildung 76: CCA - 1 Verdünnung nach 72 Stunden Inkubationsdauer bei der mikrobiologischen Hauptuntersuchung von Versuchsserie 2 59

Abbildung 77: KAA - 1 Verdünnung nach 72 Stunden Inkubationsdauer bei der mikrobiologischen Hauptuntersuchung von Versuchsserie 2 59

7.4 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eigenschaften kompostierbarer Materialien nach BERGER und LORENZ-LADENER (2008) und LEHNER (2013) 13

Tabelle 2: Mindestanforderungen sowie Behandlungs- und Anwendungsvoraussetzungen von Komposten in Abhängigkeit vom mikrobiologischen Untersuchungsergebnis nach ÖNORM S 2204 (2016) 16

Tabelle 3: Mischungsverhältnisse Versuchsserie 1 22

Tabelle 4: Aufteilung der Reaktoren in der Klimakammer bei Versuchsserie 1 23

Tabelle 5: Umsetzen und Probenahmen Versuchsserie 1 24

Tabelle 6: Mischungsverhältnisse Versuchsserie 2 24

Tabelle 7: Aufteilung der Reaktoren in der Klimakammer bei Versuchsserie 2 25

Tabelle 8: Umsetzen und Probenahmen Versuchsserie 2 26

Tabelle 9: Probenart und Verwendungszweck 28

Tabelle 10: Übersicht über die bei der Testuntersuchung von Versuchsserie 1 verwendeten Verfahren 35

Tabelle 11: Übersicht über die bei der Hauptuntersuchung von Versuchsserie 1 verwendeten Verfahren 36

Tabelle 12: Übersicht über die bei der Testuntersuchung von Versuchsserie 2 verwendeten Verfahren 37

Tabelle 13: Übersicht über die bei der Hauptuntersuchung von Versuchsserie 2 verwendeten Verfahren 38

Tabelle 14: Hinzugefügte (+) und entnommene (-) (Kondens- und Sickerwasser) Wassermengen in ml in Versuchsserie 1 pro Reaktor (R) und gerundeter Mittelwert (MW) pro Variante 46

Tabelle 15: Entnommene (Kondens- und Sickerwasser) Wassermengen in ml in Versuchsserie 2 pro Reaktor (R) und gerundeter Mittelwert (MW) pro Variante 47

Tabelle 16: Ergebnisse der mikrobiologischen Hauptuntersuchung von Versuchsserie 1 nach 41 Stunden Inkubationsdauer (Mittelwerte einer Doppelbestimmung in KBE/g FM) 56

Tabelle 17: Ergebnisse der mikrobiologischen Hauptuntersuchung von Versuchsserie 1 nach 65 Stunden Inkubationsdauer (Mittelwerte einer Doppelbestimmung in KBE/g FM) 56

Tabelle 18: Anreihung der Petrischalen auf den Abbildungen 72 - 74 57

Tabelle 19: Ergebnisse der mikrobiologischen Hauptuntersuchungen von Versuchsserie 2 nach 72 Stunden Inkubationsdauer (Mittelwerte einer Doppelbestimmung in KBE/g FM) 58

Tabelle 20: Anreihung der Petrischalen auf den Abbildungen 76 – 77 58

Tabelle 21: Temperaturdaten in °C der einzelnen Reaktoren in Versuchsserie 1 71

Tabelle 22: Temperaturdaten in °C der einzelnen Reaktoren in Versuchsserie 2 72

Tabelle 23: CO_2-Konzentrationen in der Abluft in Vol.% der einzelnen Reaktoren in Versuchsserie 1 73

Tabelle 24: CO_2-Konzentrationen in der Abluft in Vol.% der einzelnen Reaktoren in Versuchsserie 2 74

Tabelle 25: Wassergehaltswerte in % FM der einzelnen Reaktoren sowie Mittelwert und Standardabweichung 76

Tabelle 26: Glühverlustwerte in % TM der einzelnen Reaktoren sowie Mittelwert und Standardabweichung 76

Tabelle 27: TOC-Werte in % TM der einzelnen Reaktoren sowie Mittelwert und Standardabweichung 77

Tabelle 28: N-Werte in % TM der einzelnen Reaktoren sowie Mittelwert und Standardabweichung 77

Tabelle 29: C/N-Verhältnisse der einzelnen Reaktoren sowie Mittelwert und Standardabweichung 78

Tabelle 30: pH-Werte (kompensiert auf 20 °C) der einzelnen Reaktoren sowie Mittelwert und Standardabweichung 78

Tabelle 31: Leitfähigkeitswerte (kompensiert auf 20 °C) in mS/cm der einzelnen Reaktoren sowie Mittelwert und Standardabweichung 79

Tabelle 32: Huminsäuren in OD/g o TM der einzelnen Reaktoren sowie Mittelwert und Standardabweichung 79

Tabelle 33: AT_4-Werte in mg O_2/g TM der einzelnen Reaktoren sowie Mittelwert und Standardabweichung 80

Tabelle 34: Gebildetes Kondenswasser in ml der einzelnen Rektoren sowie Mittelwert 80

8. Anhang

Tabelle 21: Temperaturdaten in °C der einzelnen Reaktoren in Versuchsserie 1

Temperatur in °C Versuchsserie 1									
[d]	**R1**	**R2**	**R4**	**R5**	**R6**	**R8**	**R9**	**R10**	**R12**
1	35,0	33,8	32,4	34,8	33,7	32,3	34,5	34,1	32,2
2	41,4	39,2	37,8	40,8	38,8	37,5	40,8	38,9	37,3
3	45,5	43,3	41,7	46,4	42,3	41,3	45,3	42,3	40,5
4	48,4	46,1	44,5	48,7	45,3	44,5	47,9	45,0	43,9
5	50,9	49,3	48,3	51,3	48,8	48,0	51,0	48,3	47,3
6	52,2	51,1	49,9	52,6	50,3	49,6	51,9	49,5	48,8
7 vor U	53,2	52,6	51,6	53,4	51,5	50,7	52,6	50,7	50,0
7 nach U	44,4	42,3	41,5	43,3	40,7	40,6	42,5	39,8	40,1
8	46,6	45,6	45,0	46,7	44,8	44,4	45,9	44,5	43,7
9	47,4	46,6	46,1	47,7	45,7	45,6	46,7	45,4	45,0
10	49,1	48,5	47,2	48,4	47,0	46,8	47,9	46,6	46,3
11	49,3	49,5	48,9	49,2	48,3	48,4	48,9	47,9	47,6
13	49,7	49,1	48,8	48,9	48,1	48,4	47,4	47,3	47,7
14 vor U	49,3	49,5	49,1	49,0	48,2	48,5	48,4	47,6	47,7
14 nach U	42,6	39,8	33,4	41,3	38,0	33,0	39,2	37,4	31,8
15	39,3	38,7	38,8	38,8	38,4	38,7	38,4	38,2	38,2
16	40,1	40,0	39,6	39,8	39,3	39,5	39,3	39,0	39,0
17	41,1	41,0	40,6	40,8	40,2	40,6	40,4	39,9	40,0
18	41,9	41,6	41,4	41,5	40,4	41,0	40,8	40,0	40,1
20	42,4	42,1	41,9	41,9	40,8	41,3	41,3	40,2	40,3
21 vor U	42,8	42,5	42,4	42,4	41,4	41,6	41,7	40,9	40,6
21 nach U	37,5	34,6	34,7	35,7	34,0	34,1	35,0	33,3	33,1
22	35,7	35,2	35,1	35,4	34,8	34,8	34,4	34,4	34,5
23	36,8	36,3	36,2	36,5	35,8	35,9	35,9	35,4	35,5
24	38,0	37,3	37,3	37,4	36,6	36,9	36,9	36,2	36,3
25	38,3	38,0	37,7	37,4	36,8	37,2	36,8	36,5	36,6
26	38,8	38,1	38,3	38,1	37,6	37,8	37,6	37,2	37,4
28 vor U	39,6	39,1	39,2	38,8	38,2	38,8	38,2	37,8	38,0
28 nach U	36,4	33,5	32,0	34,6	32,4	32,5	32,6	31,4	31,6
29	34,8	34,3	34,3	34,2	33,7	33,8	33,5	33,3	33,3
30	35,9	35,4	35,4	35,2	34,7	35,0	34,6	34,4	34,4
31	36,3	36,0	36,2	35,8	35,4	35,7	35,2	35,0	34,9
32	36,7	36,3	36,5	36,4	35,7	36,0	35,8	35,4	35,4

33	37,1	36,9	37,0	36,8	36,3	36,7	36,3	36,0	36,1
35	37,0	37,0	36,9	36,8	36,4	36,8	36,2	35,9	35,9
36	37,9	37,5	37,6	37,3	36,8	37,1	36,7	36,4	36,5
37	38,1	38,0	38,0	37,8	37,3	37,5	37,2	37,0	36,8
38	38,3	37,8	38,0	37,7	37,1	37,5	36,8	36,9	36,6
39	38,8	38,1	38,2	38,1	37,5	37,8	37,4	37,2	37,3
41	39,0	38,9	39,2	38,7	38,1	38,6	37,9	37,7	37,7
42	39,6	39,6	39,7	39,2	38,6	38,8	38,3	38,2	38,2

Tabelle 22: Temperaturdaten in °C der einzelnen Reaktoren in Versuchsserie 2

Temperatur in °C Versuchsserie 2									
[d]	**R1**	**R2**	**R4**	**R5**	**R6**	**R8**	**R9**	**R10**	**R12**
0	22,9	20,5	19,9	22,9	19,9	19,8	22,9	19,9	19,8
1	33,7	33,4	32,1	34,6	32,8	32,2	34,7	32,4	31,8
2	46,3	41,0	42,0	43,1	39,8	40,7	44,1	38,1	39,5
3	61,1	54,6	54,6	58,8	51,4	52,4	55,4	47,8	49,6
4	67,6	62,5	62,3	67,3	59,2	61,6	64,8	56,0	59,4
6	64,0	58,0	58,8	60,5	56,3	58,0	56,8	54,6	56,1
7 vor U	63,1	61,8	61,3	59,6	58,6	60,3	58,7	55,2	58,1
7 nach U	42,0	39,9	42,1	41,5	33,7	40,1	37,5	31,4	37,0
8	46,1	45,1	44,2	45,2	43,4	43,0	44,3	42,2	42,2
9	51,5	50,4	49,6	49,6	47,8	48,6	48,9	46,0	47,0
10	57,7	55,7	55,6	56,4	52,8	53,7	53,8	50,4	51,7
11	62,8	61,5	60,6	59,3	55,8	57,1	58,8	54,7	55,3
13	63,9	61,6	60,4	62,5	57,0	58,4	59,8	55,5	56,2
14 vor U	63,5	60,8	60,3	61,5	56,7	57,9	59,0	55,4	55,8
14 nach U	44,1	41,8	44,7	42,9	38,6	41,9	41,3	37,2	41,3
15	46,5	46,1	46,0	45,7	44,5	45,1	44,8	43,7	43,9
16	49,6	49,4	49,5	48,8	47,6	48,4	48,2	46,4	46,7
17	52,3	52,4	52,3	51,8	50,1	51,4	50,9	48,6	49,5
18	54,9	53,9	53,6	53,3	51,5	52,9	52,5	50,9	50,8
19	52,2	52,6	53,6	51,0	50,9	52,7	50,1	50,2	51,2
20	53,3	52,5	52,9	51,9	50,6	51,7	51,0	49,9	50,4
21 vor U	54,6	53,4	53,7	53,5	51,6	52,7	51,6	50,6	51,0
21 nach U	43,9	38,6	43,0	42,9	36,3	41,6	40,1	35,6	39,1
22	46,1	45,9	45,8	45,1	44,3	44,9	44,2	43,5	43,6
23	47,8	47,3	47,4	46,9	45,6	46,4	45,9	44,9	45,0
24	49,8	49,0	48,8	49,0	47,2	47,9	48,0	46,4	46,4

25	51,1	50,6	50,8	50,3	48,8	49,9	49,3	48,0	48,4
26	50,9	50,5	50,3	49,8	49,2	49,5	48,9	48,4	47,7
27	52,4	52,2	51,8	51,4	49,3	50,4	50,5	50,0	48,6
28	51,7	51,4	51,6	50,7	49,1	50,4	49,6	48,1	48,6
29 vor U	51,5	51,2	51,4	50,4	48,6	50,3	49,1	47,4	48,4
29 nach U	41,6	40,9	40,7	40,4	36,4	38,2	38,1	34,0	38,0
30	42,7	42,5	41,9	42,1	41,7	41,6	41,5	40,9	40,5
31	43,6	43,3	43,3	43,1	42,1	42,5	42,4	41,5	41,4
32	44,8	44,4	43,9	44,1	42,7	42,9	43,0	42,1	42,1
34	44,7	44,2	44,1	44,2	43,0	43,4	43,6	42,4	42,6
35	45,7	45,4	45,4	45,2	44,0	44,2	44,3	43,2	43,2
36	47,7	47,5	47,2	46,6	45,0	46,0	45,8	44,4	44,5
37	48,7	48,4	48,2	47,5	46,3	46,9	46,8	45,3	45,6
38	50,1	49,5	49,2	49,0	47,4	48,1	48,0	46,4	46,6
39	50,9	50,2	50,1	49,7	48,1	48,9	48,6	47,3	47,4
40	51,2	50,7	50,6	50,3	48,7	49,5	49,3	47,7	48,0
41	51,6	51,5	51,1	50,6	49,9	49,8	49,6	48,9	47,0
42	53,2	52,6	52,5	51,9	50,2	51,2	50,4	48,9	49,1
43	53	52,4	52,8	51,9	50,2	51,5	50,3	48,6	49,5

Tabelle 23: CO_2-Konzentrationen in der Abluft in Vol.% der einzelnen Reaktoren in Versuchsserie 1

	CO_2 in Vol.% Versuchsserie 1								
[d]	**R1**	**R2**	**R4**	**R5**	**R6**	**R8**	**R9**	**R10**	**R12**
1	16,8	20,6	10,3	16,7	17,6	16,5	17,2	19,0	9,8
2	15,9	15,0	12,8	17,3	15,5	15,4	16,1	14,6	11,0
3	17,9	15,6	13,6	18,4	16,0	15,8	17,7	14,7	14,2
4	16,7	15,6	16,2	15,3	16,1	14,9	15,6	15,2	16,0
5	16,3	16,2	16,6	15,0	15,1	15,0	15,3	15,0	16,5
6	16,0	15,9	16,3	14,7	14,6	14,5	14,0	14,2	14,7
7 vor U	14,5	13,8	13,3	12,2	13,4	18,1	13,4	15,0	14,2
7 nach U	5,3	4,6	4,8	4,7	4,4	5,7	5,1	4,7	5,5
8	13,8	11,2	12,6	11,2	11,0	12,3	12,8	13,8	10,7
9	15,7	11,6	12,8	13,3	11,9	15,0	17,4	16,2	11,2
10	14,0	11,1	15,4	11,6	11,5	14,8	15,1	14,0	11,1
11	12,8	11,3	12,9	12,5	12,1	14,8	13,8	13,3	13,0
13	10,3	9,9	12,2	14,0	11,3	13,8	12,6	11,7	11,6
14 vor U	11,4	11,5	12,9	14,4	13,5	15,3	13,3	13,7	12,2

14 nach U	4,3	3,9	5,6	7,5	5,4	4,9	5,5	6,8	3,8
15	8,0	7,3	7,2	9,0	8,0	6,5	8,7	8,3	4,9
16	10,1	8,1	8,9	11,8	8,6	9,0	12,6	10,3	6,8
17	11,6	8,5	9,4	12,6	8,4	10,6	14,3	11,2	7,6
18	12,7	6,1	9,4	13,9	7,1	11,3	15,9	12,1	8,6
20	11,0	4,3	9,2	10,9	5,0	9,3	10,4	8,2	8,9
21 vor U	11,2	3,8	8,7	10,5	4,7	9,3	9,8	7,7	7,7
21 nach U	3,4	1,7	4,3	4,3	2,3	4,1	4,6	4,4	3,2
22	6,5	2,5	5,2	5,8	3,0	4,6	5,0	4,3	3,6
23	7,2	2,2	5,7	7,0	3,4	5,6	5,6	5,0	4,4
24	6,2	2,0	6,1	7,0	3,1	6,1	5,6	4,9	4,9
25	6,3	1,9	6,5	7,0	3,2	6,6	5,7	5,0	5,2
26	5,8	1,7	6,3	7,0	2,9	6,2	5,5	4,8	5,1
28 vor U	5,8	1,6	6,4	6,4	2,7	6,2	5,1	4,4	5,1
28 nach U	2,5	0,9	3,1	2,9	1,5	3,0	2,6	2,7	1,8
29	4,1	1,4	3,4	3,9	2,0	3,3	2,8	2,9	2,1
30	4,8	1,4	4,4	3,7	2,1	4,2	4,2	3,3	3,3
31	4,8	1,4	5,0	3,7	2,2	4,8	4,4	3,5	3,9
32	4,6	1,4	4,8	3,4	2,4	5,3	4,5	3,5	4,4
33	4,4	1,3	4,9	3,3	2,0	5,3	4,4	3,4	4,4
35	4,2	1,7	5,1	3,9	2,9	5,4	4,5	3,9	4,2
36	4,6	1,4	5,0	3,7	2,9	5,3	4,0	3,4	4,0
37	4,9	1,1	4,8	3,3	1,7	5,1	3,8	3,1	3,9
38	5,0	1,2	5,0	3,5	1,7	5,0	3,8	3,1	3,8
39	4,9	0,9	4,6	3,6	1,7	4,9	3,6	2,9	3,7
41	4,6	0,9	4,7	3,8	1,6	4,7	3,4	2,7	3,5
42	4,7	0,9	4,4	4,0	1,5	4,7	3,5	2,7	3,4

Tabelle 24: CO_2-Konzentrationen in der Abluft in Vol.% der einzelnen Reaktoren in Versuchsserie 2

[d]	**CO_2 in Vol.% Versuchsserie 2**								
	R1	**R2**	**R4**	**R5**	**R6**	**R8**	**R9**	**R10**	**R12**
0	4,0	1,4	1,7	3,1	0,9	1,5	3,1	0,5	1,4
1	20,5	10,5	16,1	19,2	10,4	15,3	17,4	9,8	15,1
2	22,2	16,0	23,0	22,5	14,0	24,0	18,8	14,6	23,9
3	20,3	20,0	17,0	19,9	15,9	20,1	17,0	16,8	18,7
4	13,1	16,3	15,2	14,1	19,1	15,8	14,3	16,2	16,5
6	6,7	6,4	6,8	6,5	12,3	7,4	8,1	14,2	10,1
7 vor U	12,7	8,0	3,3	11,8	10,2	11,0	13,1	14,0	11,8

7 nach U	2,4	1,5	2,7	2,5	4,7	2,0	2,1	5,8	2,4
8	11,6	6,3	5,6	8,9	6,3	3,9	9,2	7,1	6,3
9	22,0	15,3	14,5	25,0	15,2	11,0	19,2	11,8	16,8
10	15,4	15,7	22,6	17,6	15,5	21,8	18,2	22,4	16,5
11	14,1	14,0	11,2	15,9	16,6	11,1	14,7	14,5	15,7
13	8,4	10,8	10,2	9,1	9,2	18,3	11,4	8,6	9,5
14 vor U	12,1	11,7	9,9	13,3	11,5	11,1	13,6	10,4	12,1
14 nach U	3,1	1,9	2,7	4,9	4,5	3,0	4,8	4,7	5,6
15	5,7	5,3	4,9	7,0	5,4	7,8	7,9	5,2	6,7
16	13,2	9,2	9,9	15,1	8,4	13,8	13,9	11,4	11,8
17	16,4	10,9	15,7	18,6	10,7	17,5	17,1	16,0	15,8
18	19,3	7,7	17,1	17,7	11,1	11,4	11,9	16,2	17,4
19	9,7	3,2	8,9	14,6	10,5	13,1	12,7	12,6	14,6
20		3,6	8,7	10,4	8,0	11,0	10,3	9,6	9,1
21 vor U	8,9	3,5	9,7	12,0	7,9	13,4	11,8	10,7	12,2
21 nach U	3,6	1,3	5,2	8,8	4,4	7,5	8,2	5,0	6,8
22	6,1	3,1	7,5	8,2	6,0	7,9	8,5	6,3	8,2
23	6,7	3,0	8,2	8,0	6,7	8,8	8,4	9,0	8,3
24	8,1	2,9	8,7	9,9	6,7	9,0	8,2	9,7	8,7
25	8,3	2,7	9,5	9,9	6,9	7,0	8,2	7,2	8,6
26	8,3	2,6	9,8	9,8	6,8	6,4	8,0	6,3	8,3
27	7,9	2,3	5,8	8,7	6,5	7,9	7,5	7,4	7,4
28	7,7	2,3	6,0	8,0	6,2	7,9	7,2	7,7	7,0
29 nach U	3,8	1,4	4,4	4,2	3,1	4,6	3,9	3,1	4,5
30	5,0	2,5	5,4	4,7	3,4	4,8	4,6	3,5	4,9
31	6,4	2,7	6,1	7,6	4,0	4,9	6,8	5,3	5,4
32	6,7	2,7	6,3	9,5	4,4	5,3	8,8	6,7	5,4
34	7,5	3,1	6,0	7,4	4,4	5,3	7,6	7,0	5,4
35	8,5	3,1	6,4	7,2	3,4	6,2	7,4	7,0	5,6
36	6,7	2,5	6,8	7,3	3,7	4,9	5,5	4,8	6,0
37	6,2	2,4	6,6	7,1	2,7	4,8	6,0	4,8	6,1
38	5,8	2,3	6,6	9,0	2,2	4,8	7,1	6,0	6,8
39	6,8	2,0	6,8	8,5	1,8	4,5	7,4	6,7	6,4
40	7,0	1,9	5,5	5,8	1,7	4,1	5,0	6,3	5,5
41	6,6	1,9	5,0	5,5	1,5	3,7	5,1	5,0	5,0
42	6,6	1,8	4,9	5,2	1,5	4,4	5,2	4,6	4,7
43	6,1	1,7	4,8	5,2	1,7	4,6	5,2	4,2	4,5

Tabelle 25: Wassergehaltswerte in % FM der einzelnen Reaktoren sowie Mittelwert und Standardabweichung

Wassergehalt in % FM															
	Variante 1					**Variante 2**					**Variante 3**				
[d]	**R1**	**R5**	**R9**	**MW**	**σ %**	**R2**	**R6**	**R10**	**MW**	**σ %**	**R4**	**R8**	**R12**	**MW**	**σ %**
0	56,3			**-**	-	59,8			**-**	-	48,6			**-**	-
7	54,9	56,0	57,6	**56,2**	2,0	59,9	60,8	60,9	**60,5**	0,7	48,3	48,7	48,8	**48,6**	0,4
14	55,6	58,1	58,5	**57,4**	2,2	60,9	61,7	60,7	**61,1**	0,7	47,7	47,8	46,1	**48,2**	1,6
21	56,4	57,3	58,5	**57,4**	1,5	60,9	60,9	60,4	**60,7**	0,4	50,7	50,7	50,6	**50,7**	0,1
28	56,8	57,4	58,2	**57,5**	1,0	60,1	60,0	60,7	**60,3**	0,5	50,7	51,2	50,7	**50,9**	0,5
43	56,1	56,4	57,1	**56,5**	0,7	58,7	58,9	59,3	**59,0**	0,4	50,7	50,7	50,2	**50,5**	0,5
	Variante 4					**Variante 5**					**Variante 6**				
[d]	**R1**	**R5**	**R9**	**MW**	**σ %**	**R2**	**R6**	**R10**	**MW**	**σ %**	**R4**	**R8**	**R12**	**MW**	**σ %**
0	56,6			**-**	-	57,4			**-**	-	59,0			**-**	-
7	55,9	56,1	55,4	**55,8**	0,5	56,1	55,8	54,5	**55,5**	1,3	58,2	58,8	58,7	**58,6**	0,4
14	55,5	54,5	56,2	**55,4**	1,3	54,4	54,4	54,3	**54,4**	0,1	58,2	58,1	57,1	**57,8**	0,9
21	54,1	55,5	55,1	**54,9**	1,1	53,1	53,5	53,5	**53,4**	0,4	56,7	57,0	56,4	**56,7**	0,4
29	53,7	53,6	54,9	**54,1**	1,1	51,7	51,3	52,2	**51,7**	0,7	55,4	55,2	55,5	**55,4**	0,2
44	52,1	53,7	54,0	**53,3**	1,6	49,5	49,9	51,0	**50,1**	1,3	55,1	54,7	54,8	**54,9**	0,3

Tabelle 26: Glühverlustwerte in % TM der einzelnen Reaktoren sowie Mittelwert und Standardabweichung

Glühverlust in % TM															
	Variante 1					**Variante 2**					**Variante 3**				
[d]	**R1**	**R5**	**R9**	**MW**	**σ %**	**R2**	**R6**	**R10**	**MW**	**σ %**	**R4**	**R8**	**R12**	**MW**	**σ %**
0	34,2			**-**	-	40,4			**-**	-	24,6			**-**	-
7	30,0	31,0	34,7	**31,9**	6,3	36,7	35,5	36,1	**36,1**	1,4	23,5	23,9	23,9	**23,8**	0,8
14	32,5	31,1	32,4	**32,0**	2,0	33,9	36,3	33,5	**34,6**	3,6	24,3	22,4	22,7	**23,1**	3,6
21	30,3	30,1	31,1	**30,5**	1,4	34,1	34,5	33,3	**34,0**	1,5	22,9	23,3	22,4	**22,9**	1,6
28	30,0	30,2	30,4	**30,2**	0,5	32,9	32,4	32,6	**32,6**	0,6	23,2	22,9	23,1	**23,1**	0,5
43	28,9	29,9	30,2	**29,7**	1,9	32,2	32,0	32,2	**32,1**	0,3	22,9	22,4	22,4	**22,6**	1,0
	Variante 4					**Variante 5**					**Variante 6**				
[d]	**R1**	**R5**	**R9**	**MW**	**σ %**	**R2**	**R6**	**R10**	**MW**	**σ %**	**R4**	**R8**	**R12**	**MW**	**σ %**
0	43,8			**-**	-	35,8			**-**	-	39,3			**-**	-
7	38,2	40,0	41,5	**39,9**	3,4	31,1	32,1	31,5	**31,6**	1,3	34,7	36,2	36,0	**35,6**	1,9
14	38,4	38,8	39,7	**39,0**	1,4	30,2	29,9	31,0	**30,4**	1,5	34,3	34,7	32,9	**34,0**	2,3
21	36,5	37,8	35,8	**36,7**	2,3	29,2	30,1	31,0	**30,1**	2,4	32,2	33,1	31,2	**32,2**	2,4
29	35,9	38,2	37,6	**37,2**	2,6	28,6	27,7	29,3	**28,5**	2,3	30,8	30,7	30,8	**30,8**	0,2
44	33,6	32,7	33,9	**33,4**	1,5	27,2	27,2	27,8	**27,4**	1,0	30,5	30,0	31,0	**30,5**	1,3

Tabelle 27: TOC-Werte in % TM der einzelnen Reaktoren sowie Mittelwert und Standardabweichung

TOC in % TM															
	Variante 1					**Variante 2**					**Variante 3**				
[d]	**R1**	**R5**	**R9**	**MW**	**σ %**	**R2**	**R6**	**R10**	**MW**	**σ %**	**R4**	**R8**	**R12**	**MW**	**σ %**
0	22,1			**-**	-	25,2			**-**	-	16,4			**-**	-
7	19,2	19,5	21,7	**20,1**	5,5	23,4	22,7	22,5	**22,9**	1,7	17,0	16,1	15,5	**16,2**	3,8
14	19,7	19,6	21,0	**20,1**	3,2	21,5	23,3	21,2	**22,0**	4,2	16,8	15,3	15,0	**15,7**	5,0
21	18,6	18,7	20,2	**19,2**	3,8	21,4	21,1	20,6	**21,0**	1,6	15,2	16,4	15,2	**15,6**	3,6
28	19,2	19,5	19,2	**19,3**	0,7	21,0	20,6	20,6	**20,7**	0,9	15,5	15,1	15,3	**15,3**	1,1
43	18,6	19,2	19,4	**19,1**	1,8	20,5	20,1	20,1	**20,2**	0,9	15,2	15,1	15,3	**15,2**	0,5
	Variante 4					**Variante 5**					**Variante 6**				
[d]	**R1**	**R5**	**R9**	**MW**	**σ %**	**R2**	**R6**	**R10**	**MW**	**σ %**	**R4**	**R8**	**R12**	**MW**	**σ %**
0	25,3			**-**	-	23,6			**-**	-	23,7			**-**	-
7	22,5	23,0	24,3	**23,3**	3,3	20,9	21,1	19,9	**20,6**	2,5	22,4	22,7	21,9	**22,3**	1,5
14	22,3	22,6	23,1	**22,7**	1,5	19,2	18,7	19,5	**19,1**	1,7	21,8	22,6	21,3	**21,9**	2,4
21	23,1	22,1	20,9	**22,0**	4,1	18,7	19,4	20,0	**19,4**	2,7	20,6	21,3	20,3	**20,7**	2,0
29	21,7	20,9	22,2	**21,6**	2,5	18,6	18,6	18,7	**18,6**	0,3	19,3	20,1	19,6	**19,7**	1,7
44	19,5	19,1	20,1	**19,6**	2,1	18,1	17,3	18,0	**17,8**	2,0	19,7	18,8	19,9	**19,5**	2,5

Tabelle 28: N-Werte in % TM der einzelnen Reaktoren sowie Mittelwert und Standardabweichung

N in % TM															
	Variante 1					**Variante 2**					**Variante 3**				
[d]	**R1**	**R5**	**R9**	**MW**	**σ %**	**R2**	**R6**	**R10**	**MW**	**σ %**	**R4**	**R8**	**R12**	**MW**	**σ %**
0	1,32			-	-	1,79			-	-	0,81			-	-
7	1,16	1,15	1,28	**1,20**	4,9	1,37	1,31	1,36	**1,35**	1,9	0,81	0,77	0,75	**0,78**	3,2
14	1,20	1,21	1,29	**1,23**	3,3	1,26	1,34	1,24	**1,28**	3,4	0,78	0,66	0,69	**0,71**	7,2
21	1,16	1,23	1,33	**1,24**	5,6	1,36	1,40	1,31	**1,36**	2,7	0,75	0,72	0,69	**0,72**	3,4
28	1,20	1,25	1,28	**1,24**	2,7	1,29	1,29	1,28	**1,29**	0,4	0,71	0,69	0,67	**0,69**	2,4
43	1,30	1,35	1,41	**1,35**	3,3	1,49	1,45	1,48	**1,47**	1,2	0,70	0,67	0,66	**0,68**	2,5
	Variante 4					**Variante 5**					**Variante 6**				
[d]	**R1**	**R5**	**R9**	**MW**	**σ %**	**R2**	**R6**	**R10**	**MW**	**σ %**	**R4**	**R8**	**R12**	**MW**	**σ %**
0	1,37			-	-	1,45			-	-	1,58			-	-
7	1,23	1,25	1,24	**1,24**	0,7	1,14	1,19	1,28	**1,20**	4,8	1,30	1,39	1,27	**1,32**	3,9
14	1,23	1,20	1,27	**1,23**	2,3	1,10	1,07	1,19	**1,12**	4,6	1,30	1,25	1,27	**1,27**	1,6
21	1,28	1,26	1,23	**1,26**	1,6	1,11	1,17	1,22	**1,17**	3,9	1,29	1,35	1,23	**1,29**	3,8
29	1,27	1,10	1,23	**1,20**	6,0	1,12	1,09	1,16	**1,12**	2,6	1,19	1,22	1,23	**1,21**	1,4
44	1,28	1,20	1,32	**1,27**	3,9	1,13	1,14	1,22	**1,16**	3,5	1,35	1,34	1,40	**1,36**	1,9

Tabelle 29: C/N-Verhältnisse der einzelnen Reaktoren sowie Mittelwert und Standardabweichung

C/N-Verhältnis															
	Variante 1					**Variante 2**					**Variante 3**				
[d]	**R1**	**R5**	**R9**	**MW**	**σ %**	**R2**	**R6**	**R10**	**MW**	**σ %**	**R4**	**R8**	**R12**	**MW**	**σ %**
0	17			**-**	-	14			**-**	-	20			**-**	-
7	17	17	17	**17**	0,0	17	17	17	**17**	0,0	21	21	21	**21**	0,0
14	16	16	16	**16**	0,0	17	17	17	**17**	0,0	22	23	22	**22**	2,1
21	16	15	15	**15**	3,1	16	15	16	**16**	3,0	20	23	22	**22**	5,8
28	16	16	15	**16**	3,0	16	16	16	**16**	0,0	22	22	23	**22**	2,1
43	14	14	14	**14**	0,0	14	14	14	**14**	0,0	22	22	23	**22**	2,1
	Variante 4					**Variante 5**					**Variante 6**				
[d]	**R1**	**R5**	**R9**	**MW**	**σ %**	**R2**	**R6**	**R10**	**MW**	**σ %**	**R4**	**R8**	**R12**	**MW**	**σ %**
0	18			**-**	-	16			**-**	-	15			**-**	-
7	18	18	20	**19**	5,1	18	18	16	**17**	5,4	17	16	17	**17**	2,8
14	18	19	18	**18**	2,6	17	17	16	**17**	2,8	17	18	17	**17**	2,7
21	18	18	17	**18**	2,7	17	17	16	**17**	2,8	16	16	17	**16**	2,9
29	17	19	18	**18**	4,5	17	17	16	**17**	2,8	16	16	16	**16**	0,0
44	15	16	15	**15**	3,1	16	15	15	**15**	3,1	15	14	14	**14**	3,3

Tabelle 30: pH-Werte (kompensiert auf 20 °C) der einzelnen Reaktoren sowie Mittelwert und Standardabweichung

PH 20 °C															
	Variante 1					**Variante 2**					**Variante 3**				
[d]	**R1**	**R5**	**R9**	**MW**	**σ %**	**R2**	**R6**	**R10**	**MW**	**σ %**	**R4**	**R8**	**R12**	**MW**	**σ %**
0	7,83			**-**	-	7,17			**-**	-	8,29			**-**	-
7	8,35	8,35	8,29	**8,33**	0,3	7,51	7,81	7,67	**7,66**	1,6	8,58	8,65	8,62	**8,62**	0,3
14	8,56	8,65	8,52	**8,58**	0,6	7,92	7,97	8,03	**7,97**	0,6	8,86	8,87	8,93	**8,89**	0,3
21	8,70	8,71	8,58	**8,66**	0,7	8,02	7,99	8,11	**8,04**	0,6	8,86	8,87	8,93	**8,89**	0,3
28	8,77	8,66	8,56	**8,66**	1,0	7,94	8,03	8,01	**7,99**	0,5	8,99	8,94	8,95	**8,96**	0,2
29	9,35	9,19	9,23	**9,26**	0,7	8,85	8,82	8,92	**8,86**	0,5	9,21	9,17	9,24	**9,21**	0,3
	Variante 4					**Variante 5**					**Variante 6**				
[d]	**R1**	**R5**	**R9**	**MW**	**σ %**	**R2**	**R6**	**R10**	**MW**	**σ %**	**R4**	**R8**	**R12**	**MW**	**σ %**
0	7,49			**-**	-	7,72			**-**	-	7,74			**-**	-
7	7,87	7,92	7,96	**7,92**	0,5	8,44	8,41	8,27	**8,37**	0,9	8,07	8,15	8,03	**8,08**	0,6
14	8,26	8,19	8,12	**8,19**	0,7	8,52	8,51	8,46	**8,50**	0,3	8,18	7,99	8,20	**8,12**	1,2
21	8,27	8,30	8,25	**8,27**	0,2	8,50	8,51	8,48	**8,50**	0,1	8,25	8,21	8,15	**8,20**	0,5
29	8,38	8,34	8,29	**8,34**	0,4	8,57	8,63	8,55	**8,58**	0,4	8,33	8,28	8,28	**8,30**	0,3
44	8,90	8,85	8,83	**8,86**	0,3	9,22	9,19	9,25	**9,22**	0,3	9,19	9,10	9,07	**9,12**	0,6

Tabelle 31: Leitfähigkeitswerte (kompensiert auf 20 °C) in mS/cm der einzelnen Reaktoren sowie Mittelwert und Standardabweichung

Leitfähigkeit 20 °C in mS/cm															
	Variante 1					**Variante 2**					**Variante 3**				
[d]	**R1**	**R5**	**R9**	**MW**	**σ %**	**R2**	**R6**	**R10**	**MW**	**σ %**	**R4**	**R8**	**R12**	**MW**	**σ %**
0	2,39					3,00					1,75				
7	2,23	2,22	2,29	**2,25**	1,2	2,80	2,86	2,84	**2,83**	0,8	1,57	1,61	1,60	**1,59**	1,0
14	2,32	2,31	2,37	**2,33**	1,2	2,76	2,98	2,89	**2,88**	3,2	1,55	1,55	1,54	**1,54**	0,3
21	2,23	2,32	2,34	**2,30**	2,1	2,91	2,92	2,81	**2,88**	1,7	1,61	1,58	1,61	**1,60**	0,8
28	2,38	2,42	2,44	**2,41**	1,1	2,96	2,96	2,91	**2,94**	0,7	1,61	1,61	1,56	**1,59**	1,6
29	2,28	2,39	2,59	**2,42**	5,3	2,56	2,57	2,59	**2,57**	0,5	1,69	1,66	2,59	**1,98**	21,7
	Variante 4					**Variante 5**					**Variante 6**				
[d]	**R1**	**R5**	**R9**	**MW**	**σ %**	**R2**	**R6**	**R10**	**MW**	**σ %**	**R4**	**R8**	**R12**	**MW**	**σ %**
0	2,20					2,74					2,82				
7	2,10	2,04	2,06	**2,07**	1,1	2,34	2,34	2,39	**2,36**	0,9	2,77	2,70	2,74	**2,74**	0,9
14	1,95	1,94	2,06	**1,99**	2,7	2,33	2,23	2,41	**2,32**	3,0	2,68	2,91	2,84	**2,81**	3,5
21	2,08	1,97	2,01	**2,02**	2,2	2,35	2,42	2,52	**2,43**	2,9	2,70	2,78	2,82	**2,76**	1,9
29	2,02	1,84	2,06	**1,97**	5,0	2,45	2,38	2,50	**2,44**	2,0	2,56	2,66	2,84	**2,69**	4,3
44	1,91	1,81	2,59	**2,10**	16,5	2,30	2,32	2,59	**2,40**	5,6	2,37	2,41	2,59	**2,46**	3,9

Tabelle 32: Huminsäuren in OD/g o TM der einzelnen Reaktoren sowie Mittelwert und Standardabweichung

Huminsäuren in OD/g o TM															
[d] = 43	**Variante 1**					**Variante 2**					**Variante 3**				
Säuren	**R1**	**R5**	**R9**	**MW**	**σ %**	**R2**	**R6**	**R10**	**MW**	**σ %**	**R4**	**R8**	**R12**	**MW**	**σ %**
Braun	510,2	509,6	491,7	**503,8**	1,7	453,5	432,6	466,9	**451,0**	3,1	376,5	421,3	420,4	**406,1**	5,1
Fulvo	160,6	162,6	170,0	**164,4**	2,5	161,9	161,0	152,1	**158,3**	2,8	161,0	148,7	151,5	**153,7**	3,4
Summe	670,8	672,2	661,7	**668,2**	0,7	615,4	593,6	619,0	**609,3**	1,8	537,6	570,0	571,9	**559,8**	2,8
[d] = 44	**Variante 4**					**Variante 5**					**Variante 6**				
Säuren	**R1**	**R5**	**R9**	**MW**	**σ %**	**R2**	**R6**	**R10**	**MW**	**σ %**	**R4**	**R8**	**R12**	**MW**	**σ %**
Braun	770,3	786,2	714,9	**757,1**	4,0	690,8	668,1	585,2	**648,0**	7,0	544,4	611,0	563,5	**573,0**	4,9
Fulvo	131,7	147,1	127,7	**135,5**	6,2	165,4	163,9	154,1	**161,1**	3,1	133,9	162,9	161,0	**152,6**	8,7
Summe	901,9	933,2	842,6	**892,6**	4,2	856,1	832,0	739,3	**809,1**	6,2	698,3	773,9	724,5	**732,2**	4,3

Tabelle 33: AT_4-Werte in mg O_2/g TM der einzelnen Reaktoren sowie Mittelwert und Standardabweichung

AT_4 in mg 0_2/g TM															
	Variante 1					**Variante 2**					**Variante 3**				
[d]	**R1**	**R5**	**R9**	**MW**	**σ %**	**R2**	**R6**	**R10**	**MW**	**σ %**	**R4**	**R8**	**R12**	**MW**	**σ %**
43	6,2	5,8	6,0	**6,0**	2,7	6,0	6,0	5,7	**5,9**	2,4	1,4	1,5	1,6	**1,5**	5,4
	Variante 4					**Variante 5**					**Variante 6**				
[d]	**R1**	**R5**	**R9**	**MW**	**σ %**	**R2**	**R6**	**R10**	**MW**	**σ %**	**R4**	**R8**	**R12**	**MW**	**σ %**
44	2,7	2,3	2,8	**2,6**	8,3	2,1	2,0	2,1	**2,1**	2,3	3,8	4,0	5,2	**4,3**	14,3

Tabelle 34: Gebildetes Kondenswasser in ml der einzelnen Rektoren sowie Mittelwert

Kondenswasser in ml												
	Variante 1				**Variante 2**				**Variante 3**			
Tag	**R1**	**R5**	**R9**	**MW**	**R2**	**R6**	**R10**	**MW**	**R4**	**R8**	**R12**	**MW**
7	50	55	50	**52**	40	40	15	**32**	20	20	32	**24**
14	35	30	30	**32**	40	30	25	**32**	15	15	15	**15**
21	10	8	5	**8**	22	9	4	**12**	7	5	4	**5**
28	9	5	6	**7**	22	6	4	**11**	4	2	6	**4**
43	20	22	9	**17**	53	27	10	**10**	15	10	9	**11**
GESAMT	124	120	100	**115**	177	112	58	**116**	61	52	66	**60**
	Variante 4				**Variante 5**				**Variante 6**			
Tag	**R1**	**R5**	**R9**	**MW**	**R2**	**R6**	**R10**	**MW**	**R4**	**R8**	**R12**	**MW**
7	232	205	170	**202**	102	75	7	**61**	148	155	120	**141**
14	94	75	64	**78**	50	44	45	**46**	62	48	60	**57**
21	30	20	22	**24**	45	22	15	**41**	30	28	20	**26**
29	28	20	25	**24**	60	20	10	**30**	31	30	24	**28**
44	40	36	44	**40**	75	75	22	**57**	30	28	23	**27**
GESAMT	424	356	325	**368**	332	236	99	**222**	301	289	247	**279**

9. Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die Masterarbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfe bedient habe.

Weiters versichere ich, dass ich diese Masterarbeit weder im Inland noch im Ausland in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Wien, 10.10.2020 *Cornelia Hirsch*