Gefördert durch:
Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
BÖL
BUNDESPROGRAMM ÖKOLOGISCHER LANDBAU

Bestimmung der „Kompostreife“ und deren Einfluss auf die Eignung von Biogut- und Grüngutkomposten für den Einsatz in Gärtnerischen Erden und Kultursubstraten

Ralf Gottschall [1)], Christian Bruns [2)], Heidi Hauke [1) *)], Martin Kranert [3)]

Zusammenfassung

Der Artikel vermittelt einen Überblick zur Bestimmung der „Reife“ von Biogut- und Grüngutkomposten anhand zentraler Qualitätsparameter, die gängig in der RAL-Gütesicherung Kompost der Bundesgütegemeinschaft Kompost (BGK) sind. Ein besonderer Fokus wird darüber hinaus auf die Beschreibung von Zusammenhängen zwischen notwendiger Reife und Anwendungsgebiet der Komposte gelegt und diesbezüglich wiederum insbesondere auf den Komposteinsatz in Gärtnerischen Erden und Kultursubstraten.

Grundlage des Artikels sind wesentliche Ergebnisse aus verschiedenen F- u. E-Vorhaben der PlanCoTec-Gottschall und des ISA-Ingenieurbüros für Sekundärrohstoffe aus den Jahren 1996-2024, ergänzt um aktuelle Daten aus der RAL-Gütesicherung Kompost der BGK, erste Ergebnisse des derzeit noch laufenden F u. E-Vorhabens „TerÖko“ und ausgewählte Literatur.

Die „Reife“ eines Kompostes subsummiert dabei zwei zentrale Zustände bzw. Eigenschaftsbereiche:

a) den **Zustand** einer **weit fortgeschrittenen bis „abgeschlossenen“ Rotte**, die im Vergleich zum Beginn des Kompostierungsprozesses nur noch geringe Reste gut mikrobiell umsetzungsfähiger organischer Substanz im kompostierten Material hinterlassen hat und
b) die **sichere Vermeidung pflanzenschädigender Wirkungen** durch Faktoren im eingesetzten Kompost, die eine mangelnde Reife oder ungünstige Rottebedingungen während der Kompostierung widerspiegeln. Diese Faktoren können vielfältiger Natur sein und sind im Einzelnen in diesem Artikel beschrieben.

Beides wird im Begriff der „Reife“ bei Komposten untrennbar miteinander verknüpft. Dies bedeutet, dass keiner der beiden Zustände bzw. Eigenschaftsbereiche alleine geeignet ist, die Reife eines Kompostes vom Grundsatz her hinlänglich und bzgl. einer sicheren pflanzenbaulichen Anwendung adäquat zu beschreiben.

Die zur Bestimmung dieser Zustände bzw. Eigenschaftsbereiche geeigneten Qualitätsparameter im Gütesicherungssystem des RAL GZ Kompost sind primär:

- der Rottegrad (Methode: Selbsterhitzungstest oder Atmungsaktivität)
- die Pflanzenverträglichkeit (Methode: Keimpflanzentest mit Sommergerste) und
- die N-Stabilität (Methode: Modifizierter „Zöttl-Test“).

Die Erfassung dieser Qualitätsparameter ist zentral und bei Einsatz der Komposte in Kultursubstraten für den Erwerbsgartenbau aus Sicht der Autoren zwingend. Punktuell kann für diesen Anwendungsbereich darüber hinaus auch die Bestimmung der „gasförmigen Phytotoxen“ wesentlich sein. Weitere, als „Hilfsparameter“ zur Beschreibung der Kompostreife einzustufende, Qualitätsparameter sind das C/N-Verhältnis und der NO_3-N-Anteil am gesamten löslichen N.

Zur Beschreibung der Reife und Einsatzfähigkeit der Komposte in weniger anspruchsvollen Einsatzbereichen können einzelne der o. g. Qualitätsparameter entfallen. Dies gilt im Hinblick auf den Komposteinsatz in Blumenerden für den Hobbybereich und selbstverständlich auch für die Kompostanwendung im Freiland insbesondere bzgl. der Analyse der N-Stabilität und der gasförmigen Phytotoxen.

Bei der Bestimmung des Rottegrades, der den Zustand eines Kompostmaterials bzgl. noch vorhandener gut mikrobiell umsetzbarer organischer Substanz entsprechend o. g. Definition beschreibt, ist die bisher verwendete Methode des Selbsterhitzungstestes für die Gütesicherung von Biogutkomposten geeignet und bietet Vorteile im Hinblick auf geringen Analysenaufwand sowie einfache Handhabbarkeit auch bei der Eigenüberwachung auf den Kompostierungsanlagen. Hingegen ist diese Methode zur Bestimmung des Rottegrades bei der Analyse von Grüngutkomposten mit Fehlern behaftet und besonders bei Grüngutkomposten mit höheren Holzanteilen ungeeignet.

Nach ersten Ergebnissen aus dem Projekt TerÖko liefert für solche Komposte die Bestimmung der Atmungsaktivität (hier AT_4) sicherere Werte zum Rottezustand und zur Stabilität. Aufgrund des aktuell noch zu geringen Datenumfangs sind allgemeine Schlussfolgerungen aus diesen Ergebnissen bisher jedoch nicht möglich. Auch stellen sich weitergehende Fragen wie z. B. die nach der Bezugsbasis der gemessenen Kennwerte (TM/oTM?), der Testlaufzeit (AT_4 oder AT_{10}?) und der adäquaten Richtwerte je nach Anwendungsgebiet der Komposte. Diese Fragen sollen im Rahmen der noch laufenden Arbeiten des Projektes TerÖko in Zusammenarbeit mit der BGK beantwortet und die Ergebnisse in einer zweiten Veröffentlichung beschrieben werden.

Summary

This article provides an overview of the determination of ‘maturity’ of bio waste and green waste composts based on key quality parameters that are commonly used in the RAL quality assurance for compost of the German Compost Quality Assurance Association (BGK). A special focus is also placed on the description of the correlation between the necessary maturity and the area of application of the composts. This applies in particular to the use of compost in horticultural soils and growing media.

The article is based on key results from various R&D projects carried out by PlanCoTec-Gottschall and ISA-Ingenieurbüro für Sekundärrohstoffe between 1996 and 2024, supplemented by current data from the RAL quality assurance for compost of the BGK, initial results from the ongoing ‘TerÖko’ R&D project and selected literature.

The ‘maturity’ of a compost subsumes two central states or property areas:

a) the state of an advanced to ‘completed’ rotting process, which, compared to the start of the composting process, has left only small residues of organic matter with good microbial conversion capability in the composted material and

b) the assured avoidance of plant-damaging effects caused by factors in the compost used that reflect a lack of maturity or unfavourable rotting conditions during composting. These factors can be of various kinds and are described in detail in this article.

Both are inextricably linked in the term ‘maturity’ of composts. This means that neither of the two states or property areas alone is suitable for adequately describing the maturity of a compost in principle and a safe plant cultivation.

The quality parameters in the RAL GZ Compost quality assurance system that are suitable for determining these central states or property areas are primarily

- the degree of decomposition (method: self-heating test or respiration activity)
- plant compatibility (method: seedling test with spring barley) and
- the N-stability (method: modified 'Zöttl-Test').

The determination of these quality parameters is central and, from the authors' point of view, mandatory for the use of composts in growing media for commercial horticulture. In addition, the determination of 'gaseous phytotoxins' may also be essential for this area of application. Other quality parameters that can be categorised as 'auxiliary parameters' for describing compost maturity are the C/N ratio and the NO_3-N proportion of total soluble N.

To describe the maturity and suitability of composts for less demanding applications, some of the above quality parameters can be omitted. This applies with regard to the use of compost in potting soils for the consumer and hobby sector respectively, and, of course, also for compost applications in the field, particularly with regard to analysing N stability and gaseous phytotoxins.

When determining the degree of decomposition, which describes the condition of a compost material with regard to the organic matter that is still readily convertible by microbes in accordance with the above definition, the self-heating test method used to date is suitable for the quality assurance of biowaste composts and offers advantages in terms of low analysis costs and ease of handling, including for self-monitoring at composting plants. On the other hand, this method for determining the degree of decomposition when analysing green waste composts is subject to errors and is particularly unsuitable for green waste composts with a high wood content.

According to initial results from the TerÖko project, the determination of respiration activity (in this case AT_4) provides more reliable measurement values for the rotting condition and stability of such composts. However, due to the currently still too small amount of data, it is not yet possible to draw general conclusions from these results. Further questions also arise, such as the reference basis for the measured characteristic values (dry matter/organic dry matter?), the test duration (AT_4 or AT_{10}?) and the adequate reference values depending on the area of application of the composts. These questions will be answered as part of the ongoing work of the TerÖko project in co-operation with the BGK and the results will be described in a second publication.

---

[1] Ralf Gottschall (PlanCoTec – Gottschall und ISA-Ingenieurbüro f. Sekundärrohstoffe, Abfall- und Kreislaufwirtschaft); Heidi Hauke (PlanCoTec – Gottschall)[*] s. „in Memoriam“ S. 50

[2] Dr. Christian Bruns (Fachgebiet ökologischer Land- und Pflanzenbau d. Univ. Kassel)

[3] Prof. Dr.-Ing. (em.) Martin Kranert (ISWA d. Univ. Stuttgart),

Corresponding lead author: r.gottschall@oeko-kompost.de

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung **1**
Summary **2**
1 Problemstellung und Zielsetzung **5**
1.1 Biogut- und Grüngutkomposte als Torfersatzstoffe 5
1.2 „Reife“ von Komposten als ein zentraler Parameter bei deren Einsatz in Gärtnerischen Erden und Kultursubstraten 6
2 Material und Methoden, Definition „Reife“ von Komposten **8**
2.1 Kompostierung, Analyseverfahren 8
2.2 Definition des Begriffs „Reife“ von Komposten 9
2.3 Parameter zur Bestimmung der „Kompostreife“ in der RAL-Gütesicherung Kompost 11
3 Ergebnisse **13**
3.1 Parameter zur Bestimmung der Reife von Biogut- und Grüngutkomposten 13
3.1.1 Das C/N-Verhältnis 13
3.1.2 Der Nitratanteil am löslichen Stickstoff 15
3.1.3 Der „Rottegrad“ zur Definition von biologischer Restaktivität und Rottefortschritt 16
3.1.4 Pflanzenverträglichkeit 22
3.1.5 Stickstoff-Immobilisation 26
3.2 Einfluss der Siebfraktionierung auf die Komposteigenschaften und insbesondere das C/N-Verhältnis 28
3.3 Zusammenhänge zwischen den diskutierten Reifeparametern und Aussagekraft dieser Parameter bzgl. des Einsatzes von Grüngutkomposten in Kultursubstraten 29
3.3.1 C/N-Verhältnis und N-Immobilisation bzw. Pflanzenverträglichkeit 29
3.3.2 NO_3-N-Gehalte und Pflanzenverträglichkeit bzw. Rottegrad 30
3.3.3 Rottegrad und Pflanzenverträglichkeit 30
3.3.4 Rottegrad und N-Immobilisation 32
3.3.5 Pflanzenverträglichkeit und N-Immobilisation 32
3.3.6 Übersicht zu den Zusammenhängen zwischen den einzelnen Reifeparametern anhand eines Praxisbeispiels 34
4 Diskussion **35**
4.1 Einfluss der Siebfraktionierung auf die Komposteigenschaften und die weitergehende Nutzung von Siebüberläufen aus der Grüngutkompostierung 35
4.2 Zusammenhänge zwischen den Reifeparametern und deren Aussagekraft bzgl. des Einsatzes von Grüngutkomposten in Substraten 37
4.2.1 C/N-Verhältnis, Pflanzenverträglichkeit und N-Immobilisation 37
4.2.2 NO_3-N-Anteil und Kompostreife 37
4.2.3 Rottegrad und Pflanzenverträglichkeit bzw. N-Immobilisation 39
4.2.4 Pflanzenverträglichkeit und N-Immobilisation 41
5 Fazit: Praxisrelevante Reifeparameter für Grüngutkomposte beim Einsatz in gärtnerischen Erden und Kultursubstraten **43**
Literatur 46
Danksagung / In Memoriam 50

1 Problemstellung und Zielsetzung

1.1 Biogut- und Grüngutkomposte als Torfersatzstoffe

Im Rahmen der Torfminderungsstrategie der Bundesregierung soll der Einsatz des primären Rohstoffs Torf in „Gärtnerischen Erden und Kultursubstraten“ (im Folgenden „Substrate“) v. a. im Hinblick auf den damit verbunden erheblichen Beitrag zur Freisetzung von klimarelevanten Gasen deutlich reduziert werden (*1*). Auch mehrere Firmen des LEH und im Bereich der DIY-Märkte haben angekündigt, zukünftig nur noch torfreduzierte oder torffreie Erden verkaufen zu wollen. Die Erdenbranche hat sich bereit erklärt, Torf in relevantem Maße zu ersetzen und ist für den Bereich der Kultursubstrate im Erwerbsgartenbau eine Selbstverpflichtung eingegangen, die eine Reduktion des Torfanteils um 30 % bis 2030 vorsieht (*2*).

Nach Daten des Industrieverbandes Garten (IVG) ist die Torfreduktion v. a. im Bereich der Blumenerden im Hobbybereich inzwischen deutlich vorangeschritten. Bereits 2022 wurde der durchschnittliche Torfanteil im „Consumer-Bereich“ (Erden für den Hobbygartenbau) auf 43 % reduziert, 2023 sank er weiter auf 41 % und 2024 auf 33 % (*3*). Bei den Kultursubstraten für den Erwerbsgartenbau lag der Torfanteil 2022 noch bei 77 % und sank 2023 auf 71 % bzw. 2024 auf 65 %. Trotz dieser erheblichen Verbesserungen wurden in Deutschland 2024 noch ca. 4,7 Mio. m^3 Torf in der Substratproduktion verarbeitet (*3*).

Ein besonderes Anliegen ist der Torfersatz für den ökologischen Landbau, v. a. in Bezug auf seine Prämissen einer nachhaltigen und umweltschonenden Produktion. Die Nachfrage nach Bio-Topfkräutern hat in den vergangenen Jahren stark zugenommen und die Bio-Branche ist daher bestrebt, passende alternative Substrate mit weniger Torfanteil zu verwenden. Aus diesem Anlass entwickelt ein Konsortium aus Wissenschaft, Beratung, Praxis und Erdenindustrie im BÖL-Projekt „TerÖko“ stärker torfreduzierte bis hin zu torffreien Substraten für die ökologische Topfkräuterproduktion. Dabei stehen Komposte als Torfersatzstoffe besonders im Fokus (*4, 5*).

Sucht man nach Torfersatzstoffen für den Substratbereich, so stößt man zwangsläufig auf die Komposte aus der getrennten Sammlung organischer Reststoffe des Siedlungsbereichs, also Grüngut- und Biogutkomposte. Diese sind sowohl im Hinblick auf ihre grundsätzliche Eignung als auch auf die davon kontinuierlich hergestellten großen Mengen bedeutende Torfersatzstoffe. Dies gilt bzgl. der sehr wichtigen chemischen Eigenschaften von Substratrohstoffen – also v. a. geringe Salz- sowie niedrige Chlorid- und Natriumgehalte – insbesondere für Grüngutkomposte, für Biogutkomposte jedoch nur in sehr geringem Umfang.

Untersuchungen an 470 Biogut- und Grüngutkomposten zeigten bereits in den Jahren 1992-95 , dass 66 % der Komposte aufgrund zu hoher Salzgehalte die Anforderungen der damaligen Gütebestimmungen für Substratkomposte (heute „RAL-GZ 251 Substratkompost“ der BGK) nicht einhielten, was insbesondere für die analysierten Biogutkomposte galt. Ähnlich kritisch stellte sich die Situation bzgl. der einzuhaltenden Na- und Cl-Gehalte in Substratkomposten dar: Lediglich 11 % der Biogutkomposte, jedoch 73 % der Grüngutkomposte hielten die Anforderungen der Gütebestimmungen bzgl. dieser beiden Elemente für die Zugabestufe „40 Vol.% Kompost im Substrat“ ein (*6*). Untersuchungen der LVG Hannover-Ahlem von knapp 100 Biogut- und Grüngutkomposten im o. g. Zeitraum zeigten, dass 80-87 % der Grüngutkomposte in für den Substrateinsatz unproblematischen Gehaltsstufen bei Na (0-250 mg Na/l FM) und Chlorid (0-500 mg Cl/l FM) lagen, hingegen nur 2-5 % der Biogutkomposte (*7*). In weitere Analysen der PlanCoTec-Gottschall ergab sich ein enger Zusammenhang zwischen Chlorid- und Salzgehalt in den Komposten (r^2= 0,86 ***, *6*).

Aufgrund der hohen Salz- und Nährstoffgehalte sind dementsprechend bei den Biogutkomposten nur relativ geringe Mengen bundesweit für den Substrateinsatz geeignet bzw. sind die realisierbaren Volumenanteile in Substraten gering. Biogutkomposte werden bei einigen Erdenwerken gleichwohl in kleinem Maßstab in Blumenerden für den Hobby-/Consumerbereich eingesetzt. Grüngutkomposte nehmen hingegen mit einer geschätzten Verwertungsmenge im gesamten Substratbereich von 1,6-1,8 Mio. m³ in 2024 bereits heute einen hohen Stellenwert beim Torfersatz ein (*3, 8, 19*). Auch bei den Grüngutkomposten kommt jedoch der weitaus größte Mengenanteil in Gärtnerischen Erden für den Hobby-/Consumerbereich zum Einsatz und gelangte mit rund 178.000 m³ in 2024 bislang nur wenig Kompost in Kultursubstrate für den Erwerbsgartenbau.

Fachliche Grundlage dieses Komposteinsatzes in Substraten sind die aus dem DBU-Förderprojekt „Substratentwicklung auf Kompostbasis“ abgeleiteten Normen insbesondere für den Bereich der chemischen Eigenschaften der Komposte zum Substrateinsatz, die seitens der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (BGK) in der „RAL-Gütesicherung 251 – Substratkomposte“ aufgegriffen wurden sowie die Anforderungen bzw. Regularien der Gütegemeinschaft Substrate für Pflanzen (GGS) für die verschiedenen Substrattypen (*6, 7, 9, 10, 11*).

1.2 „Reife“ von Komposten als ein zentraler Parameter bei deren Einsatz in Gärtnerischen Erden und Kultursubstraten

Vielfach wird inzwischen jedoch infrage gestellt, ob diese fachliche Grundlage bereits ausreichend für einen sicheren Komposteinsatz, insbesondere in Kultursubstraten für den Erwerbsgartenbau, ist (*12, 13*). Diese Fragestellung bedarf einerseits im Hinblick auf die notwendige Bereitstellung sehr hoher Mengen an geeigneten Grüngutkomposten im Rahmen einer erfolgreichen Torfersatzstrategie und andererseits bezüglich der immer wieder kommunizierten Praxisprobleme bei der Kompostverwertung im Substratbereich, sowohl seitens der Erdenindustrie als auch der Gartenbaubetriebe, einer eingehenden Analyse. Problemstellungen, die aus der gartenbaulichen Praxis bzgl. des Einsatzes von Grüngutkomposten in Substraten benannt werden, betreffen dabei insbesondere die notwendige Anpassung der Kulturführung v. a. aufgrund veränderterer physikalischer Substrateigenschaften, die mögliche N-Immobilisierung und Bedenken bzgl. des verstärkten Auftretens von Trauermücken.

Seitens des IVG und aus der Erdenwirtschaft werden v. a. folgende Problemstellungen bzgl. des Torfersatzes mit Grüngutkomposten bei der Substratherstellung angeführt (*12, 13*):

- Generell die mangelnde Verfügbarkeit von qualitativ geeigneten Ersatzrohstoffen für Torf, auch im Bereich der Grüngutkomposte, und oft erhebliche Qualitätsschwankungen bei den an die Erdenindustrie gelieferten Kompostchargen sowie vielfach noch zu hohe Salzgehalte.
- Eine erhebliche Unsicherheit bzgl. der „biologischen Stabilität“ und der „Reife“ der Komposte in Verbindung mit der Frage, welche Qualitätsparameter zur sicheren Beschreibung dieser Komposteigenschaften überhaupt geeignet sind, sowie Bedenken bezüglich möglicher „Nachrottephänomene“ unreifer Komposte im Substrat wie Verpilzung, Geruchsbelastungen und N-Immobilisation.

Während die Erdenindustrie dementsprechend in den unter 1.1 genannten Normen und Zertifizierungen eine gute fachliche Arbeitsgrundlage hinsichtlich der wesentlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften der Grüngutkomposte findet, besteht bzgl. der notwendigen Einhaltung bestimmter biologischer Eigenschaften durch die Komposte, insbesondere einer ausreichenden „Reife“ (siehe Kap. 2.2), nach wie vor eine Reihe grundsätzlicher Fragen.

Diese Fragestellungen betreffen die Möglichkeiten und Grenzen des Komposteinsatzes in Substraten ganz konkret und sind in hohem Maße praxisrelevant. „Unreife“ Komposte können in Substraten zu verschiedenen pflanzenbaulichen Problemen führen, ausgelöst v. a. durch eine „Nachrotte“ im

Substrat mit Verpilzung und Geruchsbelastungen sowie Sauerstoffzehrung im Wurzelbereich der Kulturen, durch Pflanzenunverträglichkeiten z. B. aufgrund von phytotoxischen Verbindungen im Kompost, und durch Stickstoffimmobilisierung (*6, 14, 20, 29, 32b, 34, 44, 45, 53*). Auch für „Hobbyerden“ sind solche Effekte inakzeptabel. Im Erwerbsgartenbau ist eine sichere Produktion mit höheren Kompostzusätzen im Substrat bei solchen Problemstellungen unmöglich.

Zur direkten Beschreibung von „Rottezustand“, „Kompostreife“ und „Pflanzenverträglichkeit“ werden derzeit im RAL GZ 251 Substratkompost der Parameter „Rottegrad“ anhand der Selbsterhitzung im Dewargefäß, Pflanzentests und die N-immobilisation über einen Zöttl-Test herangezogen (s. Kap. 2.3).

Hingegen wird die Rottegrad-Methode der „Atmungsaktivität“ (O_2-Zehrung/CO_2-Freisetzung) – im Gegensatz zu den Entwicklungen in der ersten Phase der getrennten Sammlung und Kompostierung von Bioabfällen – heute in Deutschland bei der Kompostanalyse kaum noch genutzt. Jedoch ist auf der EU-Ebene in den letzten Jahren eine intensive Diskussion zwecks Normierung des zur Atmungsaktivität ähnlichen OUR-Testverfahrens (Oxygen Uptake Rate), das allerdings im wässrigen Milieu durchgeführt wird, in Gang gesetzt worden (*15*). Dieser Test wird derzeit und gerade im Vergleich zu den deutschen Rottegrad-Methoden (Selbsterhitzung, Atmungsaktivität) auch innerhalb der BGK-Fachgremien diskutiert.

Daneben existieren Hinweise aus Praxis und Forschung bzgl. möglicher Aussagen zur Kompostreife über weitere Qualitätsparameter, insbesondere, den Gehalt an OTM bzw. TOC, das C/N-Verhältnis und den Anteil an NO_3-N am löslichen Stickstoff. Die beiden zuletzt genannten Parameter wurden bereits in den 1990er-Jahren in Belgien und Frankreich bei der Gütesicherung von Komposten zur Beschreibung der Kompostreife (mit) verwendet (*16*). In den 1980/1990er Jahren gab es darüber hinaus eine Reihe von Ansätzen, den Rottezustand im Rahmen eines Kompostierungsprozesses bzw. die Reife der Komposte auch über Parameter wie enzymatische Bestimmungen, Huminstoffanalysen, DOC-Gehalt (Eluat), Stoffgruppenanalysen etc. zu beschreiben, was sich jedoch letztlich aus verschiedenen Gründen nicht durchgesetzt hat (*14*).

Generell ist in diesem Kontext anzumerken, dass der weitaus größte Anteil der vorgenannten wissenschaftlichen Forschung zu den Themen „Reife“, Rottezustand“ und „biologische Stabilität“ in den letzten ca. 45 Jahren an Bioabfallkomposten durchgeführt worden ist. Grüngutkomposte sind erst im Zusammenhang mit deren zunehmender Verwertung im Bereich gärtnerischer Erden und Kultursubstrate in den letzten ca. 15-20 Jahren zunehmend in den Fokus gerückt (*1, 6, 14, 17, 18, 19, 20*).

Ob die o. g., bislang im Rahmen der RAL-Gütesicherung der BGK existierende Matrix zur Beschreibung der „Kompostreife“ gerade für die letztgenannten Grüngutkomposte und deren anspruchsvolle Einsatzzwecke (aktuell noch) ausreichend ist, wird im Bereich der Erdenproduktion, aber auch im wissenschaftlichen Kontext, in den letzten Jahren – z. T. kontrovers – diskutiert Im Fokus steht dabei insbesondere die Aussagefähigkeit des über die Selbsterhitzung bestimmten Parameters „Rottegrad“ als „Hauptindiz“ für die „Reife“ auch von Grüngutkomposten (*12, 22*). Zu dieser grundsätzlichen methodischen Problemstellung gesellen sich vielfach Informationsdefizite in den Fach- und Verkehrskreisen hinsichtlich der vorliegenden Forschungsergebnisse der letzten 30 Jahre, was die Aussagefähigkeit der o. g. „Reifeparameter“ anbelangt.

Zielsetzung der vorliegenden Veröffentlichung ist es daher zum einen, bislang bereits vorliegende wesentliche Forschungsergebnisse zur Bestimmung der „Reife“ bei Komposten und zu den dafür geeigneten Qualitätsparametern zusammenfassend darzustellen. Zum anderen werden erste Daten aus den aktuellen Untersuchungen im F u. E-Projekt „TerÖko“ zwecks Evaluierung der vorgenannten älteren Forschungsergebnisse und hinsichtlich möglicher Weiterentwicklungen vorgestellt. Insgesamt soll damit ein wesentlicher Beitrag für eine sichere Beschreibung der „Reife“ von Grüngutkomposten geleistet werden, was wiederum die Grundlage für einen erfolgreichen Einsatz dieser Torfersatzstoffe in Substraten sowohl für den Hobby- als auch für den Erwerbsgartenbau darstellt.

2 Material und Methoden, Definition „Reife“ von Komposten

2.1 Kompostierung, Analyseverfahren

Im Folgenden werden Ergebnisse vorgestellt, die mit professionell hergestellten Komposten, sowohl aus Versuchsanlagen als auch aus Praxisanlagen, erzielt wurden. Die jeweiligen Herstellungsprozesse sind den angegebenen Literaturquellen zu entnehmen. Die im Rahmen des F u. E.-Projektes TerÖko untersuchten Komposte stammen alle aus einer klassischen Mietenkompostierung, die je nach Anlage auf Kleinmieten (B: 2,50 m, H: 1,5 m – Versuchsanlage des Versuchsgutes Frankenhausen der Univ. Kassel), mittleren bis großen Mieten (B: 3,5-6 m, H: 1,80-2,5 m – Praxisanlagen Wernfeld und Ellershausen) und z. T. auch Trapezmieten zur hygienisierenden Vorrotte (B: 8-15 m, H: 3 m) durchgeführt werden.

Die Untersuchung der dokumentierten Qualitätsparameter der Komposte erfolgte generell nach den Standardanalysewerken der Bundesgütegemeinschaft Kompost bzw. des VDLUFA und der DIN – s. Übersicht in Tab. 1.

Tab. 1: Übersicht der Analysemethoden bei den in der Veröffentlichung vorgestellten Qualitätsparametern

Parameter	Einheit	Methode
NO_3-N ($CaCl_2$)	mg/l FM	MB Kap.III. A2.1: 2006-09
Glühverlust (GV, 450 °C)	% TM	DIN EN 13039: 2000-02
C (Kohlenstoff)	% TM	GV x 0,58 (MB Kap. III.B1.1: 2006-09)
N_t (Gesamtstickstoff)	% TM	DIN EN 16168: 2012-11
Pflanzenverträglichkeit (50 %)	% FM Kontrolle (Relativertrag)	MB Kap.IV. A3: 2006-09
Gasförmige Phytotoxen	% FM Kontrolle (Relativertrag)	MB Kap. IV. A4: 2006-09
Rottegrad		
- Maximaltemperatur	°C; Rottegradklasse (I-V)	MB Kap.IV. A1: 2006-09
- Atmungsaktivität (4 Tage = AT_4)	mg O_2/g TM	MB Kap.IV. A2: 2006-09
N-Stabilität (Freisetzung/Fixierung)	mg N/l FM	MB Kap. IV. A5: 2006-09

MB = Methodenbuch der Bundesgütegemeinschaft Kompost (*23*)

Hinweis in Bezug auf die Bestimmung von Kohlenstoff/organischem Kohlenstoff aus Komposten

In Bezug auf die in Tab. 1 angeführten Analyseverfahren zur Bestimmung des organischen Kohlenstoffs in Komposten, der für die Ermittlung der mikrobiellen Umsetzungen eine zentrale Bedeutung besitzt, ist auf folgende Zusammenhänge hinzuweisen:

a) Wie vielfach üblich wird der organische Kohlenstoff auch im Rahmen der Analysen nach RAL GZ 251 der BGK über den Glühverlust bestimmt, in diesem Fall bei 450 °C. Dabei wird – anders als bei der Bestimmung des Glühverlustes bei 550 °C – der allergrößte Teil der Organik erfasst (95-

98 % – *24*), jedoch nur ein kleiner Teil des Carbonatanteils, sofern im Kompost vorhanden. Der „organische Kohlenstoff“ wird dann rechnerisch über den Masseverlust multipliziert mit dem Faktor 0,58 ermittelt. Die in der vorliegenden Veröffentlichung aufgeführten C-Werte von Komposten, die i.d.R. nach dieser Methode bestimmt wurden, beinhalten damit einen (kleinen) Fehler, da ein mehr oder minder großer Anteil an anorganischem Kohlenstoff miterfasst wurde.

b) Biogut- und Grüngutkomposte können sehr unterschiedlich hohe Anteile an Carbonat enthalten. Die Gehalte an basisch wirksamen Stoffen (BWS), die i. d. R. wiederum zum allergrößten Teil aus Carbonaten bzw. Hydrogencarbonaten bestehen und im Rahmen des RAL GZ 251 Kompost bestimmt werden, variieren in diesen Komposten in einer weiten Spanne zwischen 2-15 % d. TM, wobei hier der Standort- (Boden-) Einfluss ausschlaggebend ist. In Extremfällen können vorgenannte Werte auch über- oder unterschritten werden. Dieser Zusammenhang macht deutlich, dass der o. g. mögliche Analysenfehler hinsichtlich der Bestimmung des organischen Kohlenstoffs stark davon abhängt, woher der Kompost stammt.

c) In Bezug auf die o. g. Ausführungen wird im vorliegenden Artikel daher bei den Ausführungen zum „C/N-Verhältnis“ nicht von „$C_{org.}$“ gesprochen, sondern nur allgemein von „C“, da bedingt durch die Analysenmethode zwar der weitaus größte Teil des organischen Kohlenstoffs erfasst wird, aber nicht der gesamte Anteil und außerdem, je nach Kompost, ein mehr oder minder großer Teil an anorganischem Kohlenstoff.

d) Die früher übliche Methode, mit einer Säurebehandlung der Probe den o. g. „Carbonatfehler“ bei der Bestimmung des organischen Kohlenstoffs zu eliminieren, wird heute nicht mehr standardmäßig angewendet, da dies aufwendig ist und zu einem erhöhten Verschleiß der Analysengeräte führen kann. Vielmehr gelangt zunehmend die z. T. vereinfacht als „Rampe“ bezeichnete DIN EN 17505 aus 2023/24 („Temperaturabhängige Unterscheidung von Gesamtkohlenstoff“) zur Anwendung (TOC 400, ROC, TIC 900), die eine eindeutige Erfassung der organischen und anorganischen Anteile des Kohlenstoffs in einer Boden- oder Abfallmatrix ermöglicht (*24*). Da nur sehr wenige der in der vorliegenden Veröffentlichung dargestellten Analysenwerte mit dieser neuen Methode erfasst wurden, wird aufgrund einer als sinnvoll angesehenen Vereinheitlichung der Angaben im Folgenden jedoch generell nur von „C“ bzw. vom „C/N-Verhältnis“ gesprochen.

2.2 Definition des Begriffs „Reife“ von Komposten

Wenn Aussagen zu Eigenschaften wie der „Reife“ eines Kompostes bzw. zu den geeigneten Qualitätsparametern zur Beschreibung dieses Reifezustandes getroffen werden sollen, ist es unabdingbar, zunächst eine Definition dieser „Kompostreife“ vorzunehmen. Im Vergleich zu dieser Definition können dann die bei den Komposten gefundenen Eigenschaften und die Ergebnisse der verschiedenen Qualitätsparameter zur Bestimmung der Reife bewertet und eingeordnet werden.

In diesem Kontext ist zunächst festzustellen, dass die Begrifflichkeit „reifer Kompost“ im allgemeinen Verständnis einen weit fortgeschrittenen bis „fertigen“ Kompostierungsprozess unterstellt, der zu einem „guten, erdigen“ Produkt führt, das generell vorteilhaft und ohne Schadwirkungen im Pflanzenbau einsetzbar ist. Der Begriff „reif“ subsummiert damit also (zumindest) zwei Bereiche, deren Differenzierung grundsätzlich wichtig ist, wie die in Kap. 3 dargestellten Ergebnisse zeigen:

a) den **Zustand** einer **weit fortgeschrittenen bis „abgeschlossenen“ Rotte**, die im Vergleich zum Beginn des Kompostierungsprozesses nur noch geringe Reste gut mikrobiell umsetzungsfähiger organischer Substanz im kompostierten Material hinterlassen hat,

b) die **sichere Vermeidung pflanzenschädigender Wirkungen** durch Faktoren im eingesetzten Kompost, die eine mangelnde Reife oder ungünstige Rottebedingungen während der Kompostierung widerspiegeln. Diese Faktoren können vielfältiger Natur sein und sind im Einzelnen in Kap. 3.1.4 beschrieben.

Die vorgenannte Differenzierung ist schon deshalb wichtig, weil zahlreiche Begriffe wie „Reifegrad“, „Rottezustand/Rottegrad“, „(biologische) Stabilität“ und „Pflanzenverträglichkeit“ zur Beschreibung des Phänomens „Reife“ bei Komposten genutzt und z. T. auch synonym verwendet werden, obwohl sie zumindest partiell unterschiedliche Eigenschaftsbereiche ansprechen. Darüber hinaus umfasst der Begriff „Reife“ bei Komposten aus Sicht der Autoren*in eben beide o. g. Zustände bzw. Eigenschaftsbereiche, also eine **weitgehend abgeschlossene Rotte** *und* die **Pflanzenverträglichkeit in allen pflanzenbaulichen Anwendungsbereichen**. Beides wird im Begriff **„Reife“ bei Komposten** untrennbar **miteinander verknüpft.**

Hingegen beschreibt der „Rottezustand/Rottegrad“ alleine und für sich gesehen eben genau nur diesen, **zum jeweiligen Analysezeitpunkt festgestellten Zustand im Kompostierungsprozess**, während die „Pflanzenverträglichkeit“ separat betrachtet **zunächst ausschließlich den möglichen schadlosen Einsatz** des Kompostes im Pflanzenbau im Hinblick auf fehlende pflanzenschädigende Wirkungen anspricht. Aus Letzterem sind orientierende, aber keine sicheren Rückschlüsse auf den erstgenannten „Rottezustand“ möglich. Denn tatsächlich steigt die Wahrscheinlichkeit einer guten Pflanzenverträglichkeit mit zunehmender Rottezeit, jedoch gibt es auch „junge/frische“ Komposte, die erst einen kurzen Kompostierungsprozess vollzogen haben und trotzdem in den diversen Testverfahren pflanzenverträglich sind (*6*).

In den Kap. 3 und 4 werden diese Zusammenhänge detailliert diskutiert. Für den Bereich „Rottezustand/Rottegrad/(biologische) Stabilität“ soll vorab jedoch noch eine weitere Beschreibung und Definition erfolgen, da zum einen die BioAbfV in1992/2022 (*25*) als wesentliches Regelwerk in Deutschland den Kompostierungsprozess als „eine Behandlung zur Hygienisierung und biologischen Stabilisierung“ beschreibt und zum anderen der Parameter „Rottegrad“ nach wie vor ein, wenn nicht sogar *das zentrale*, Kriterium zur Charakterisierung der „Reife“ eines Kompostes in den Gütesicherungssystemen für Komposte darstellt.

Dabei wurde die Diskussion um eine eindeutige, verifizierbare Definition und die analytische Bestimmung des Rottegrades sowie der entsprechenden methodischen Grundlagen bereits in der Ära der MKK-Müllklärschlammkomposte in den 1960-1980er-Jahren geführt (*26, 27*). Im Übergang zur Bioabfallkompostierung in den 1980/1990er-Jahren wurde der Rottegrad neben seiner theoretischen Natur zur Beschreibung des aktuellen Rottezustandes im Rahmen eines kontinuierlichen Kompostierungsprozesses vielfach sehr praxisrelevant als Auslegungs- und Gewährleistungskriterium für Kompostierungsanlagen genutzt, in Regelwerke zur Gütesicherung von Komposten wie das LAGA-M 10 und die RAL-Gütesicherung der BGK aufgenommen sowie von manchen darüber hinaus sogar als „universeller“ Parameter zur Beschreibung der „Kompostreife“ angesehen (*14*).

Umfassende Untersuchung zum Rottegrad wurden 1988 von Jourdan (*26*) durchgeführt und hieraus als Bestimmungsmethoden Selbsterhitzung und Atmungsaktivität vorgeschlagen. In der Fassung des Merkblatts M 10 der LAGA-Länderarbeitsgemeinschaft Abfall von 1995 wird die Selbsterhitzung als Bestimmungsmethode des Rottegrades festgelegt und selbiger wie folgt definiert: „Der Rottegrad von Komposten gibt darüber Auskunft, inwieweit die biologisch leicht abbaubare organische Substanz umgesetzt wurde, kennzeichnet den aktuellen Stand der Rotte und stellt eine Stufe auf einer allgemein gültigen Skala von Kennwerten dar, die den Rottefortschritt vergleichbar charakterisieren“ (*27*). Eine Beschreibung dieser Historie und der fortschreitenden Erkenntnisse sowie der vielfältigen wissenschaftlichen Ergebnisse zum Thema aus ihren eigenen Untersuchungen ist der umfassenden

Arbeit von Becker (*14*) zum „Rottegrad als Gewährleistungskriterium für Kompostierungsanlagen“ zu entnehmen.

Die **klassische abfallwirtschaftliche Definition der Kompostreife,** die entsprechend o. g. Ausführungen **vielfach mit dem Rottezustand/Rottegrad gleichgesetzt** wurde und wird, sagt also aus, dass in reifen aerob aufbereiteten (kompostierten) Materialien die mikrobielle Aktivität zum Abbau leicht umsetzbarer organischer Substanz zwecks Deckung des mikrobiellen Betriebs- und Baustoffwechsels weitestgehend zurückgegangen ist. Die restliche mikrobielle/biologische Aktivität (ggf. im Verbund mit Aktivitäten der Meso- und Makrofauna unter spezifischen Kompostierungsbedingungen) führt im Wesentlichen zu Umbau- und z. T. zu Aufbauvorgängen höher polymerer Strukturen (*28, 29, 30*). Dies bedeutet zwangsläufig auch, dass organische Stoffgruppen, die leicht (Zucker, Stärke, Proteine, Fette) bis mittelschwer (Hemizellulosen, Pentosane und z. T. Zellulosen) mikrobiell abbaubar sind, zuvor bereits zum größten Teil umgesetzt wurden. Damit wird dem Material, dass dann auch eine völlig andere Morphologie aufweist, eine weitgehende „(biologische) Stabilität“ zugewiesen.

Im Wesentlichen ist dies also eine Definition, die auf eine **„geringe biologische Restaktivität“** fokussiert ist und damit auf **stark reduzierte Umsetzungsraten organischer Substanz** sowie entsprechend geringe CO_2-Freisetzungsraten bzw. O_2-Zehrungsraten aus bzw. bei einem reifen Kompost. Eine hohe biologische Restaktivität bedingt durch noch vorhandene größere Anteile an mikrobiell gut umsetzbarer organischer Substanz im Material zeigt demgegenüber an, dass der Kompostierungsprozess noch nicht abgeschlossen und der Kompost dementsprechend nicht „ausgereift“ oder „stabil“ ist.

Denn der mikrobielle Ab- und Umbau der organischen Substanz sollte weitestgehend während des Kompostierungsprozesses abgeschlossen sein, sofern „Fertigkomposte“ erzeugt werden sollen, die entsprechend der Definition nach 2.2. a) und b) ausreichend reif sind, wie dies Voraussetzung für den Komposteinsatz in Kultursubstraten ist. „Frischkomposte“ mit noch wesentlichen Anteilen an mikrobiell leicht abbaubarer organischer Substanz, die erst nach der pflanzenbaulichen Anwendung der Komposte im Boden umgesetzt wird, sind hingegen für diesen Zweck ungeeignet und werden nur im Freiland eingesetzt (s. Kap. 3).

Wie bereits Becker (*14*) ausführte ist der über Selbsterhitzung bzw. Atmungsaktivität bestimmte Rottegrad dementsprechend als eine biologische Messgröße zu betrachten und als indirektes Maß für noch vorhandene abbaubare organische Substanz.

2.3 Parameter zur Bestimmung der „Kompostreife“ in der RAL-Gütesicherung Kompost

Rein **phänologisch** wird die zunehmende **Reife im Kompostmaterial** v. a. daran festgemacht, dass:

a) das Material visuell als „gut und erdig“ einzustufen ist (Rohmaterialstrukturen nicht oder kaum noch erkennbar, keine Geruchsbelastungen, krümelig, dunkel, humos),
b) nur noch eine geringe oder gar keine Erhitzung mehr in den Rottekörpern stattfindet (sofern diese nicht so groß sind, dass durch Wärmestau selbst bei geringer Freisetzung von Wärmeenergie noch hohe Temperaturen erreicht werden),
c) beim pflanzenbaulichen Einsatz keine „Nachrotte-Erscheinungen“ im Substrat auftreten (z. B. „Verschimmelung“ oder anderweitige Pilzbesiedelung (Basidiomyceten), Keimhemmungen, supprimiertes Wurzelwachstum durch Sauerstoffkonkurrenz etc.).

Bezüglich der **Erfassung spezifischer Komposteigenschaften** ist die „Reife“ im **RAL-Gütezeichen 251 Substratkompost** der BGK (*9*) im Wesentlichen durch **folgende Qualitätsparameter definiert**:

a) **Rottegrad** (RG) V im Selbsterhitzungstest,

b) **Pflanzenverträglichkeit** (PV) im Keimpflanzentest mit Sommergerste (> 80 % Relativertrag im Vergleich zur Kontrolle in der 50 Vol.%-Zugabestufe des Kompostes),

c) keine Freisetzung **gasförmiger Phytotoxen** (Test mit Kresse im geschlossenen Gefäß),

d) **Stickstoffneutralität** (keine N-Immobilisation > 125 mg N/l FM im Zöttltest).

Diese Parameterkatalog umfasst die nach bisherigem Kenntnisstand wichtigsten Parameter, einige **weitere in Kapitel 3 „Ergebnisse“ angeführte Qualitätsparameter**, die Hinweise auf die Kompostreife geben könnten, sind hier noch nicht enthalten, was bei den jeweiligen Punkten angesprochen wird.

Weiterhin werden mit/durch die o. g. Parameter/Richtwerte “Basisanforderungen“ festgelegt, die aus Sicht der Autoren*in bei anspruchsvollen Einsatzgebieten, wie gerade für Komposte als Bestanteile von Kultursubstraten für den Erwerbsgartenbau auf jeden Fall einzuhalten sind. Bereits der **nicht eingehaltene Richtwert bei einem dieser Parameter** zeigt an, dass der Kompost nicht für den Einsatz in gärtnerischen Erden und Kultursubstraten geeignet ist.

3 Ergebnisse

3.1 Parameter zur Bestimmung der Reife von Biogut- und Grüngutkomposten

3.1.1 Das C/N-Verhältnis

3.1.1.1 Das C/N-Verhältnis als Kennziffer für Verarbeitbarkeit und Rotteeignung organischer Reststoffe

Das Verhältnis von gesamtem organischem Kohlenstoff zu Gesamt-Stickstoff (vielfach vereinfacht als C/N-Verhältnis bezeichnet) wird **primär** als Kennziffer zur **Bewertung der Verarbeitbarkeit und Rotteeignung eines organischen Reststoffes** im Rahmen der aeroben bzw. anaeroben Prozessführung (Kompostierung bzw. Vergärung) verwendet. Bei der Kompostierung werden bezüglich der Rohmaterialien vielfach Werte für das C/N-Verhältnis zwischen 20-30 als optimal für den Einstieg in den Rotteprozess angegeben (*28, 29*).

Grüngut mit höheren Holzanteilen liegt – z. T. sehr deutlich – über dieser Spanne (Tab. 2), was in der Praxis vielfach dazu führt, dass zum Rottebeginn zusätzlich ein leichtlöslicher N-Dünger oder leicht umsetzbare Pflanzenmaterialien mit hohen N-Gehalten beigemischt werden. In verschiedenen Versuchen ließen sich C/N-Verhältnisse von holzigem Grüngut zwischen 32-36 zum Rottebeginn durch Zugabe von bis zu 3 kg N/m³ FM als Harnstoff bis auf Werte von 23-25 absenken (*31*).

Hervorzuheben ist, dass sich dementsprechend mit zunehmendem Anteil holziger/verholzter Bestandteile (überständiges Pflanzenmaterial, Laub, Rinde, Gehölzschnitt) das C/N-Verhältnis in der Inputmischung der Kompostierung ausweitet. So stieg z. B. durch die Zugabe von 40 Vol. % an Holzhäcksel zu Bioabfällen das C/N-Verhältnis bei Fricke et. al. in einem Sommerversuch von 23,9 auf 29,0 und im Winter von 27,5 auf 34,0 (*31*). Die Erweiterung des C/N-Verhältnisses ist dabei ein Effekt sowohl der sehr hohen Organikgehalte in v. a. Rinden und Holzhäcksel (77-92 % OM d. TM) gerade im Vergleich zu gemischten Bioabfällen (30-70 % OM d. TM) als auch der verhältnismäßig geringen N_t-Gehalte holziger Materialien (0,6-0,9 % N_t d. TM; gemischte Bioabfälle: 0,85-1,2 % N_t d. TM – 31, s.a. Kap. 3.2).

Die relativ geringen Gesamtnährstoffgehalte und damit auch geringen Salzgehalte holz- und rindenreicher Materialien führen außerdem bei höheren Zugaben solcher Materialien zu Biogut aber auch zu nährstoff- und salzreichem Grüngut zu einer Absenkung der Salzgehalte in den fertigen Komposten. So reduzierte sich der Salzgehalt der gewonnen Biogutkomposte in den o. g. Untersuchungen mit Holzhäckselzuschlag um bis zu ca. 20 % in den verschiedenen Jahreszeiten auf Werte um 3 g KCl/l FM (*31*).

Umgekehrt weisen sehr leicht umsetzbare Pflanzenmassen/organische Reststoffe wie Grasschnitt, organische Küchenabfälle oder Hydrolysereste hohe Nährstoff- und Salzgehalte auf, sowie mit 14-20 bereits ähnlich enge C/N-Verhältnisse wie diese oft für fertige Komposte angegeben werden, obwohl es sich hierbei noch um Rohmaterialien oder wie bei Gärgut/Hydrolyserest um ein halbfertiges Produkt handelt, das erst noch über eine Nachrotte zu Kompost verarbeitet werden muss. Salzgehalte grasreicher Grüngutkomposte im Sommer über 5 g KCl/l FM sind daher durchaus nicht unüblich, wobei der Salzgehalt bei solchen Komposten meist über hohe lösliche N- und K-Gehalte erzeugt wird und wenig über erhöhte Na-/ Cl-Gehalte (*6, 32, 32a, 32 b*).

Bzgl. der Praxisrelevanz ist weiterhin zu konstatieren, dass sich die Entnahme holziger Materialien aus dem Grüngut-Input zwecks thermischer Verwertung auf die Substrateignung der anschließend gewonnenen Grüngutkomposte negativ auswirkt, v. a. im Hinblick auf ansteigende Salzgehalte.

Tab. 2: Beispiele für C/N-Verhältnisse in Rohmaterialien zur Kompostierung und in Biogut- bzw. Grüngutkomposten (nach verschiedenen Autoren [1)-7)])

Material	Rohmaterialien					
	Biogut [1)] Witzenhausen	Grüngut holzig Ellershausen [2)]	Siebüberlauf Grüngut (10 - x mm) [2)]	Holzhäcksel [3)]	Rinde [3)]	Hydrolyserest aus Bioabfällen [4)]
Median	k.A.	k.A.	83	75	51	k.A.
Bereich	22 - 32	31 - 64	63 - 96	69 - 80	k.A.	14 -15

Material	Frisch- und Fertigkomposte				
	Biogutkomposte Witzenhausen [1)]	TerÖko Modell- und Praxiskomposte [5)]	Hydrolyserest-Komposte [4)]	Grüngutkomposte Bund	Biogutkomposte Bund
Median	15	k.A.	k.A.	19,0 [6)]	14,9 [7)]
Bereich	10 - 20	14,4 - 22,9	10,6 - 12,0	13,6 - 28,8 [8)]	11,5 - 20,8 [8)]

k.A. = Keine Angabe

1) Biogut bzw. Biogutkomposte aus der getrennten Sammlung des Pilotprojektes Witzenhausen, (n = 70, Fricke et. al., 1989 – (*31*))
2) Holziges Grüngut aus Landkreisanlieferungen auf die Kompostierungsanlage 2021-2023 (n = 6, Gottschall, 2023 – (*33*))
3) Im Pilotprojekt „Grüne Biotonne Witzenhausen" eingesetzte Zuschlagsstoffe (n = jeweils 10; Fricke et. al., 1989 – (*31*))
4) Projekt „Kompostierung von BTA-Hydrolyserest" (n = 2, Gottschall et. al., 1995 – (*34*))
5) Im Rahmen des F u. E-Projektes hergestellte Modell- und Praxiskomposte aus Grüngut (Versuchsbetrieb Frankenhausen, Kompostanlagen Ellershausen und Wernfeld; n = 5; Bruns und Gottschall, 2023 – (*35*))
6) Grüngutkomposte aus der bundesweiten RAL-Gütesicherung 251; Daten der BGK aus 2022 (n = 1.985, Thelen-Jüngling, 2023 – (*36*))
7) Biogutkomposte aus der bundesweiten RAL-Gütesicherung 251; Daten der BGK aus 2022 (n = 1.890, Thelen-Jüngling, 2023 – (*36*))
8) Bereichsangaben: unterer Wert: 10 % Quantil, oberer Wert: 90 % Quantil

3.1.1.2 Das C/N-Verhältnis als Kennziffer zur Bewertung des Rottefortschritts und der Reife eines Kompostes

Über die Bedeutung des C/N-Verhältnis als Kriterium zur **Beurteilung der Inputeignung** für den Kompostierungsprozess hinaus wird es vielfach auch als Kennziffer für die Bewertung des **Rottefortschritts** im Kompostierungsprozess und z. T. auch der **Kompostreife** herangezogen.

Tab. 2 fasst die C/N-Verhältnisse einiger typischer organischer Reststoffe/Rohmaterialien zusammen und gibt weiterhin oft gefundene Bereiche des C/N-Verhältnisses für die daraus gewonnen Komposte an. In Abb. 1 wird darüber hinaus der typische Verlauf des C/N-Verhältnisses unterschiedlicher Rohmaterialien im Rahmen eines Kompostierungsprozesses über unterschiedlich lange Zeiträume dargestellt.

Die Daten der Tab. 2 und der Abb. 1 zeigen dabei einige sehr wesentliche Zusammenhänge auf.

- **Verschiedene** organische **Reststoffe**, die als Rohmaterialien typisch für die Kompostierung sind, können **extrem unterschiedliche C/N-Verhältnisse** aufweisen.
- Schwer **umsetzbare Rohmaterialien** der Kompostierung mit hohen Anteilen verholzter Materialien und entsprechend **weitem C/N-Verhältnis zum Rottebeginn** benötigen deutlich **längere Zeiten zur Einengung des C/N-Verhältnisses**, als Rohmaterialien mit engerem C/N-Verhältnis.
- Dementsprechend weisen Komposte, die aus den erstgenannten schwer umsetzbaren, holzigeren Materialien resultieren, meist auch bei **weit fortgeschrittenem Kompostierungsprozess und einer Kompostierungszeit von 9-12 Monaten noch eher weite C/N-Verhältnisse auf, die zwischen 18-25 l**iegen können.
- Die meisten Biogutkomposte und einige Grüngutkomposte aus leicht umsetzbaren grasig-krautigen Rohmaterialien zeigen hingegen bereits nach wenigen Rottemonaten relativ enge C/N-Verhältnisse zwischen z. B. 15-20, ohne dass damit zwingend bereits eine vollständig abgeschlossene Rotte angezeigt wird.

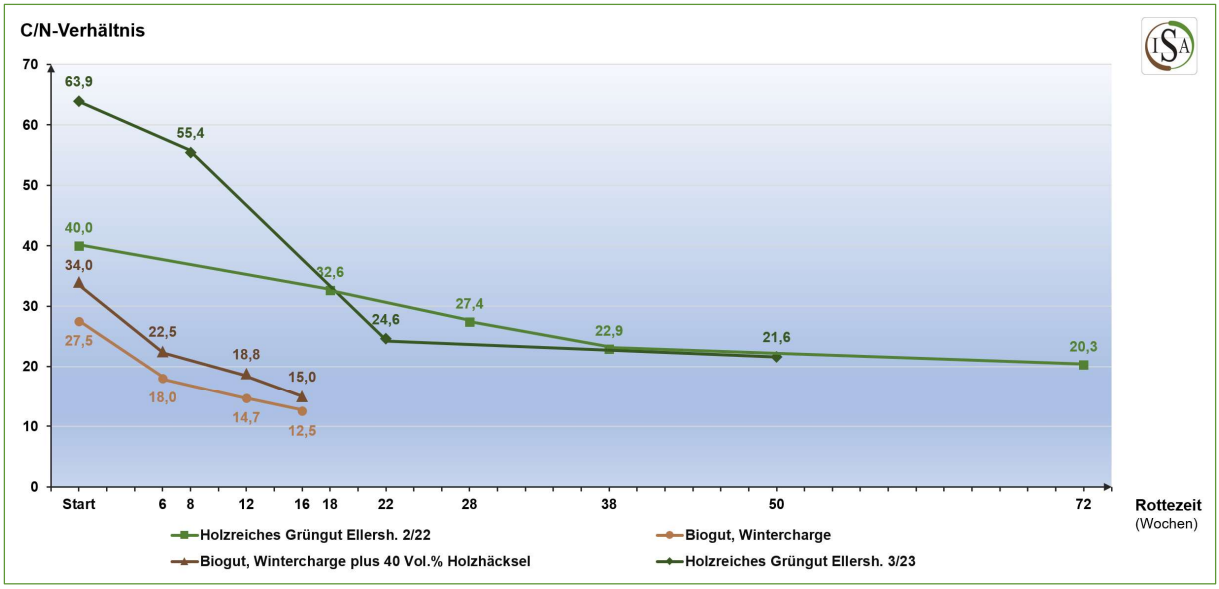

Abb. 1: Verlauf des C/N-Verhältnisses in Kompostierungsversuchen mit Biogut und Grüngut auf Praxisanlagen (*31, 35*)

Bereits im Rahmen der umfassenden Untersuchungen des o. g. DBU-Forschungsvorhabens an 470 Komposten bundesweit stellte man fest, dass pflanzenverträgliche Fertigkomposte (RG IV bzw. V) aus Grüngut mit 18,6 ein deutlich weiteres C/N-Verhältnis aufwiesen, als die entsprechend reifen und pflanzenverträglichen Biogut-/Bioabfallkomposte mit 14,9 (Medianwerte – *6*). Dies liegt im Wesentlichen an der Erfassung vielfach stärker verholzter Rohmaterialien bei der reinen Grüngutkompostierung im Vergleich zur Biogut-/Bioabfallkompostierung. Die Daten der RAL-Gütesicherung 251 Kompost der BGK geben aus der Analyse von 3.905 Komposten für 2023 ganz ähnliche Medianwerte an, nämlich 19,1 für Grüngutkomposte und 15,1 für Bioabfallkomposte (*37*).

Weiterhin ist festzustellen, dass die Sieblinie eines Kompostes einen starken Einfluss auf das gefundene C/N-Verhältnis ausübt. Gröbere Absiebungen im Bereich 0-20 mm bzw. 0-30 mm weisen höhere C/N-Verhältnisse auf als eine 0-10 mm-Siebung desselben Kompostes, da in der gröberen Sieblinie mehr holzige, meist noch nicht vollständig verrottete Anteile erfasst werden (s. Kap. 3.2).

Insgesamt machen diese Ausführungen bereits deutlich, dass es keine generelle und allgemeingültige Aussagefähigkeit des Parameters C/N-Verhältnis in Bezug auf den Reife-/Stabilitätsgrad eines Kompostes ohne Berücksichtigung weiterer Randbedingungen geben kann. Vielmehr müssen die gefunden Werte immer auch im Zusammenhang mit dem verarbeiteten Rohmaterial, der Kompostierungstechnik, der Rottezeit und der Sieblinie eines Kompostes betrachtet werden.

3.1.2 Der Nitratanteil am löslichen Stickstoff

Der NO_3-N-Anteil am gesamten löslichen Stickstoff im Kompost wird ähnlich wie das C/N-Verhältnis z. T. als Hinweis bzgl. der Reife eines Kompostes genutzt. Der Zusammenhang zwischen der Kompostreife und dem NO_3-N-Anteil ergibt sich aus der zunehmenden Nitrifizierung des löslichen N zum Rotteende und Abschluss der Kompostierung hin, wenn immer weniger umsetzungsträchtige organische Substanz im Kompost vorhanden ist und NH_4-N zunehmend in NO_3-N überführt werden kann. Denn mit einem geringeren Anteil an umsetzungsfähiger organischer Substanz ist die erste Voraussetzung gegeben, dass die Temperaturen bei der Kompostierung absinken, was wiederum Grundbedingung für die Nitrifizierung ist. Denn der mikrobielle Nitrifizierungsprozess (durch Nitrosomonas, Nitrobacter) ist stark temperaturabhängig. Erst wenn die Temperaturen im Kompost dauerhaft und

möglichst deutlich unter ca. 40 °C fallen, erfolgt eine Nitrifizierung, davor liegt der lösliche Stickstoff im Kompost fast ausschließlich als NH_4-N vor. Als zweite Voraussetzung gilt daher weiterhin, dass kein Wärmestau in der Miete auch in den späteren Rottephasen erfolgt, was bei großvolumigen Lagermieten jedoch sehr oft der Fall ist (s. Kap. 4.2.2).

Bei den in den pflanzenbaulichen Versuchen von TerÖko verwendeten Modell- und Praxiskomposten erfolgte i. d. R. eine lange Kompostierungszeit von mindestens 6, vielfach 8-12 Monaten. Die Modellkomposte der Versuchsanlage der Univ. Kassel wurden dabei auf kleinvolumigen Mieten (H = 1,8 m, B = 2,5 m beim Versuchsansatz) mit einer intensiven Rottetechnik, d. h. mehrfachem Umsetzen und kontinuierlicher Bewässerung hergestellt sowie nach der Hauptrotte auch auf Kleinmieten nachgerottet bzw. gelagert, so dass in diesen letzten Rottephasen im Kompostmaterial vielfach nur noch Umgebungstemperaturen herrschten. Unter diesen Bedingungen erfolgte eine Nitrifizierung im Material, die zu Nitratgehalten zwischen 20-85 mg NO_3-N/l FM führten. In den lange in Kleinkompartimenten gelagerten und daher erkalteten Versuchskomposten der Praxisanlage Wernfeld waren sogar Nitratgehalte über 200 mg NO_3-N/l FM zu finden, was 99 % des gesamten $N_{lösl.}$ ausmachte. Die mit einer sehr extensiven Verfahrenstechnik in der Praxisanlage Ellershausen auf 2,5-3 m hohen Trapezmieten hergestellten Komposte aus holzreichen Grüngut lagen hingegen selbst nach über einem Jahr Rottezeit erst im Bereich von 0-10 mg $N_{lösl.}$/l FM, wobei Nitrat nicht messbar war.

Im Gegensatz zu den o. g. speziellen Verhältnissen der Versuchskomposte lagen die 2023 im Rahmen der RAL-Gütesicherung gefundenen NO_3-N-Anteile am gesamten löslichen N von 3.905 Komposten in einem niedrigen bis sehr niedrigen Bereich, d. h. bei 2,7 % (Biogutkomposte, Median) bis 10,8 % (Grüngutkomposte, Median – *37*). Grüngutkomposte wiesen hierbei als Medianwerte 8,4 mg NO_3-N/l FM auf.

3.1.3 Der „Rottegrad“ zur Definition von biologischer Restaktivität und Rottefortschritt

3.1.3.1 Grundlagen und Messmethoden

Der Rottegrad ist einer der Hauptparameter zur Evaluierung des Rottefortschritts anhand der Bestimmung noch vorhandener umsetzungsfähiger organischer Substanz im Kompost (s. Kap. 2.2), der damit auch orientierende Rückschlüsse auf die Kompostreife zulässt. Die mikrobielle Umsetzung organischer Substanz führt bei den Rottegrad-Analysen:

a) im isolierten Spezialgefäß, dem sogenannten Dewargefäß, zu einer Temperaturerhöhung im Kompostmaterial aufgrund der freigesetzten Wärmeenergie (Test auf „**Selbsterhitzung“**) bzw.

b) kann anhand der O_2-Zehrung des Testmaterials gemessen werden (Test auf „**Atmungsaktivität“**).

Beide Analyseverfahren für den Rottegrad finden in der Praxis Anwendung. Der in Deutschland deutlich am weitesten verbreitete Rottegradtest bei Komposten ist jedoch die Messung der Selbsterhitzung. Auch in der Gütesicherung der BGK für das RAL-GZ 251 Kompost wird dieses Analyseverfahren standardmäßig angewendet. Ursprünglich wurde dabei neben der Maximaltemperatur während des Messzeitraums ($T_{max.}$) auch das Steigungsmaximum der Temperaturkurve ($S_{max.}$) und die Fläche unter der Temperaturkurve während eines 72-stündigen Messzeitraum (F_{72}) zur Beurteilung herangezogen. Aufgrund enger Korrelationen zwischen diesen Kenngrößen (*38*) und im Hinblick auf die einfache Bestimmung kommt inzwischen jedoch praktisch nur noch die Erhebung der Maximaltemperatur zur Anwendung. Hierauf basierend werden in Abhängigkeit von der Stärke der erreichten Selbsterhitzung im Dewargefäß „Stufen des Rottegrads (RG)“ festgelegt. Mit ihrer Hilfe erfolgt eine Einteilung des analysierten Materials im Hinblick auf eine fortschreitende Rotte in „unverrotteten Input“ (RG I), „Frischkompost“ (RG II und III) und „Fertigkompost“ (RG IV und V).

Bei Zugrundelegung der Maximaltemperatur im Selbsterhitzungstest erfolgt die numerische Steigerung des Rottegrades ausgehend von RG I (Maximaltemperatur > 60 °C) in dekadischen Temperaturschritten bis zu RG V (> 20 °C, < 30 °C). Eine niedrigere Maximaltemperatur in der Messung aufgrund sinkender Anteile an noch umsetzbarer organischer Substanz im Kompostmaterial spiegelt also einen weiter fortgeschrittenen Rotteprozess wider, woraus orientierend auch auf eine bessere Kompostreife geschlossen wird. Eine ähnliche Vorgehensweise bezüglich der Rottegradeinstufung erfolgt bei der Atmungsaktivität in Abhängigkeit vom verbrauchten Sauerstoff während der Testzeit (i. d. R. 4 Tage = AT_4 – *23*).

Grundsätzlich ist bei der Rottegradbestimmung über die Selbsterhitzung und ebenso bei der über die Atmungsaktivität zu beachten, dass im Labor definierte Randbedingungen für die Tests stringent einzuhalten sind, da diese eine starke Auswirkung auf die Testergebnisse haben können. Dies gilt insbesondere bzgl. einer adäquaten Feuchteeinstellung für die Probe, da die mikrobiellen Umsetzungen im Material stark durch den Wassergehalt beeinflusst werden. Zu trockene Probenmaterialien stellen hierbei insbesondere Probleme für die Messung der Atmungsaktivität dar, da hier geringe Wassergehalte die mikrobiellen Umsetzungen trotz gleichzeitig optimierter Sauerstoffzufuhr im Sapromat verringern (*14*). Aber auch beim Selbsterhitzungstest gibt es eine Untergrenze bzgl. des einzustellenden Wassergehaltes. Denn bei < ca. 30 % H_2O (d. FM), nimmt die mikrobielle Aktivität im Kompost – je nach tatsächlichem Wassergehalt – mehr oder minder stark ab und kann bei 10-20 % H_2O (d. FM) sogar zu einem „trockenstabilen“ Material führen.

Umgekehrt werden im Selbsterhitzungstest durch zu hohe Wassergehalte die mikrobiellen Umsetzungen reduziert und dementsprechend auch die Freisetzung der Wärmeenergie aus dem Prüfmaterial. Dies wird von Becker (*14*) v. a. darauf zurückgeführt, dass beim Selbsterhitzungstest - entgegen der Analyse auf Atmungsaktivität – dem Prüfmaterial nicht kontinuierlich Sauerstoff zugeführt wird. Vielmehr steht Sauerstoff für die aerobe mikrobielle Umsetzung nur über das im Porenraum des Prüfmaterials ursprünglich vorhandene Luftvolumen zur Verfügung, was jedoch mit zunehmendem Wassergehalt reduziert ist, bzw. kann mittels der O_2-Diffussion über die allerdings nur sehr kleine Materialoberfläche im Dewargefäß bereitgestellt werden. Mithin ist die O_2-Bereitstellung/ -Nachführung im Selbsterhitzungstest limitiert.

Inwieweit für diese Analyseverfahren die heute übliche Feuchteeinstellung im Probenmaterial über eine „Faustprobe“, wie sie ursprünglich aus den Tests von Bioabfallkomposten abgeleitet wurde (*14*), ausreichend ist, um bei den verschiedensten Testmaterialien adäquate Wassergehalte vor der Analyse herzustellen, oder ob nicht wieder die früher z. T. benutzte definierte Einstellung der Wassergehalte über die Wasserkapazität ($WK_{max.}$), zumindest bei manchen Kompostmaterialien, sinnvoll wäre, sollte überprüft werden. Dies gilt v. a. bzgl. der zunehmend in den Fokus rückenden Grüngutkomposte, die morphologisch aber auch bzgl. der OTM-Gehalte gegenüber den früher hauptsächlich analysierten Bioabfallkomposten z. T. andere Eigenschaften aufweisen.

Grundsätzlich ist zu beachten, dass die Testmethode der Atmungsaktivität die mikrobiellen Umsetzungen anhand des verbrauchten Sauerstoffs direkt darstellt. Hingegen schlägt sich die freigesetzte Wärmeenergie durch die mikrobiellen Umsetzungen im Selbsterhitzungstest nicht zwingend unmittelbar bzw. komplett in entsprechenden Temperaturerhöhungen im Material nieder, da dies nach Kranert (*39*) von einer Reihe physikalischer Parameter wie Wärmekapazität des Materials, Wärmeabstrahlung nach außen, Wärmeenergieverbrauch zur Erwärmung bzw. Verdunstung von Wasser, etc. abhängt.

Darüber hinaus können aus verschiedenen Gründen auftretende Lag-Phasen das Ergebnis der Rottegradmessung beeinflussen, was insbesondere bei der Bestimmung der Atmungsaktivität zu berücksichtigen ist. Ausführliche Darstellungen dieser methodischen Problemstellungen bei der Rottegrad-Prüfung sind den umfassenden Arbeiten von Becker (*14*) und Binner (*40*) zu entnehmen.

3.1.3.2 Die Rottegrad-Messung über die Selbsterhitzung: Hintergründe und Ergebnisbeispiele

Sowohl die Messung der Selbsterhitzung als auch der Atmungsaktivität wurde bereits in der Ära der MKK-Müllklärschlammkomposte zur Bestimmung des Rottefortschritts angewendet und kontinuierlich weiterentwickelt (s.a. Kap. 2.2 – *14, 26, 27*). Im Zuge der aufkommenden getrennten Sammlung Kompostierung von Bioabfällen in den 1980-er und 1990-er-Jahren wurde die Eignung beider o. g. Methoden zur Feststellung des Rottefortschritts parallel evaluiert. Beide Methoden werden auch nach wie vor im Methodenhandbuch der BGK aufgeführt (*23*).

Die Rottegradbestimmung über die Selbsterhitzung hat sich schließlich im Zuge von Standard-Gütesicherungen durchgesetzt, da sie:

a) sich erstens für Biogutkomposte als weitgehend gut geeignet erweist, um den Rottefortschritt des Materials sicher und reproduzierbar anzuzeigen,

b) zweitens einfach und relativ kostengünstig in den Laboren durchzuführen ist und

c) drittens der Anlagenpraxis eine Testmethode anhand gibt, die eine Eigenüberwachung ohne größeren Aufwand ermöglicht.

In umfassenden Versuchsreihen wies Becker (*14*) die Eignung der Selbsterhitzung als Methode der Rottegradmessung bei der Kompostierung von Bioabfällen nach. Dabei setzte sich als „Leitparameter" die Messung der Maximaltemperatur ($T_{max.}$) durch, zumal die beiden weiteren über die Selbsterhitzung erhobenen Kenngrößen ($S_{max.}$ = Maximale Steigung der Temperaturkurve bzw. F_{72} = Fläche unter der Temperaturkurve über 72 Stunden) nach Daten von Becker eng mit der $T_{max.}$ korreliert waren (jeweils r = 0,93*). Thom et. al. (*38*) stellten auch für Grüngutkomposte eine enge Korrelation zwischen $T_{max.}$ und F_{72} fest (r = 0,98*).

Die Ergebnisse anderer Autoren unterstützten die o. g. Messmethode. So zeigt Abb. 2 den über die Selbsterhitzung erhobenen Rottefortschritt am Beispiel der Kompostierung eines Hydrolyserests/Gärguts aus der anaeroben Vorbehandlung von Bioabfällen zur Biogasgewinnung (*34*). Dabei wird anhand der parallel gemessenen Pflanzenverträglichkeit jedoch bereits auch deutlich, dass sich hier zwar beide Reifeparameter mit fortschreitender Rottezeit in dieselbe Richtung bewegten, d. h. eine zunehmende Kompostreife anzeigten (höherer Rottegrad, bessere Pflanzenverträglichkeit). Die Ergebnisse zu den einzelnen Testzeitpunkten stimmten aber nur teilweise überein und zeigten beim vierten und fünften der sieben Messpunkte eine erhebliche Abweichung zwischen beiden Parametern.

Entsprechend der oben aufgeführten Zusammenhänge wurde die Messung des Rottegrads über die Selbsterhitzung in den 1990-er Jahren als Standard zur „Bestimmung des Rottefortschritts" und damit auch, zumindest teilweise, als Merkmal für die „Kompostreife" in die **RAL-Gütesicherungen Kompost** integriert, was auch die **Gütesicherung für Substratkomposte** einschloss. Inwieweit die Rottegradbestimmung über die Selbsterhitzung nicht nur für Biogutkomposte, sondern auch für Grüngutkomposte und speziell für salzarme Grüngutkomposte aus holzigen Materialien in der Substratverwertung geeignet ist, wurde zur damaligen Zeit zwar in Fachkreisen diskutiert. Dies spielte in diesen stark auf die Biogutkompostierung fokussierten ersten Phasen der Getrenntsammlung und Kompostierung jedoch nur eine untergeordnete Rolle und führte auch nicht zu Änderungen in den etablierten Gütesicherungen bzgl. der Rottegradmessung.

Eine tatsächliche Relevanz bekam diese Debatte erst in den letzten Jahren, auch vor dem Hintergrund der stark ansteigenden Verwertungsmengen an Grüngutkomposten im Substratbereich. Dabei wiesen einige Kompostanlagenbetreiber selbst darauf hin, dass die hohen Rottegrade IV und V und damit eine Einordnung der Materialien als „Fertigkomposte" oft schon nach wenigen Rottewochen bei

Komposten festgestellt wurden, die alleine schon nach visuellen Gesichtspunkten, aber auch im Hinblick auf die starke Temperaturentwicklung in den Kompostmieten noch als „in der Rotte befindlich“ zu klassifizieren waren.

Die mit solchen Materialien belieferte Erdenindustrie monierte z. T. hohe Temperaturentwicklung und Verpilzung der Komposte im Lager, mangelnde Reife und unbefriedigende Qualitäten, woraufhin jedoch seitens der Kompostanlagen eben nur auf die offiziellen Prüfergebnisse der Komposte mit Rottegrad IV und V verwiesen werden konnte.

Vor dem Hintergrund dieser sachlichen Widersprüche und der Problemstellungen bzgl. der Produktionspraxis in der Kompostierungs- und Erdenindustrie wurden bereits zwischen 1992-95 in dem in Kap. 1 genannten DBU-Vorhaben Reihenuntersuchungen mit Biogut- und Grüngutkomposten zwecks Evaluierung der Aussagefähigkeit der Rottegradbestimmung über die Selbsterhitzung durchgeführt (*6*). Bei den für dieses F u. E-Vorhaben hergestellten Grüngutkomposten mit niedrigen bis allenfalls mittleren Salzgehalten auf Basis von Grüngut mit deutlichen bis hohen Holzanteilen wurde dabei festgestellt, dass Rottegrad IV und V im Selbsterhitzungstest oft schon nach wenigen Rottewochen erreicht werden konnte, wenn die Komposte die Hauptrotte noch gar nicht abgeschlossen hatten.

Auch neuere Untersuchungen im Projekt TerÖko zeigen, dass v. a. holzreiches Grüngut in der Kompostierung vielfach schon nach kurzen Rottezeiten von wenigen Wochen als „Fertigkompost“ mit Rottegrad IV und V qualifiziert wurde, wenn der Test auf Selbsterhitzung angewendet wurde, obwohl es sich hierbei phänologisch noch um eher frisches bzw. in der Hauptrotte befindliches Material handelte, bei dem auch das Rohmaterial z. T. noch deutlich erkennbar war und die Siebausbeute einer Feinsiebung (<12 mm) nur zwischen 10 bis 15 Vol.-% lag. (Tab. 3). Da diese Materialien z. T. bereits nach der ersten hygienisierenden Kompostierungsphase als Rottegrad V anzusprechen waren, konnte im Lauf der weiteren Kompostierung auch keine zusätzliche „Verbesserung der Reife“ des Kompostes durch dieses Testverfahren mehr angezeigt werden. Denn Rottegrad V weist per Definition als höchste Rottegradstufe bereits einen „absolut reifen Fertigkompost“ aus.

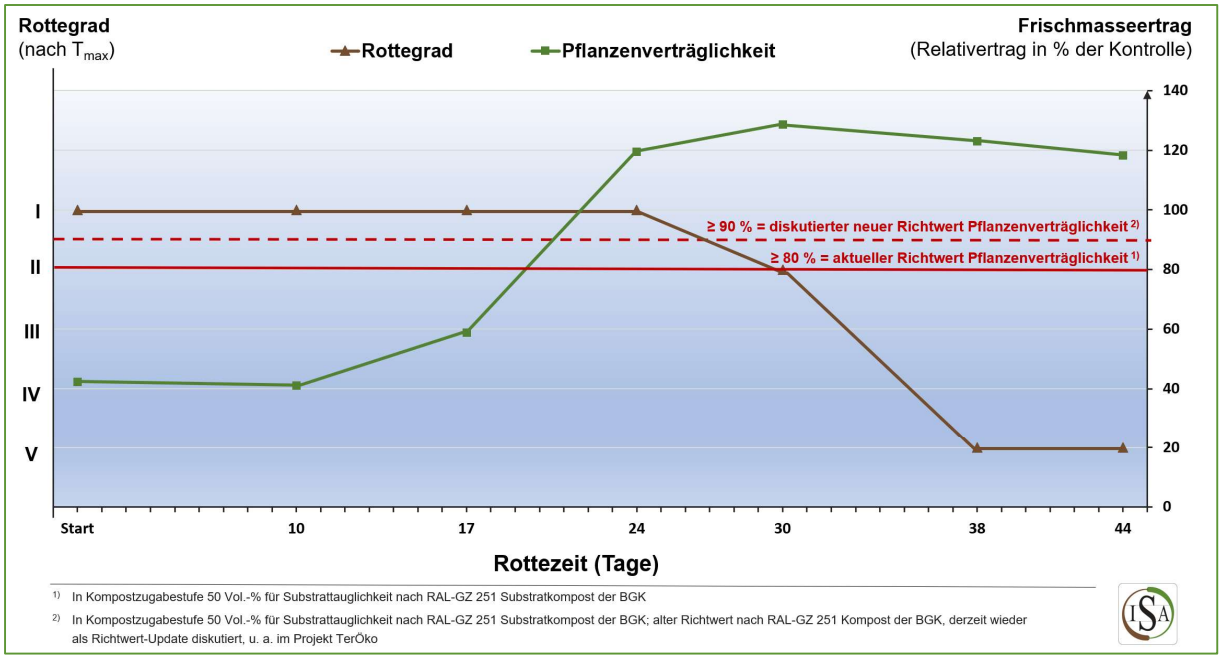

Abb. 2: Entwicklung von Rottegrad- und Pflanzenverträglichkeit (PV) für den Substrateinsatz (50% Kompostzugabe) bei der Kompostierung von Hydrolyserest aus Bioabfällen (*34*)

Tab. 3: Beispiele für den Verlauf des Parameters Rottegrad bei Erfassung über die Selbsterhitzung während der Kompostierung von holzreichem Grüngut der Anlage Ellershausen (*35*)

Kompostierungszeit (Wochen)	Material [1]	
	Grüngut 2/22	Grüngut 3/23
Rottestart [2]	IV	IV
8	n.b.	V
18	V	n.b.
22	n.b.	V
28	V	n. b.
38	V	n. b.
52	n. b.	V
72	V	n. b.

n. b. = nicht bestimmt

[1] Holzreiches Grüngut mit C/N-Verhältnis 40 (Grüngut 2/22) – 64 (Grüngut 3/23) zu Rottebeginn
[2] Am ersten Tag nach Aufsetzen der Miete

In der Praxis der RAL- Gütesicherung der BGK wurden anhand der Rottegradmessung über die Selbsterhitzung im Jahr 2022 bundesweit 1,3 % der untersuchten Biogutkomposte als Rohmaterial (RG I), 22,9 als Frischkomposte (RG II-III) und 75,8 als Fertigkomposte (RG IV-V) eingestuft (*36*). Bei den Grüngutkomposten betrugen die jeweiligen Anteile 0,1 % bzw. 7,9 % bzw. 92,0 %. Letztgenannter Wert ist schon insofern bemerkenswert, als auch bei 6-8 Monaten alten Grüngutkomposten mit Rottegrad IV und V auf den Lagermieten nach der Absiebung vielfach noch Temperaturen von 55-70°C im Kern des Haufwerks gemessen werden.

3.1.3.3 Die Rottegrad-Messung über die Atmungsaktivität bei Grüngutkomposten

Während der Herstellung von Praxiskomposten auf den Anlagen Ellershausen und Wernfeld sowie für die Modellkomposte im F u. E.-Projekt TerÖko wurden auch Analysen zum Rottegrad über die Atmungsaktivität (AT) mit unterschiedlicher Testdauer durchgeführt ($AT_{4/10/27}$, dargestellt werden hier nur die AT_4-Werte nach viertägiger Testdauer). Damit sollte geprüft werden, welche Ergebnisse diese Methode bei der Grüngutkompostierung im Vergleich zum Test auf Selbsterhitzung erbringt, v. a. bei hohen Holzanteilen im Input, wie sie bei der Substratverwertung der daraus gewonnenen Komposte erwünscht sind. Die Fragestellung war also, inwieweit mit dieser Methode differenziertere und aussagekräftigere Ergebnisse im Hinblick auf den Rottefortschritt bei der Kompostierung von Grüngut im Vergleich zum Rottegradtest über die Selbsterhitzung zu erzielen sind sowie damit letztlich auch sicherere Rückschlüsse bezüglich der Reife und der Substrateignung von Grüngutkomposten.

Die folgende Abb. 3 zeigt diesbezüglich die Ergebnisse erster Kompostierungsdurchläufe im Praxismaßstab bei Grüngut 2/22 und 3/23 der Anlage Ellershausen nach Tab. 3 mit einem hohen Holzanteil (C/N-Verhältnis Input = 40,0 bzw. 64,1; s. auch Kap. 3.1.1). Im Verlauf des Kompostierungsprozesses gestalteten sich die Ergebnisse des Parameters Atmungsaktivität differenziert und ließen im Rahmen der kontinuierlich abfallenden AT_4-Werte einen fortlaufenden Rottefortschritt erkennen. Dieser Prozess führte nach 22 bzw. 28 Wochen Kompostierung zu AT_4-Werten, die im Bereich der Grenzwerte der bundesdeutschen Abfallablagerungsverordnung2005 (*41*) bzw. der Deponieverordnung 2009 (5,0 mg O_2/g TM – *42*) sowie der entsprechenden Verordnung in Österreich (7,0 mg O_2/g TM) lagen.

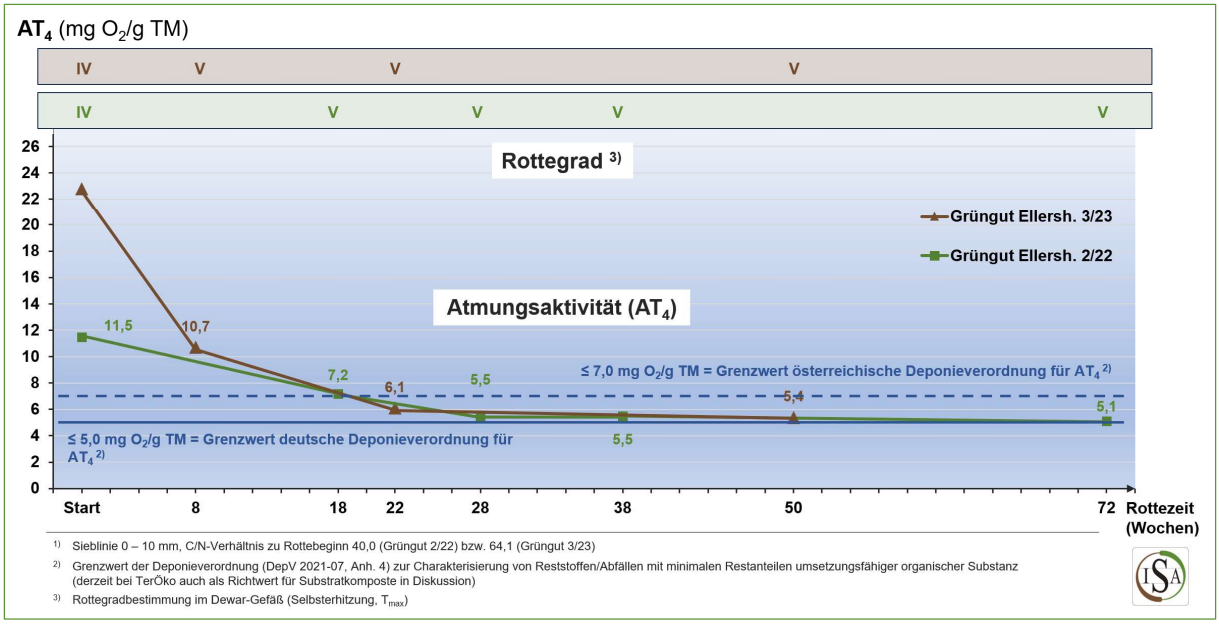

Abb. 3: Verlauf der Atmungsaktivität bei der Kompostierung von holzigem Grüngut [1)] der Anlage Ellershausen (*35*)

Diese Grenzwerte definieren im Zusammenhang mit weiteren Kriterien die notwendigen Eigenschaften von gemischten Siedlungsabfällen bezüglich ihrer Ablagerung, ggf. nach einer mechanisch-biologischen Vorbehandlung (MBA) von Restmüll. Hierfür sind Materialien mit nur noch sehr geringen Anteilen an umsetzungsfähiger Restorganik erforderlich, die entsprechend auch über die AT_4 charakterisiert werden. Aktuell wird im F u. E-Projekt TerÖko diskutiert, inwieweit aus diesen Zusammenhängen Richtwerte bzgl. der Einstufung des Rottezustands von Substratkomposten abgeleitet werden können, wenn der Rottegrad der Komposte über die Atmungsaktivität bestimmt wird. Dabei stellt sich unter anderem auch die Frage, ob bereits die Bestimmung der Atmungsaktivität über 4 Tage ausreicht (AT_4) oder eine längere Testzeit (z. B. 10 Tage = AT_{10}) erforderlich ist. Dies wird in einem Folgeartikel auf Grundlage neuer Daten aus dem Projekt TerÖko ausgeführt werden.

Entgegen des o. g. differenzierten Verlaufs der AT_4-Werte im Kompostierungsversuch mit Grüngut 2/22und 3/23 wies der über die Selbsterhitzung gemessene Rottegrad von Beginn der Kompostierung an „Fertigkomposte“ mit Rottegrad IV aus und lag schon nach 8 bzw. 18 Rottewochen im Optimalbereich bei Rottegrad V. Damit zeigte der Kompost aus Grüngut 3/23 im Selbsterhitzungstest bereits nach 8 Wochen Kompostierungszeit einen reifen Fertigkompost an, wie er in Substraten verwendet werden kann, während der AT_4-Wert noch bei 10,7 mg O_2/g TM und damit bei über dem Doppelten des Grenzwertes der Deutschen Deponieverordnung für stabile Materialien mit geringen Restorganikanteilen lag. Im Anschluss zu diesen Untersuchungen fand eine Reihe weiterer Analysen zur Atmungsaktivität auch bei den eingesetzten Modellkomposten aus der Kompostierung in Frankenhausen und Praxiskomposten der Anlage Wernfeld im Projekt TerÖko statt. Alle untersuchten Komposte, die dann auch erfolgreich in den pflanzenbaulichen Versuchen eingesetzt wurden, wiesen dabei sehr gute AT_4-Werte unter 7 mg O_2/g TM auf. Nach abschließender Auswertung werden diese Ergebnisse und die parallel gemessenen Werte des Rottegrads aus der Selbsterhitzung sowie der Pflanzenverträglichkeit und der N-Fixierung der Komposte in einem Folgeartikel dargestellt.

3.1.3.4 Zusammenhänge zwischen den beiden Messmethoden zur Rottegradbestimmung

Die bisherigen, in Kap. 3.1.3.3 aufgeführten, Ergebnisse zeigen, dass zwischen den Ergebnissen der beiden Messmethoden zur Rottegradbestimmung ($T_{max.}$ und AT_4) bei Grüngutkomposten keine sichere Beziehung besteht, wenn der Holzanteil im Input bei der Kompostierung hoch ist.

Bei der Analyse von Biogutkomposten ist demgegenüber eine enge Korrelation zwischen den Ergebnissen beider Messmethoden festzustellen. So fand bereits Becker 1998 im Rahmen ihrer umfassenden Untersuchungen eine signifikante Korrelation zwischen $T_{max.}$ und AT_4 ($r = 0{,}86$; $AT_4 = 4{,}80 * e^{0{,}0471 \times T_{max.}}$) anhand der Untersuchung von über 100 Proben aus der Kompostierung von Bioabfällen aus fünf Anlagen, die drei Baumusterkategorien zuzuordnen waren (*14*). Kürzliche Untersuchungen der BGK an einer kleinen Stichprobenzahl von Biogutkomposten (n = 12) ergaben eine sehr enge, hochsignifikante Korrelation (r = 0,971**) zwischen den Ergebnissen der vorgenannten beiden Methoden zur Bestimmung des Rottegrads (*43*).

3.1.4 Pflanzenverträglichkeit

3.1.4.1 Grundlagen und Ursachen von Pflanzenunverträglichkeiten von Komposten

Die „Pflanzenverträglichkeit im vorgesehenen Anwendungsbereich“ ist generell eine der wichtigsten Voraussetzungen für eine erfolgreiche Kompostanwendung im Pflanzenbau und mithin ein wesentliches Merkmal „reifer“ Komposte.

Für fehlende Pflanzenverträglichkeit von Komposten gibt es eine Reihe sehr unterschiedlicher Gründe. In einer engeren Definition werden dabei jedoch Wuchsdepressionen aufgrund ungünstiger Nährstoffsituationen, zu hohen Salzgehalten, Cl-, Na-Überschüsse etc., nicht in den Bereich der „Pflanzenunverträglichkeiten“ eingeordnet. Zum einen ist die Einstellung geeigneter Nährstoffverhältnisse eine generelle Anforderung für alle Substrate, unabhängig von den einzelnen Substratrohstoffen. Zum anderen sind diese chemischen Einflüsse einfach messbar und werden im Rahmen üblicher Analysen von Substratrohstoffen routinemäßig erfasst. Auch extreme Schadstoffgehalte, die theoretisch zu Wuchshemmungen von Pflanzen führen können werden hierbei i. d. R. nicht berücksichtigt, zumal solche Schadstoffgehalte seit Einführung der getrennten Sammlung von Bioabfällen und Grüngut bei regulärem Anagenbetrieb ausgeschlossen sind.

Vielmehr sind bei Komposten die im Folgenden aufgeführten Ursachen für „klassische Pflanzenunverträglichkeiten“ verantwortlich, die i. d. R. auf nicht ausgereifte Materialien und/oder suboptimale Rotteprozesse während der Kompostierung zurückzuführen sind, v. a. bei zu kurzen Rottezeiten:

a) Vorhandensein von Phytotoxen, also keimhemmender und/oder wurzelschädigender bzw. pflanzenschädigender Stoffe, die als Abbauprodukte organischer Substanz während der ersten Rottephasen und/oder unter (teilweise) suboptimalen, sprich anaeroben Verhältnissen bei der Kompostierung anfallen. Diese können sowohl über die flüssige Phase als auch über die Gasphase zur Wirkung kommen. Grundsätzlich können dabei diverse (Zwischen-) Produkte aus dem Abbau organischer Substanz (z. B. organische Säuren, s. Abb. 4), aber auch durch Mikroorganismen freigesetzte Hemmstoffe zum Tragen kommen.

b) starke mikrobielle Umsetzungen in den Böden/Substraten nach der Kompostanwendung bedingt durch unreife Kompostmaterialien mit hohen Restmengen an relativ leicht abbaubarer organischer Substanz, die zur Konkurrenz um Sauerstoff im Wurzelraum führen können.

c) Fixierung von Stickstoff bei weiten C/N-Verhältnissen und gleichzeitig mehr oder minder hoher Verfügbarkeit des Kohlenstoffs für den mikrobiellen Abbau bei nicht ausreichender N-Verfügbarkeit.

Alle drei Ursachen können je nach Material und Rottezustand selbstverständlich auch in Kombination auftreten. Die entsprechenden Mechanismen wurden seit Einführung der getrennten Sammlung und Kompostierung organischer Reststoffe vielfach untersucht, auch im internationalen Kontext (*17, 28, 29, 44, 45*).

Phytotoxen fallen bedingt durch den Abbau abgestorbener organischer Substanz in den ersten Rottephasen der Kompostierung zwangsläufig an, wobei dies durch (teilweise) anaerobe Abbauvorgänge in sauerstoffarmen Zonen der Kompostierung verstärkt wird. So entstehen z. B. bei der Decarboxylierung der Aminosäuren aus Proteinen biogene Amine wie Putrescin (1,4-Diaminobutan) oder Cadaverin (1,5-Diaminopentan), aus aromatischen und aus schwefelhaltigen Aminosäuren können sehr geruchsintensive Stoffe wie Indol/Methylindol, Mercaptane und Schwefelwasserstoff entstehen, ebenso Benzoesäure und phenolische Verbindungen, die die Keimung hemmen (*29*).

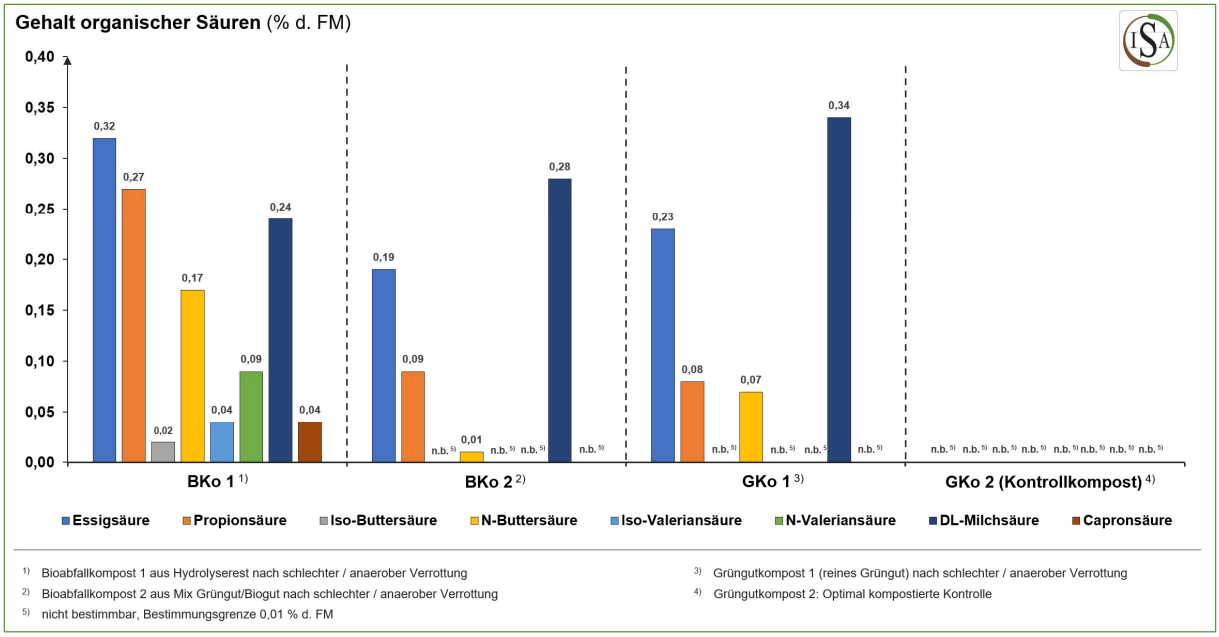

Abb. 4: Gehalt organischer Säuren in Komposten bei unterschiedlichen Materialien und Rottebedingungen (*6*)

Generell ist bei der Verstoffwechselung von Fetten und Kohlehydraten mit dem Anfall niedermolekularer organischer Säuren zu rechnen, die das Pflanzenwachstum beeinträchtigen, wobei auch dieser Effekt unter (teilweise) anaeroben Verhältnissen verstärkt wird. Diese Vorgänge können, gerade in den ersten Rottephasen der Kompostierung, außerdem zu einem vorübergehenden Abfall des pH-Werte im Material bis auf 5,5-6,0 führen.

Abb. 4 zeigt beispielhaft an drei Modellkomposten aus dem in Kap. 1 angeführten DBU-Forschungsvorhaben, dass hohe Gehalte solcher niedermolekularen organischen Säuren auftreten können, wenn die Materialien frisch sind oder schlechten Rottebedingungen unterlegen haben, insbesondere phasenweise anaeroben Bedingungen. Demgegenüber lagen die Gehalte dieser organischen Säuren bei dem ausgereiften Kontrollkompost sämtlich unter der Bestimmungsgrenze (*6*).

3.1.4.2 Nachweis und Bedeutung von Pflanzenunverträglichkeiten im Substratbereich

Beim Nachweis von Pflanzenunverträglichkeiten wird i. d. R. nicht versucht, die angeführten möglichen negativen Effekte im Rahmen spezifischer chemischer Analysen auf einzelne schädliche Verbindungen zu erfassen. Vielmehr geht man meist den Weg, über Biotests, um die Pflanze sozusagen selbst sprechen zu lassen. Hiermit soll über das jeweilige pflanzenbauliche Biotestverfahren die Summe eines möglichen Schadeinflusses von Komposten erfasst werden, ohne den Gründen dafür im Einzelnen nachzugehen.

Dabei hat sich in langjährigen Entwicklungen während der 1980-er und 1990-er-Jahren der „Keimpflanzentest mit Sommergerste“ als das für den Kompostbereich in Deutschland wichtigste Standardverfahren etabliert. Dieser Pflanzenverträglichkeitstest ist in allen Gütesicherungen des RAL-GZ 251 Kompost der BGK integriert. Eine Reihe ähnlicher Testverfahren mit anderen Testkulturen wie Salat, Kresse, Chinakohl oder auch Zierpflanzen erwiesen sich insgesamt gesehen nicht als besser geeignet (*6*) werden aber in manchen Bereichen weiterhin eingesetzt (*46*).

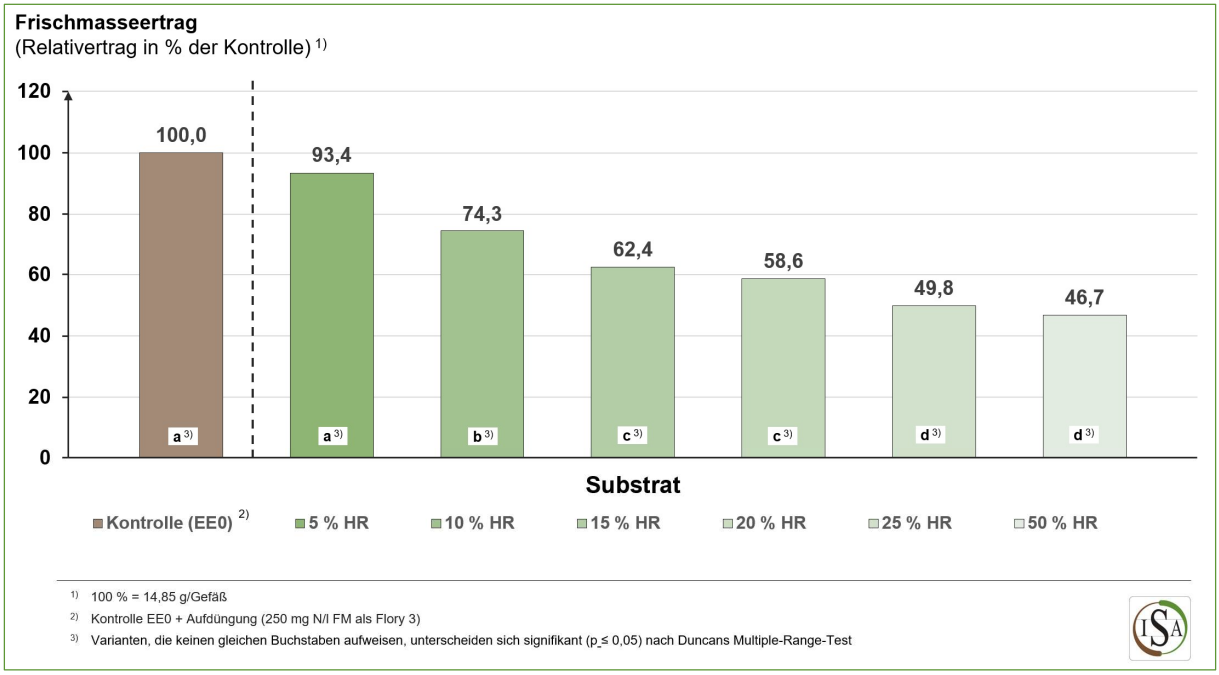

Abb. 5: Frischmasseertrag im Pflanzenverträglichkeitstest nach RAL-GZ 251 mit Hydrolyserest (HR) bei gestaffelter Zugabemenge (*34*)

In allen diesen Tests werden i. d. R. die Pflanzenerträge (Frischmasse (FM)) der Prüfvarianten im Vergleich zu einem Kontrollsubstrat (z. B. EE0, aufgedüngt) erfasst und als Relativerträge im Verhältnis zur Kontrolle dargestellt. Eine zusätzliche Erfassung der Erträge der Trockenmasse (TM) ist dabei meist nicht erforderlich, da FM- und TM-Erträge der üblicherweise eingesetzten Testkulturen eng korreliert sind. So haben eine Reihe von Versuchen mit Sommergerste eine signifikante Korrelation zwischen FM- und TM-Ertrag im Biotest mit einem Bestimmtheitsmaß zwischen r^2 = 0,75-0,92*** und bei Chinakohl und Petunien zwischen 0,70-0,93*** ergeben. Weitere Erläuterungen zu den einzelnen Testverfahren und ihrer Entwicklung sind der Literatur zu entnehmen (*6*).

Je nach Stärke der eintretenden Effekte können die durch Kompostanwendung verursachten Pflanzenunverträglichkeiten zumindest zu Unsicherheiten im Kultivierungsprozess, z. B. durch Hemmung der Keimung oder partiellen Pflanzenausfällen während dieser Keimphase führen. Starke Pflanzenunverträglichkeiten verursachen darüber hinaus erhebliche Wuchsdepressionen. Dies gilt insbesondere für die hier zur Debatte stehenden Anbauverfahren in geschlossenen Gefäßen, Kübeln, Containern etc. Dabei hat die Pflanzenwurzel je nach den spezifischen Verhältnissen wenig bis keine Möglichkeiten, negativen Effekten durch ungeeignete Komposte im Substrat auszuweichen, z. B., indem sie sich in umgebende Bodenräume ausbreitet, wie bei einer Freilandkultur.

Dementsprechend ist der grundsätzlich wichtige Ausschluss von Pflanzenunverträglichkeiten beim Komposteinsatz noch von besonderer Relevanz, wenn Komposte im Erden- und Substratbereich eingesetzt werden. Dieser Zusammenhang wird durch die Untersuchungsergebnisse an 470 Biogut-

und Grüngutkomposten in den Jahren 1992-95 von der Praxisseite her bestätigt. Der Parameter Pflanzenverträglichkeit war hier das nach dem Salzgehalt zweitwichtigste Ausschlusskriterium bei fehlender Substrateignung der Komposte (ca. 59 % der analysierten Komposte verfehlten den vorgegebenen Richtwert im Pflanzenverträglichkeitstest – *6)*.

Abb. 5 verdeutlicht die negativen Effekte auf das Pflanzenwachstum durch stark pflanzenunverträgliche organische Reststoffe/Komposte wie dem hier eingesetzten Hydrolyserest aus Bioabfällen, der zwecks Biogasgewinnung einer anaeroben Vorbehandlung vor der Kompostierung unterzogen worden war. Schon geringe Zugabemengen dieses Materials ins Substrat führten im Biotest mit Sommergerste zu Minderwuchs, ein lediglich 10 Vol.%-iger Anteil im Substrat bereits zu signifikanten Ertragseinbußen von 25 % der FM. Gleichzeitig wird mit diesen Ergebnissen auch die Sensitivität des Biotestverfahrens zur Pflanzenverträglichkeit mit Sommergerste unterstrichen.

Eine Weiterverarbeitung dieses Materials unter zielgerichtet schlechten, weitgehend anaeroben Rottebedingungen führte – ebenso wie bei zwei anderen entsprechend schlecht behandelten Kompostmaterialien – nach 3 und 6 Wochen Prozessdauer nach wie vor zu massiven Ertragsdepressionen im Pflanzenverträglichkeitstest gegenüber der Kontrolle (Abb. 6). Wurde der Hydrolyserest hingegen optimalen Kompostierungsbedingungen unterzogen, erwies er sich zwar in den ersten 3 Rottewochen immer noch als pflanzenunverträglich, erreichte jedoch nach 4-6 Rottewochen sehr gute Pflanzenverträglichkeitswerte (Abb. 6).

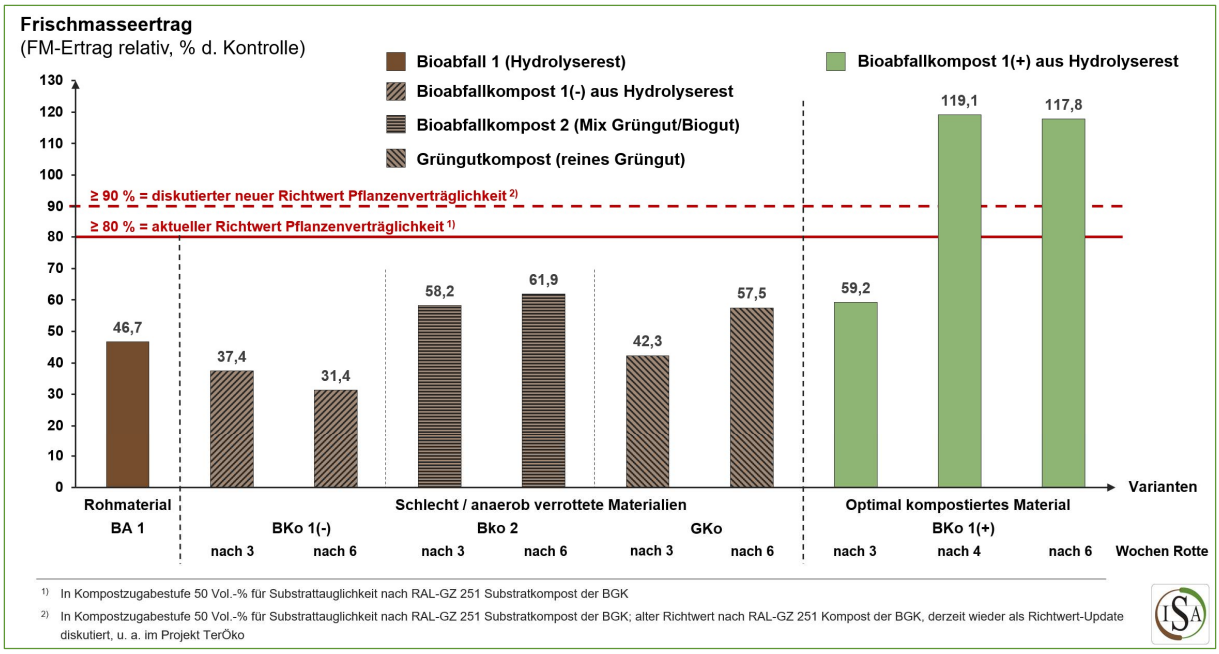

Abb. 6: Pflanzenverträglichkeit für den Komposteinsatz in Kultursubstraten (50 Vol.%-Kompostzugabe) bei unterschiedlichen Materialien und Rottebedingungen [1)] (*6*)

3.1.4.3 Nachweis von gasförmigen Phytotoxen

Aufgrund der Beobachtung phytotoxischer Wirkungen über die Gasphase, wurde bereits in den 1990er-Jahren ein „Test auf gasförmige Phytotoxen“ mit Kresse in geschlossenen Glasgefäßen entwickelt und in die RAL-Gütesicherung 251 Substratkompost integriert. Zwischenzeitlich taucht jedoch immer wieder die Frage auf, inwieweit dies unter heutigen Verhältnissen für Komposte zur Substratverwertung tatsächlich praxisrelevant ist. Eindeutige phytotoxische Wirkungen von Komposten über die Gasphase sind den Autoren nur bzgl. der Freisetzung von NH_3 bekannt.

Stand des Wissens ist bereits seit langem, dass NH_3 in den ersten Rottephasen der Kompostierung in größeren Mengen emittiert werden kann, wenn die mikrobielle Aktivität im Material nicht genügend stark ist bzw. die verfügbaren C-Quellen nicht ausreichen, um die aus dem Proteinabbau stammenden Aminogruppen sofort umzusetzen und den Stickstoff in mikrobielle organische Substanz einzubauen (*29, 30*). Eine Reihe von Untersuchungen an Biogutkomposten zeigte darüber hinaus, dass bei sehr hohen NH_4-N-Gehalten in Komposten und gleichzeitig hohen pH-Werten erhebliche Mengen an NH_3 aus Frisch- oder Fertigkomposten ausgasen können. Dies ist bei extremen Materialien sogar ohne Weiteres organoleptisch erfassbar (*28, 29*).

NH_3 ist zellgiftig und wirkt stark phytotoxisch. Bei hohen bis sehr hohen NH_4-N-Gehalten in den Komposten zwischen ca. 500 bis über 1.000 mg NH_4-N/l FM können die emittierten NH_3-Mengen so groß werden, dass es im Test auf gasförmige Phytotoxen zu einer kompletten Keimhemmung bei der Kresse und damit zu einem Totalausfall der Kultur kommen kann (*6*). Untersuchungen, inwieweit Wuchsdepressionen auch durch andere ggf. gasförmig aus den Komposten emittierten Stoffe verursacht werden können, sind den Autoren nicht bekannt.

Im Biotest auf gasförmige Phytotoxen führte der bereits im Vorkapitel angeführte schlecht/anaerob verrottete Kompost aus Bioabfall-Hydrolyserest zu einer Ertragsdepression von knapp 90 % bei der Kresse, Hingegen zeigte der der optimal prozessgesteuerte Kompost aus demselben Rohmaterial keine negativen Einflüsse (*6*). Gleiches galt aber auch für die beiden Bioabfall- und Grüngutkomposte aus der Versuchsreihe mit schlechter/anaerober Rotte. Im Gegensatz zu diesem Testergebnis auf gasförmige Phytotoxen hatte der Substrat-Biotest mit Sommergerste bei diesen beiden schlecht gerotteten Komposten jedoch eine sehr starke Wuchsdepression angezeigt. D. h., bei diesen unter sehr ungünstigen Rottebedingungen hergestellten Komposten waren in erheblichem Umfang phytotoxische Substanzen vorhanden, die jedoch nicht über die Gasphase gewirkt haben.

3.1.5 Stickstoff-Immobilisation

Grundsätzlich kann eine Stickstoff-Immobilisation bei Komposten erfolgen, die ein (sehr) weites C/N-Verhältnis aufweisen, also auf der Gesamtnährstoffbasis einen (relativ) starken Überhang an Kohlenstoff zeigen. Wenn gleichzeitig der Kohlenstoff aus dem Kompost noch mikrobiell (relativ) gut verfügbar ist, der Stickstoff hingegen nur (deutlich) weniger, ist die Gefahr einer mehr oder minder starken N-Sperre sehr groß. In diesem Fall versuchen die mikrobiellen Zersetzer über das Kompostmaterial hinaus alle verfügbaren anderen N-Quellen für ihren Baustoffwechsel zu nutzen, also auch N aus dem Boden oder aus Düngern (Substrat- und Freilandanwendung).

Die vielfach gebrauchte allgemeinere Formulierung der „N-Stabilität“ oder „N-Dynamik“, die nicht nur die Immobilisierung von N sondern auch die N-Freisetzung (Mineralisierung) umfasst, spielt z. T. für Biogutkomposte, meist aber nicht für Grüngutkomposte eine Rolle. Letztere weisen selten und nur bei bestimmten Rohmaterialzusammensetzungen (v. a. hohem Grasanteil) wesentliche Überschüsse an löslichem N auf oder mineralisieren diese kurzfristig nach der Anwendung in Böden oder Substraten (Median $N_{lösl.}$ Grüngutkomposte = 78 mg N/l FM; Biogutkomposte = 370 mg N/l FM, nach Daten RAL-Gütesicherung 251 Kompost der BGK 2023 – *37*)). Die Praxisrelevanz dieses Parameters beim Einsatz von Grüngutkomposten, v. a. bei solchen mit höheren Holzanteilen, bezieht sich daher im Wesentlichen auf eine mögliche Immobilisierung von N aus den o. g. Gründen, die auch tatsächlich nicht selten ist.

Die Ergebnisse aus der Untersuchung der 14 „guten Modell- und Praxiskomposte“ in dem bereits erwähnten DBU-F u. E.-Vorhaben zur Substratentwicklung auf Kompostbasis zeigen diesen Zusammenhang im Zöttl-Test auf (4 Biogut- und 10 Grüngutkomposte, alles Fertigkomposte mit Rottegrad IV oder V). Dabei wird deutlich, dass alle diese untersuchten Fertigkomposte, also auch die

Biogutkomposte, in den Analysen Stickstoff fixiert haben, wenn auch in sehr unterschiedlichem Ausmaß zwischen 34 bis 305 mg N/l FM. In Abb. 7 (Kap. 3.3.4) sind diese Ergebnisse für die zehn analysierten Grüngutkomposte aus dieser Untersuchung grafisch dargestellt.

Darüber hinaus wird die Relevanz hoher bis extrem hoher N-Immobilisationsraten deutlich, wenn die neben den o. g. praxisüblichen Komposten speziell zu Versuchszwecken hergestellten sieben „schlechten Modellkomposte“ des DBU-Forschungsvorhabens betrachtet werden. Dabei wurden zum einen feine Holzspäne und Weizenspelzen mit hohen Organikanteilen sowie aufgrund des Zerkleinerungsgrades guter mikrobieller Zugänglichkeit des Kohlenstoffs zu fertigen Grüngutkomposten gegeben. Diese Zugabe steigerte die N-Immobilisierungsrate in den vier Komposten bereits nach 14 Tagen signifikant und bei höheren Mengen der genannten Zuschlagstoffe von 30 Vol. % bis auf sehr hohe Werte von 464 mg N/l FM (Weizenspelze) bzw. 695 mg N/l FM (Holzspäne) – ohne Abbildung.

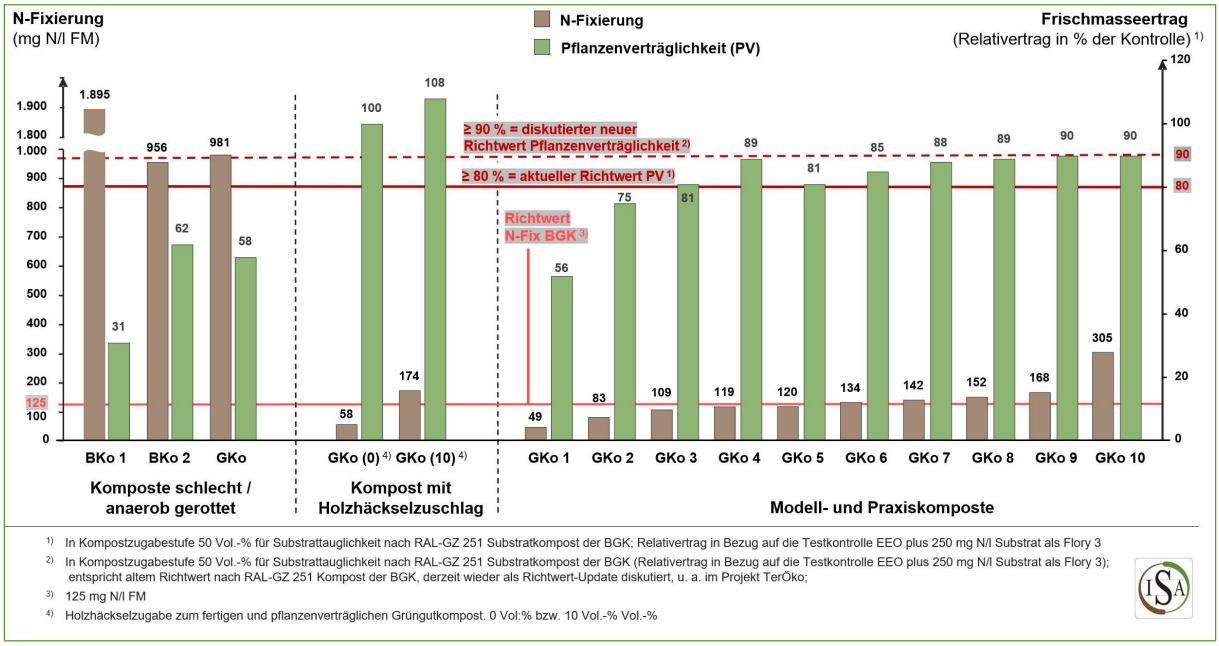

Abb. 7: N-Fixierung und Pflanzenverträglichkeit (PV) [1] in unterschiedlichen Kompostmaterialien (*6*)

Zum anderen wurden bei den drei zielgerichtet (teil-)anaerob hergestellten „Komposten“ mit schlechter Rotteführung aus Bioabfall-Hydrolyserest, aus einer Biogut-/Grüngut-Mischung und aus einem reinen Grüngutkompost extreme N-Fixierungsraten zwischen 956 bis 1857 mg N/l FM gefunden (Abb. 7). Ein Erklärungsansatz ist hierbei, dass der (teil-)anaerobe Prozess bedingt durch die hierfür gegebenen biochemischen Umsetzungen zwar zu einem gewissen Aufschluss verschiedener Organikfraktionen, aber nicht zu deren weitgehendem Abbau führt und dementsprechend in hohem Umfang mikrobiell nutzbare organische Verbindungen für den anschließenden aeroben Abbau in dem gut durchlüfteten Substrat für den Zöttl-Test hinterlässt. Hierdurch könnte es über eine gewisse Zeit zu einem „Schub“ verfügbarer Kohlenstoffquellen für fakultativ aerobe Destruenten gekommen sein, dem in dieser Extremsituation kurzfristig nicht ausreichend verfügbarer Stickstoff gegenüberstand.

3.2 Einfluss der Siebfraktionierung auf die Komposteigenschaften und insbesondere das C/N-Verhältnis

Abb. 8 zeigt anhand der Beispiele der zwei Komposte GK 2/22 und 3/23 der Anlage Ellershausen aus stark holzigem Grüngut, die zum Zeitpunkt der Analyse prozesstechnisch gesehen zwischen abgeschlossener Hygienisierungsphase und abgeschlossener Hauptrotte angesiedelt waren, wie stark der Einfluss der Sieblinie auf die Gehalte an organischer Masse, Gesamtstickstoff und dem C/N-Verhältnis gerade bei solchen für den Substrateinsatz interessanten Kompostmaterialien aus Grüngut mit hohem Holzanteil ist. Generell weisen die Siebüberläufe > 10 mm deutlich geringere N_t-Gehalte und sehr viel höhere Gehalte an organischer Masse (OM) auf, als der Siebdurchgang < 10 mm, was beides relevant bzgl. entsprechend erweiterter C/N-Verhältnisse der Siebüberläufe ist. Bei Siebüberläufen, die material- und rottebedingt mehr oder minder nur aus reinem Holz bestehen und dadurch wie bei den beiden o. g. Komposten OM-Gehalte von > 90 % (d. TM) aufweisen, kann sich das C/N-Verhältnis so auf über 80-90 erhöhen.

Interessant ist auch die stärkere Spreizung der OM-Gehalte zwischen Siebdurchgang und Siebüberlauf bei beiden Komposten mit zunehmender Kompostierungszeit, was zum einen am üblichen rottebedingten Abfall der OM-Gehalte im Siebdurchgang liegt, zum anderen aber noch stärker am Anstieg der OM-Gehalte im Siebüberlauf. Letzteres weist darauf hin, dass nach der vor der Analyse realisierten Rottezeit alle krautigen und auch die etwas feineren holzigen Anteile weitgehend umgesetzt waren. Dies wurde auch phänologisch bestätigt, da sich im Siebüberlauf mehr oder minder nur noch reines Holz in verschiedenen Stückgrößen wiederfand.

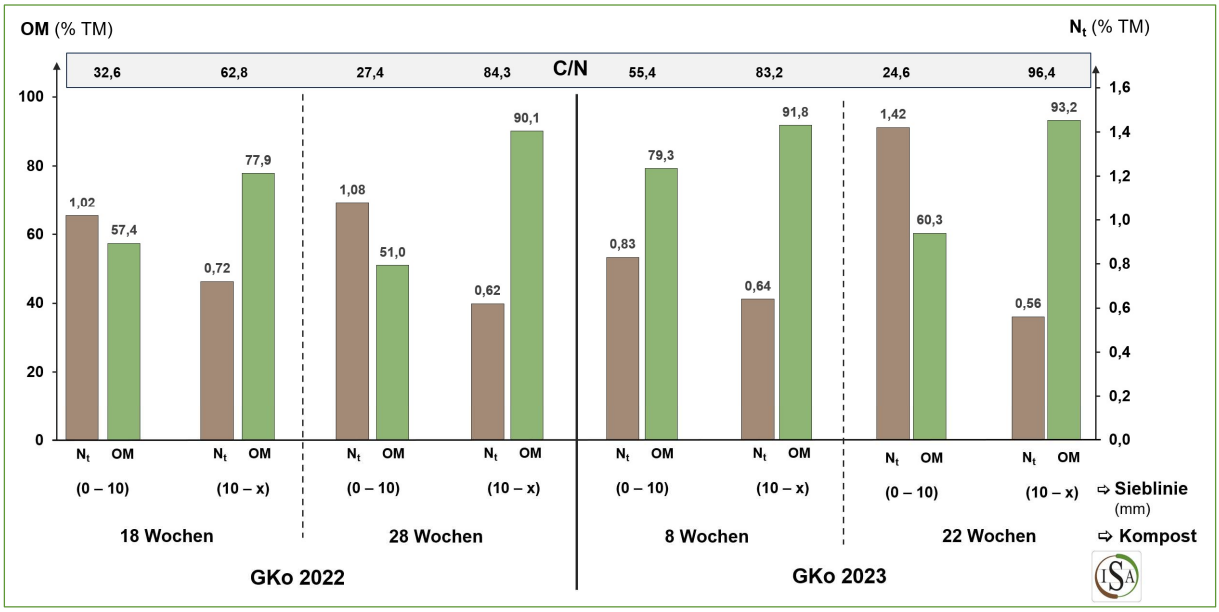

Abb. 8: Gehalt an organischer Masse (OM), Gesamtstickstoff (N_t) und C/N-Verhältnis in Siebdurchgang und Siebüberlauf zweier holzreicher Grüngutkomposte unterschiedlichen Alters der Anlage Ellershausen (*35*)

3.3 Zusammenhänge zwischen den diskutierten Reifeparametern und Aussagekraft dieser Parameter bzgl. des Einsatzes von Grüngutkomposten in Kultursubstraten

3.3.1 C/N-Verhältnis und N-Immobilisation bzw. Pflanzenverträglichkeit

Verschiedene Forschungsvorhaben in den 1990-er Jahren haben gezeigt, dass Materialien mit engem C/N-Verhältnis zwar oft, aber nicht generell N-neutral und/oder pflanzenverträglich für den Substrateinsatz sein müssen (*6, 34*). Dies wird an dem extremen Beispiel des Hydrolyserests (Tab. 2) als Input für eine Kompostierung mit einem C/N-Verhältnis von 15 aber einer starken Pflanzenunverträglichkeit (46,7 % Relativertrag gegenüber der Kontrolle, Abb. 5 und 6) und einer sehr hohen N-Fixierung von 934 mg N/l FM besonders deutlich.

In etlichen Fällen erwiesen sich jedoch auch fertige Komposte aus Biogut, Grüngut und Hydrolyserest bei engen bis sehr engen C/N-Verhältnissen zwischen 12,9-17,8 als pflanzenunverträglich im Substratbereich (50 %-Kompostzugabe im Biotest) und/oder fixierten in erheblichem Umfang bis über 300 mg N/l FM Stickstoff (*6*).

Umgekehrt wiesen die ersten im Projekt TerÖko hergestellten Grüngutkomposte mit sehr hohem Holzanteil auch bei noch weitem C/N-Verhältnis zwischen 20-23 Pflanzenverträglichkeitswerte von 100-106 % Relativertrag der Kontrolle sowie eine nur geringe N-Fixierung von 15 bis 67 mg N/l FM auf (Abb. 11).

Ein systematischer Zusammenhang zwischen den Ergebnissen in den Tests auf Pflanzenverträglichkeit bzw. N-Fixierung mit den jeweiligen C/N-Verhältnissen derselben Komposte wird aus diesen Untersuchungen nicht erkennbar.

Weitergehende Untersuchungen in diesem Kontext erfolgten in den 1990-er Jahren aufgrund einer Diskussion, ob man den Parameterkatalog der Gütesicherung von Komposten nicht reduzieren könnte. Insbesondere stellte sich die Frage, ob der Rottegrad nicht in einem so engen Zusammenhang zur Pflanzenverträglichkeit stehen könnte, dass die Prüfung des letztgenannten Parameters damit entbehrlich würde. In diesem Zusammenhang erfolgte bei der PlanCoTec-Gottschall, Witzenhausen, eine Untersuchung, die auch die Zusammenhänge des Rottegrads zu „weiteren Reifeparametern“ erfassen sollte, z. B. zum C/N-Verhältnis und zum Nitratgehalt der Komposte.

Zu diesem Zweck erfolgte eine getrennte Verrechnung der Daten von 122 Biogut- und 83 Grüngutkomposten aus der RAL-Gütesicherung (*38*). Dabei konnten aus multiplen Korrelationen nach Logarithmierung nicht normalverteilter Werte bei den jeweiligen Parametern bzw. aus Rangkorrelationen (n. Spearman) folgende Ergebnisse in Bezug auf die Korrelationen zwischen Rottegrad bzw. Pflanzenverträglichkeit (Biotest mit Sommergerste) zum C/N-Verhältnis der Komposte festgestellt werden (Zusammenhänge zwischen anderen Reifeparametern s. bei 3.3.2 und 3.3.3):

a) Bei den **Biogutkomposten** war die **Pflanzenverträglichkeit** bezüglich der Substratverwertung der Komposte (50 Vol.-% Kompostanteil im Test) **mit dem C/N-Verhältnis nicht signifikant korreliert**. Hingegen zeigte der **Rottegrad** (Maximaltemperatur im Selbsterhitzungstest) eine **signifikante Beziehung zum C/N-Verhältnis von r = 0,52 ***,** bei einem allerdings nur relativ geringen Bestimmtheitsmaß B von 27 %.

b) Bei den **Grüngutkomposten** zeigten sich grundsätzlich dieselben Zusammenhänge, wobei die Beziehung **zwischen Rottegrad und C/N-Verhältnis mit r = 0,38*** und B = 14 %** noch weniger eng war.

Becker fand ebenfalls eine signifikante Beziehung zwischen Rottegrad ($T_{max.}$) und C/N-Verhältnis bei ihren Untersuchungen mit Bioabfallkomposten, jedoch lag auch hier der Korrelationskoeffizient mit r = 0,48 niedrig und damit gleichfalls das Bestimmtheitsmaß (B = 23,0 %), was bzgl. relevanter Aussagen für die Praxis ausschlaggebend ist.

3.3.2 NO_3-N-Gehalte und Pflanzenverträglichkeit bzw. Rottegrad

Bei der in Kap. 3.3.1 aufgeführten Analyse der Korrelationen zwischen verschiedenen Reifeparametern wurde auch die Beziehung zwischen Pflanzenverträglichkeit für die Substratverwertung (50 Vol.-% Kompostanteil im Test) bzw. Rottegrad (Maximaltemperatur im Selbsterhitzungstest) und NO_3-N-Gehalt der 205 analysierten Komposte geprüft (*38*). Dabei ergaben sich folgende Ergebnisse:

a) Bei **Biogutkomposten** wurde eine signifikante **Korrelation zwischen Pflanzenverträglichkeit** und **NO_3-N-Gehalt** im Kompost mit allerdings nur äußerst geringem Bestimmtheitsmaß (B %) gefunden (r = -0,19*, B = 4 %). Hingegen bestand eine relevante Korrelation zwischen **Rottegrad** ($T_{max.}$) und **NO_3-N-Gehalt** (r = -0,68***, B = 46 %).

b) Bei den **Grüngutkomposten** konnte demgegenüber keine signifikante Korrelation zwischen Pflanzenverträglichkeit und NO_3-N-Gehalt gefunden werden. Die Korrelation zwischen **Rottegrad** und **NO_3-N-Gehalt** existierte auch hier, jedoch mit einem nur noch geringen Bestimmtheitsmaß (r = -0,45***, B = 20 %).

Becker (*14*) konstatierte bzgl. der Ergebnisse ihrer umfassenden Untersuchungen zu den möglichen Zusammenhängen zwischen Rottegrad und anderen Parametern, die den Rottezustand bei Bioabfallkomposten beschreiben können, dass dabei weder im Hinblick auf die NO_3-N-Gehalte noch auf das NH_4-N/NO_3-N-Verhältnis der Komposte aussagekräftige Tendenzen festzustellen waren. Sie schloss daher diese Parameter als Bewertungskriterien für den Rottezustand eines Bioabfallkompostes aus.

Weitere Untersuchungen zu den Zusammenhängen diverser Reifeparameter mit dem NO_3-N-Gehalt der Komposte sind den Autoren nicht bekannt. Insgesamt zeigen diese sowie die bereits in 3.1.2 beschriebenen Ergebnisse, dass die NO_3-N-Gehalte zwar in Kleinmietensystemen relevant sein können, unter den üblichen Bedingungen einer industriellen Kompostierungsanlagen mit großen bis sehr großen Materialkompartimenten bei Rotte bzw. Lager jedoch kaum praxisrelevante Aussagen zur Reife eines Kompostes entsprechend der in Kap. 2.2 dargestellten Definition ermöglichen.

3.3.3 Rottegrad und Pflanzenverträglichkeit

In dem in Kap. 1 aufgeführten DBU-F u. E-Projekt zur „Substratentwicklung auf Kompostbasis wurde auch der Frage nachgegangen, inwieweit der Parameter Rottegrad mit dem Parameter Pflanzenverträglichkeit korreliert ist und v. a. ob hohe Rottegrade im Selbsterhitzungstest, die nominell auf eine gute Kompostreife hinweisen, zudem eine sichere Prognose für die notwendige Pflanzenverträglichkeit der Komposte ermöglichen.

In diesem Zusammenhang wurden im Projekt zunächst beide Parameter bei 24 Modellkomposten aus reinem Grüngut mit höheren Holzanteilen untersucht, die für die pflanzenbaulichen Versuche im Zierpflanzenbereich hergestellt worden waren. Bei diesen Untersuchungen war für ca. 42 % der Komposte mit Rottegrad V nach Selbsterhitzungstest die Pflanzenverträglichkeit im Biotest entsprechend der RAL-Gütesicherung Substratkompost (Keimpflanzentest mit Sommergerste) nicht gegeben, wenn der Richtwert von 90 % Relativertrag der Kontrolle im Biotest angesetzt wurde (*6*). Wurde ein Richtwert von 80 % Relativertrag verwendet sank dieser Anteil nicht pflanzenverträglicher Komposte mit Rottegrad V auf ca. 17 %.

Bei Analysen an zusätzlichen 14 Praxiskomposten aus diesem Vorhaben waren ca. 79 % der Biogut- und Grüngutkomposte nicht pflanzenverträglich für den Substratbereich (50 Vol.%-Kompostzugabe), wenn der Richtwert von 90 %-Relativertrag der Kontrolle im Biotest mit Sommergerste angesetzt wurde bzw. ca. 29 % der Komposte, wenn der Richtwert von 80 %-Relativertrag verwendet wurde. Dies war der Fall, obwohl für 12 der 14 Komposte ein Rottegrad V und für die beiden restlichen Komposte der Rottegrad IV nach Selbsterhitzungstest vorlag.

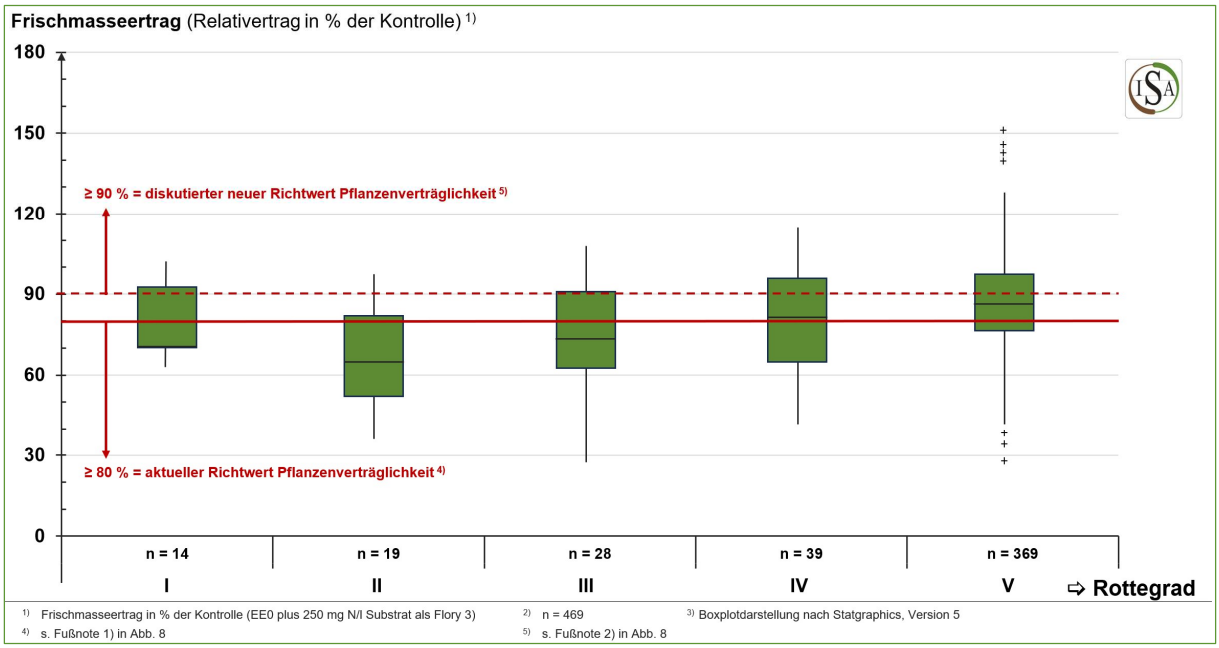

Abb. 9: Zusammenhang zwischen Pflanzenverträglichkeit (bei 50 %-Kompostzugabe im Biotest) und Rottegrad von Biogut- und Grüngutkomposten [2) 3)] (*6*)

Weitergehende statistische Analysen bzgl. eines möglichen Zusammenhangs zwischen Rottegrad im Selbsterhitzungstest und Pflanzenverträglichkeit wurden in diesem Projekt an 470 Praxiskomposten der RAL-Gütesicherung 251 aus dem gesamten Bundesgebiet durchgeführt. Der Boxplotdarstellung in Abb. 9 ist diesbezüglich zu entnehmen, dass der Rottegrad nach Selbsterhitzungstest keine sicheren Rückschlüsse bzgl. der Pflanzenverträglichkeit dieser Komposte für den Substratbereich (50 %-Kompostzugabe im Biotest) erlaubte. Zwar schnitten Komposte mit Rottegrad IV und V bzgl. der gefundenen Medianwerte der Pflanzenverträglichkeit etwas besser ab als Komposte mit Rottegrad I-III. Jedoch waren auch in dieser Auswertung eine hohe Anzahl der Rottegrad IV/V-Komposte nicht pflanzenverträglich bzgl. des Komposteinsatzes im Substratbereich (Abb. 9).

Zusätzliche Korrelationsanalysen in diesem Forschungsvorhaben zeigten bei der o. g. **Grundgesamtheit der 470 Komposte** dann zwar einen **signifikanten Zusammenhang** zwischen **Rottegrad** im Selbsterhitzungstest und **Pflanzenverträglichkeit** in der 50 %-Zugabestufe der Komposte auf (r = 0,22*). Jedoch lag das Bestimmtheitsmaß mit B = 5 % extrem niedrig, so dass keine Praxisrelevanz gegeben war. Auch nahm der Rottegrad nach Selbsterhitzungstest bzgl. der Bedeutung der gefundenen Ausschlusskriterien für einen Substrateinsatz bei den o. g. 470 Komposten nur eine mittlere Position ein. Das heißt lediglich 21 % der Komposte wiesen fehlende Substrattauglichkeit aufgrund des Rottegrads auf. Andere Parameter wie insbesondere Pflanzenverträglichkeit, Salzgehalt und lösliche K, Na und Cl-Gehalte führten hier zu sehr viel höheren Ausschlussquoten (*6*). Bzgl. der Pflanzenverträglichkeit beim 50 % Kompostanteil im Biotest hielten rund 59 % der geprüften Komposte den Richtwert von 90 % Relativertrag der Kontrolle nicht ein.

Ähnliche Ergebnisse hatten bereits die in Kap. 3.3.1 aufgeführten Korrelationsanalysen mit 205 Biogut- und Grüngutkomposten aus der RAL-Gütesicherung erbracht (*38*). Bei den **Biogutkomposten** existierte keine signifikante Korrelation zwischen Pflanzenverträglichkeit (50 Vol.-% Kompostanteil im Test) und Rottegrad (Maximaltemperatur im Selbsterhitzungstest), bei den **Grüngutkomposten** war eine **signifikante jedoch nur sehr schwache Beziehung** gegeben (r = -0,26*, B = 7 %).

Aus diesen Ergebnissen ist insgesamt zu schließen, dass die Ergebnisse der Rottegradmessung über die Maximaltemperatur im Selbsterhitzungstest i. d. R. keine belastbare und sichere Aussage zur Pflanzenverträglichkeit der analysierten Komposte ermöglichen.

Die Frage, inwieweit bei Wechsel der Methode zur Rottegradmessung von der Selbsterhitzung zur früher bei Komposten ebenfalls häufig angewendeten Atmungsaktivität (AT) eine sicherere Aussage bezüglich eines möglichen Zusammenhangs der Parameter Rottegrad und Pflanzenverträglichkeit erlauben würde, kann an dieser Stelle nicht beantwortet werden. Erste Untersuchungen mit Grüngutkomposten aus stark holzigen Rohmaterialien im Projekt TerÖko zeigen, dass bei hohen Werten der Atmungsaktivität (AT, hier AT_4-Werte nach 4 Messtagen) z. T. auch keine Pflanzenverträglichkeit gegeben war, jedoch oft auch bereits hohe Rottegrade im Selbsterhitzungstest. Umgekehrt gingen niedrige AT_4-Werte um oder unter dem o. g. Grenzwert der Deutschen Deponieverordnung von 5,0 mg O_2/g TM mit meist guten Pflanzenverträglichkeitswerten einher (Abb. 11). Es muss an dieser Stelle jedoch zum Ausdruck kommen, dass diese Ergebnisse bisher nur Hinweise geben und die Anzahl der Proben/ Analysen noch deutlich zu gering ist, um hieraus allgemeingültige Schlussfolgerungen ziehen zu können.

3.3.4 Rottegrad und N-Immobilisation

Bei den in im DBU-Projekt „Substratentwicklung auf Kompostbasis“ hergestellten Modellkomposten wurden zu einem erheblichen Teil relevante N-Fixierungsraten bis 168 mg N/l FM gefunden, obwohl alle Komposte mit Rottegrad V eingestuft waren. Nach Integration weiterer Praxiskomposte in diese Analysenserie ergaben sich bei insgesamt 14 Komposten mit Rottegrad IV oder V (4 Biogutkomposte und 10 Grüngutkomposte) N-Fixierungsraten zwischen 34 bis 305 mg N/l FM. Ca. 57 % dieser Komposte lagen dabei über der derzeit projektintern bei TerÖko diskutierten Benchmark einer maximal zulässigen N-Fixierung von 125 mg N/l FM für den Fall hoher Komposteinsatzmengen (40-60 Vol. %), die auch beim RAL-Gütezeichen Substratkompost der BGK angewendet wird.

3.3.5 Pflanzenverträglichkeit und N-Immobilisation

Bzgl. möglicher Zusammenhänge zwischen den im Biotest mit Sommergerste gefundenen Pflanzenverträglichkeitswerten mit parallel erhobenen N-Fixierungsraten ist zunächst festzuhalten, dass bei den im o. g. DBU-Forschungsvorhaben untersuchten 14 Komposten mit Rottegrad IV oder V und der angegebenen Spanne der N-Fixierungsraten zwischen 34 bis 305 mg N/l FM nur 3 Komposte (ca. 21 %, 1 Biogut- und zwei Grüngutkomposte) pflanzenverträglich für Substrate waren (50 %-Kompostzugabe im Test), wenn der Richtwert des relativen Frischmasseertrags von 90 % der Kontrolle angesetzt wird (wie derzeit im Projekt TerÖko und mit der BGK diskutiert – Ergebnisse Grüngutkomposte Abb. 7). Wird ein Richtwert von 80 % Relativertrag angenommen, wie derzeit seitens der BGK für das RAL-GZ 251 Substratkompost angesetzt (*9*). steigt der Anteil pflanzenverträglicher Materialien auf 10 Komposte (ca. 71 %).

Bei den nach 3.3.4 angeführten ca. 57 % der Komposte (n = 8, 3 Biogut- und 5 Grüngutkomposte), die bei der N-Fixierungsrate schlechter als 125 mg N/l FM abschnitten, waren drei Komposte (ca. 38 %) pflanzenverträglich bei Ansatz eines Relativertrags der Kontrolle von 90 % als Richtwert. Bei Ansatz

eines Richtwerts von 80 % Relativertrag der Kontrolle stieg der Anteil pflanzenverträglicher Komposte auf 6 (ca. 75 %, Ergebnisse Grüngutkomposte s. Abb. 7).

Bei den 43 % der Komposte (n= 6, 1 Biogut- und 5 Grüngutkomposte), die Fixierungsraten zwischen 34 bis 120 mg N/l FM aufwiesen, also wenig Stickstoff fixierten, war demgegenüber nur einer der Komposte (ca. 17 %) pflanzenverträglich, wenn ein FM-Relativertrag zur Kontrolle von 90 % als Richtwert angesetzt wurde. Bei Ansatz eines Richtwerts von 80 % Relativertrag der Kontrolle stieg die Anzahl pflanzenverträglicher Komposte auf 4 (67 %, Ergebnisse Grüngutkomposte s. Abb. 7).

Gegenüber diesen relativ uneinheitlichen Ergebnissen im Hinblick auf mögliche Zusammenhänge zwischen Pflanzenverträglichkeit und N-Immobilisation beim selben Kompost, wenn dieser eine **geringe, mittlere** oder **leicht erhöhte N-Fixierung** aufwies, zeigten beide Parameter konforme Ergebnisse und generierten damit gleiche Aussagen bzgl. der Einsatzfähigkeit der Komposte in Substraten **bei sehr hoher N-Immobilisierungsrate**. Dies war beim o. g. Forschungsvorhaben für extreme Materialien der Fall, wie sie speziell als „schlecht/anaerob verrottete“ Modellkomposte hergestellt worden waren (Abb. 7). Die – bei einer allerdings geringen Stichprobengröße von n = 3 – gefundenen extrem hohen N-Immobilisierungsraten zwischen 956 bis 1857 mg N/l FM spiegelten sich auch in sehr schlechten Pflanzenverträglichkeitswerten im Biotest auf Substrattauglichkeit nach RAL-Gütesicherung Substratkomposte wider (31,4 bis 61,9 % FM-Relativertrag im Vergleich zur Kontrolle).

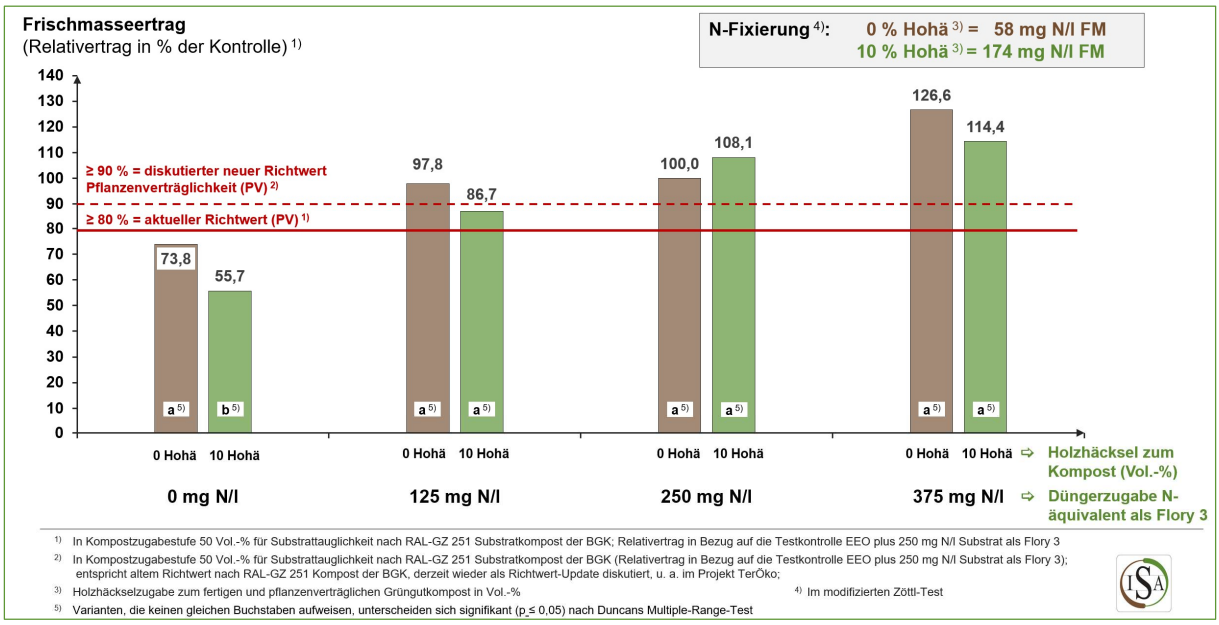

Abb. 10: Pflanzenverträglichkeit (PV) eines Grüngutkomposts mit und ohne Holzhäckselzuschlag bei unterschiedlicher Düngung im Biotest nach RAL-GZ 251 mit Sommergerste (*6*)

In den bereits in 3.1.5 erwähnten weitergehenden Untersuchungen zu N-Fixierung und Pflanzenverträglichkeit bei Zugabe von Holzhäcksel zu einem reifen und pflanzenverträglichen Grüngutkompost ergaben sich ebenfalls interessante Ergebnisse im Hinblick auf die Fragestellung bzgl. eines möglichen Zusammenhangs zwischen den Ergebnissen dieser beiden Reifeparameter beim selben Kompost. In diesen Analysen zeigte der nicht beaufschlagte Grüngutkompost mit 58 mg N/l FM eine sehr geringe N-Fixierungsrate, während der mit 10 Vol. % Holzhäcksel beaufschlagte Kompost bereits nach 14 Tagen eine deutliche N-Fixierung von 174 mg N/l FM im Zöttl-Test aufwies. Bei Durchführung eines durch gestaffelte Düngerzugaben methodisch abgewandelten Biotests mit Sommergerste nach RAL-Gütesicherung Substratkompost mit diesem Material zeigte sich, dass der Frischmasseertrag der Kompostvariante mit Holzhäckselzuschlag signifikant gemindert war, wenn keine Düngerzugabe im Test erfolgte. Bei **üblichen N-Zugaben entsprechend der Testvorschrift** (250 mg N/l Substrat als

Flory 3) ergaben sich für die **Kompostvarianten mit bzw. ohne Holzhäckselzuschlag** jedoch **keine signifikanten Unterschiede** mehr. Beide Komposte erreichten in diesem Fall ohne Weiteres den vorgegebenen Richtwert der Pflanzenverträglichkeit bezüglich der Substrattauglichkeit. (Abb.10).

3.3.6 Übersicht zu den Zusammenhängen zwischen den einzelnen Reifeparametern anhand eines Praxisbeispiels

Abschließend zu den obigen detaillierten Ausführungen bzgl. der Zusammenhänge zwischen den einzelnen Parametern, die die Reife eines Kompostes beschreiben sollen, wird im Folgenden mit den bereits in Kap.3.3.3 aufgeführten Abb. 11 und 12 ein zusammenfassender Überblick zu den Ergebnissen aller dieser Parameter bei der Kompostierung holzigen Grünguts auf einer Praxisanlage mit einem extensiven Rotteverfahren gegeben, was auch die Daten der beiden verschiedenen Methoden zur Bestimmung des Rottegrades umfasst.

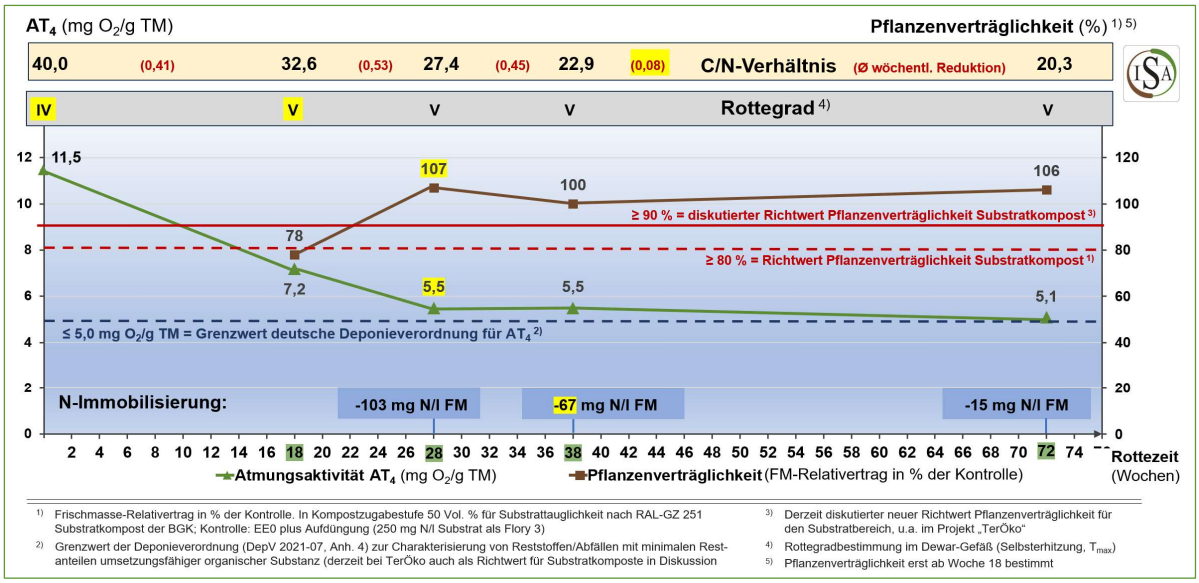

Abb. 11: Verlauf der wesentlichen Reifeparameter bei der Kompostierung des stark holzigen Grüngutmaterials Ellershausen 2/22 im Projekt TerÖko (*35*)

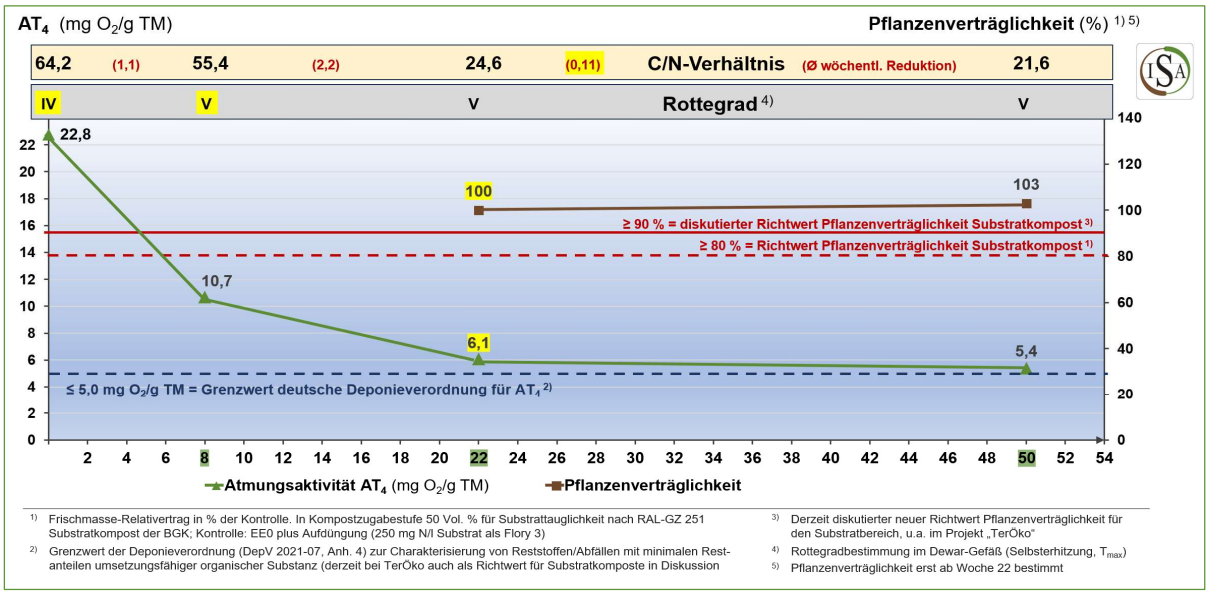

Abb. 12: Verlauf der wesentlichen Reifeparameter bei der Kompostierung des stark holzigen Grüngutmaterials Ellershausen 3/23 im Projekt TerÖko (*35*)

4 Diskussion

Die Ausführungen der Vorkapitel haben bereits angesprochen, wie stark die chemischen Eigenschaften, aber auch wesentliche andere Merkmale wie der Reife von Komposten abhängig sind sowohl vom verarbeiteten Inputmaterial als auch der Prozessteuerung während der Kompostierung. Dies reicht bis hin zur gewählten Sieblinie bei der Konfektionierung der Komposte sowie der Entscheidung zur weiteren thermischen Verwertung der gewonnenen Siebüberläufe versus ihrer Rückführung in den Kompostierungsprozess. Entsprechende Einflüsse und die in Kap. 3.3 dargestellten Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Parametern bzgl. der Reifebestimmung von Komposten werden im Folgenden diskutiert.

4.1 Einfluss der Siebfraktionierung auf die Komposteigenschaften und die weitergehende Nutzung von Siebüberläufen aus der Grüngutkompostierung

Die chemischen und physikalischen Eigenschaften von Komposten hängen immer auch von der realisierten Sieblinie ab, d. h., wie fein oder grob ein Kompost in der Konfektionierung nach abgeschlossener Rotte abgesiebt wird. Dies betrifft viele für die Praxis der Erdenherstellung sehr wichtige Parameter wie den Salzgehalt, das C/N-Verhältnis, die löslichen Nährstoffgehalte, aber auch das Volumengewicht der Komposte, d. h.: Feinere Siebungen desselben Materials weisen i. d. R. höhere Volumengewichte auf als gröbere Absiebungen, in denen noch leichtere holzige Anteile enthalten sind. Dies gilt v. a. für Komposte mit höheren Mineral-/Bodenanteilen, wie sie oft in Nord- und Ostdeutschland anzutreffen sind. Darüber hinaus beeinflussen jedoch auch andere Faktoren das Volumengewicht des Kompostes stark, insbesondere das kompostierte Ausgangsmaterial, der mit erfasste Bodenanteil im Input sowie Reife und Wassergehalt des gewonnenen Kompostes.

Die Siebung von Komposten zum Rotteende erfolgt dabei nicht alleine zur Eliminierung von Fremdstoffen mit dem Siebüberlauf, sondern auch zur Abtrennung von zu groben, meist holzigen Teilen. Dies gilt v. a. für Grüngutkomposte und hier wiederum ganz besonders für Komposte, die aus stark holzigem Grüngut entstanden sind, denn die groben Holzfraktionen verrotten in aller Regel nicht in einem einzigen Kompostierungsdurchlauf, selbst wenn er 6-9 Monate dauert.

Wie fein abgesiebt wird hängt dabei stark vom angestrebten Verwertungsgebiet ab. Bei Grüngutkomposten liegen die Sieblinien für die Freilandverwertung meist bei 0-20, z. T. bis 0-30 mm, seltener bei 0-15 mm. Für die Substratverwertung muss die Absiebung naturgemäß viel feiner sein, hier findet man üblicherweise Sieblinien von 0-10/0-12 mm, z. T. etwas grober mit 0-15 mm selten feiner mit 0-8 mm.

Wie bereits die Darlegungen in Kap. 3.2 bezüglich der für den Substratbereich besonders interessanten, stark holzigen Grüngutkomposte verdeutlichen, sind auch oder gerade aus deren Siebüberläufen grundsätzlich sehr gute Komposte für die Substratverwertung gewinnbar. Während es in den Anfängen der getrennten Sammlung und Kompostierung vielfach üblich war, solche Materialien weiter stofflich zu verwerten, d. h. neuem Inputmaterial einer Grüngutkompostierung zuzumischen und damit in einen zweiten Kompostierungsdurchlauf einzuspeisen oder sie als Strukturmaterial bei der Biogutkompostierung zu nutzen, werden sie heute meist thermisch/energetisch verwertet (*47*). Dies hängt v. a. mit dem hohen Heizwert dieser stark holzigen Fraktionen zusammen, der wiederum im Wesentlichen durch die Gehalte an organischer Masse (OM) beeinflusst wird.

In Untersuchungen von (*48*) wies ein für die thermische Verwertung konfektioniertes, holziges Grüngutmaterial in den Siebfraktionen 10-20 mm, 20-40 mm und > 40 mm Gehalte an OM zwischen 85-94 % (d. TM) auf, was in einem sehr ähnlichen Wertebereich liegt, wie ihn die Siebüberläufe > 10 mm der beiden Komposte der Anlage Ellershausen aufwiesen (s. Kap. 3.2). Auch gelagerte Grüngut-Inputmaterialien aus verschiedenen Jahreszeiten zeigten bei (*48*).in diesen etwas gröberen bis groben

Siebfraktionen bereits OM-Gehalte zwischen ca. 60-90 % (d. TM). In Bezug auf die Differenz der OM-Gehalte zwischen den verschiedenen untersuchten Siebfraktionen lag der weitaus größte Unterschied zwischen der Fraktion 0-10 mm und 10-20 mm. Hier traten Steigerungen des OM-Gehaltes in der gröberen Fraktion gegenüber der Feinfraktion 0-10 mm zwischen 35-90 %-Punkten auf, während dieser Anstieg zwischen der 10-20er-Fraktion und den noch gröberen Siebfraktionen bis > 40 mm lediglich bei rund 10-45 %-Punkten lag.

Diese Ergebnisse sind insofern für die Praxis ausschlaggebend, als der Heizwert (unterer Heizwert $H_{u)}$ von Grüngut bzw. Grüngutsiebfraktionen eng mit dem Gehalt an OM korreliert ist. In den o. g. Untersuchungen von (*48*). lagen die entsprechenden Korrelationskoeffizienten zwischen OM und H_u der analysierten Grüngutmaterialien zwischen r = 0,940*** bis 0,963***. Dies bedeutet, dass bei einem Bestimmtheitsmaß von B = 88-93 % der Heizwert allergrößten Teils durch die OM-Gehalte im Grüngut beeinflusst wird. Entsprechend werden die Siebfraktionierungen zur Gewinnung von Grüngut zur thermischen Verwertung gewählt. Bei o. g. Werten resultiert daraus, dass z. T. schon Grüngutmaterialien (frisch bzw. Siebüberläufe), die >15 bis 20 mm abgesiebt werden, in die thermische Verwertung gelangen und nur das tatsächliche Feinmaterial über eine aerobe Rotte als Kompost verwertet wird.

Die o. g. gröberen Fraktionen und die Siebüberläufe von Grüngut bzw. Grüngutkomposten, die vielfach in die thermische Verwertung gelangen, wären jedoch ein sehr gutes Inputmaterial für die Kompostierung zwecks Herstellung substratfähiger Komposte (s. Kap. 4.2). Dies hängt v. a. damit zusammen, dass in dieser Fraktion nicht nur die N_t-Gehalte niedriger sind, sondern auch die Gehalte der diversen löslichen Pflanzennährstoffe. Begreift man den über die Leitfähigkeit gemessenen Salzgehalt vereinfacht als „Summenparameter wasserlöslicher (Nähr)stoffe“ in den Komposten, so verdeutlichen die dazu gefundenen Werte in den Siebüberläufen der beiden aufgeführten Komposte der Anlage Ellershausen zwischen 0,48-0,68 g KCl/l FM, wie wertvoll solche Materialien im Hinblick auf die Gewinnung substratfähiger Komposte sein können. Fertige und einsatzfähige Komposte aus Grüngut mit hohen Holzanteilen für den Substratbereich sind nach den früheren umfassenden Analysenreihen der PlanCoTec-Gottschall ohne Weiteres mit niedrigen bis sehr niedrigen Salzgehalten zwischen 1-2 g KCl/l FM gewinnbar, was durch die jetzt im Rahmen des Projektes TerÖko hergestellten Komposte wieder bestätigt wird.

Aufgrund der oben beschriebenen Zusammenhänge geht der Kompostierung und stofflichen Verwertung von Grüngut zum Torfersatz in der Praxis sehr viel Material verloren. Gleichermaßen gilt dies bezüglich der Entnahme hoher Anteile gröberer Holzbestandteile zwecks thermischer Verwertung bereits im Input nach dessen mechanischer Aufbereitung und damit noch vor der Kompostierung oder auch nach einer kurzen 2-4-wöchigen Vorrotte, die meist eine bessere Abtrennung der holzigen Bestandteile ermöglicht. Durch die letztgenannten Maßnahmen der Entnahme holziger, salzarmer Bestandteile aus dem Input einer Kompostierung erhöhen sich zwangsläufig die Salzgehalte in den gewonnenen Grüngutkomposten. Dies ist für die Freilandverwertung unproblematisch, für eine Substratverwertung der Komposte hingegen sehr kontraproduktiv.

Die Mengen ausgeschleuster holziger Bestandteile von Grüngutkompostierungsanlagen können sehr stark variieren, je nach Anlage und Material. Manche Anlagen trennen auch kein holziges Material zur thermischen Verwertung aus dem Input ab. Vielfach werden jedoch aus dem Input bzw. nach einer Vorrotte zwischen 10-25 Vol. % an holzigem Siebüberlauf separiert, bei extrem holzreichem Grüngut gerade aus der Spätherbst-/Wintersammlung können diese Werte im Einzelfall bis auf 40-50 Vol. % ansteigen (*48*). Die erstgenannte Größenordnung wird auch vielfach für die Siebüberläufe bei der Konfektionierung fertiger Grüngutkomposte realisiert, wobei die tatsächlichen Werte neben der Materialspezifität naturgemäß sehr stark von der gewählten Sieblinie abhängen.

In einer Gesamtbetrachtung ist zu konstatieren, dass nach verschiedenen Schätzungen durch die thermische Verwertung bundesweit aktuell über 1-1,5 Mio. m³ an holzigem Grüngut für die Kompostierung verloren gehen dürften (*19, 48*). Hieraus ließen sich sehr große Mengen an gut substratfähigen Grüngutkomposten gewinnen, was auf ein derzeit im Hinblick auf die **Systemkonkurrenz nicht verfügbares hohes Torfersatzpotential** verweist.

Allerdings müssten zur Kompostierung solcher Materialien auch die Prozessabläufe in den Kompostierungsanlagen angepasst werden. Dies könnte insbesondere längere Rottezeiten für Teilströme der verwerteten Materialien zur Konsequenz haben, selbst bei Zumischung von N-Quellen zum Input zwecks besserer/schnellerer Umsetzung des holzigen Materials. Für spezifische Materialien wäre außerdem auch die Zerkleinerung des Rohkompostes nach der Rotte und erst danach eine Siebung umsetzbar, wie dies z. T. noch in den 1950/60er-Jahren bei der Herstellung von Erden aus betriebseigenen Komposten in Gärtnereien mit dem „Erdwolf“ üblich war. Dies reduziert den Anteil an Siebüberlauf deutlich und führt bei ausgewählten Komposten auch pflanzenbaulich zu guten Ergebnissen (*49*).

4.2 Zusammenhänge zwischen den Reifeparametern und deren Aussagekraft bzgl. des Einsatzes von Grüngutkomposten in Substraten

4.2.1 C/N-Verhältnis, Pflanzenverträglichkeit und N-Immobilisation

Die in Kap. 3.1 und 3.3 dargestellten Zusammenhänge verdeutlichen, dass das **C/N-Verhältnis** zwar ein zusätzlicher Indikator zur Bewertung des Rottefortschritts eines Kompostes sein kann, ein kausaler und rohmaterialunabhängiger Zusammenhang zwischen C/N-Verhältnis und Kompostreife entsprechend der Definition in Kap. 2 jedoch nicht existiert. Darüber hinaus ist zu beachten, dass mit diesem Wert ein Verhältnis der gesamten organischen C und N-Mengen angegeben wird, das keine Aussage über die Verfügbarkeit dieser Elemente für die mikrobiellen Umsetzer in einer aeroben Prozessführung erlaubt. Dies ist aber letztlich ausschlaggebend für den Kompostierungsverlauf und damit auch für die in bestimmten Zeiträumen zu erreichende Reife des Kompostproduktes. Ein kausaler Zusammenhang zwischen C/N-Verhältnis und anderen wesentlichen Reifeparametern wie Pflanzenverträglichkeit und N-Immobilisation existiert also nicht.

Die Festlegung eines bestimmten Wertebereichs oder gar eines „Richtwertes“ für das C/N-Verhältnis bis zu dem ein Grüngutkompost „unreif“ ist bzw. ab dem dann der gewünschte „Reifezustand“ erreicht wird, ist daher nicht möglich. „Übliche Bereiche“ des C/N-Verhältnisses für geprüfte Komposte geben eine **zusätzliche Hilfe bei der Einschätzung von Rottefortschritt und Kompostreife.** Sachdienlich sind diese Daten aber generell nur im Zusammenhang mit der Kenntnis

a) der kompostierten Rohmaterialien,

b) der realisierten Kompostierungstechnik und der Kompostierungszeit sowie

c) der Sieblinie des Kompostes.

4.2.2 NO_3-N-Anteil und Kompostreife

Eine ähnliche Situation ergibt sich bzgl. der Bewertung des **NO_3-Anteils am löslichen Stickstoff** als möglicher „Reifeparameter“. Wie die Daten in Kap. 3.1.2 zeigen, sind hohe NO_3-N-Anteile zwar durchaus in Komposten mit einer spezifischen Prozessteuerung und langer Kompostierungszeit zu finden wie sie auch günstig zur Kompostherstellung für den Substratbereich ist. Hingegen gilt diese Sachlage nicht für den allergrößten Teil der in der heutigen bundesdeutschen Kompostierungspraxis

vorzufindenden Biogut- und Grüngutkomposte. Der Grund hierfür liegt in den dort meist ungünstigen prozesstechnischen Rahmenbedingungen für eine vollständige Nitrifizierung löslicher N-Anteile.

Die erste diesbezügliche Rahmenbedingung ist die relativ kurze Rottezeit bei der Kompostierung, v. a. bei den Biogutkomposten. Und zweitens weisen die Komposte meist bis zur Abgabe an die Verwerter noch sehr hohe Temperaturen auf, was eine Nitrifizierung unterbindet (s. Kap. 3.1.2). Dies gilt bei Biogutkomposten ebenso wie bei Grüngutkomposten. Auch bei Rottezeiten zwischen 6-9 Monaten und länger werden i. d. R. durchgehend hohe Temperaturen in den Grüngutkomposten gemessen, was aufgrund großvolumiger Mieten selbst für die Nachrottephase und für das Kompostlager gilt. Zwar ist zu einem späten Zeitpunkt der Kompostierung die Rotteintensität reduziert und damit auch die Wärmenachlieferung. Aufgrund einer im Vergleich zum Materialvolumen verhältnismäßig kleinen Oberfläche (über die Wärme abgestrahlt wird) in den i. d. R. alleine schon aus Platzgründen großvolumigen Tafelmieten mit Volumina von oftmals 300 bis 800 m³ und Höhen bis über 4 m, kommt es jedoch vielfach zu einem „Wärmestau“ im Haufwerk, der auch bei nur noch geringer Wärmenachlieferung zu Temperaturen zwischen 50-60 °C in 80-90 % des Mietenvolumens führen kann.

In der Praxis der RAL-Gütesicherung von Grüngutkomposten kommen daher bei der weit überwiegenden Anzahl an Grüngutkomposten höhere lösliche NO_3-N-Gehalte überhaupt nicht vor (Median in 2023: 8,4 mg NO_3-N/l FM – *37*). Demgegenüber zeigt der Wert des 90 %-Percentils in 2023 mit 98,2 mg NO_3-N/l FM allerdings an, dass in geringem Umfang auch Komposte existieren, für die dieser Parameter relevant ist.

Trotzdem wird dem NO_3-N-Anteil am löslichen N in den Komposten sowohl bei den meisten Kompostierungsanlagen als auch den meisten Kompostverwertern heute nur eine geringe Bedeutung zugemessen. Weitergehende Untersuchungen zu diesem Themenfeld finden daher kaum statt. Die bereits in den 1990er-Jahren durchgeführten statistischen Auswertungen bei 205 Komposten aus der RAL-Gütesicherung (s. Kap. 3.3.2) gaben keinen Hinweis auf eine wesentliche Relevanz dieses Parameters bzgl. der Bestimmung des Reifezustandes, da keine Korrelation zwischen Pflanzenverträglichkeit und NO_3-N-Gehalt und nur eine schwache Beziehung zwischen Rottegrad (Selbsterhitzungstest) und NO_3-N-Gehalt vorlag.

Es sollte dabei jedoch berücksichtigt werden, dass diese Ergebnisse von Komposten aus der „üblichen Anlagenpraxis“ stammen, bei denen höhere NO_3-N-Anteile am löslichen N in den Komposten bereits aufgrund der in Kap. 3.1.2 erläuterten grundsätzlichen Zusammenhängen nicht zu erwarten sind. Anders könnte dies aussehen, wenn zum Zweck der Substratverwertung tatsächlich Komposte hergestellt würden, die einer spezifischen Prozessteuerung incl. einer Nachrottephase auf kleineren Haufwerken mit entsprechend niedrigen Temperaturen unterworfen würden. Entsprechende systematische Untersuchungen wie in einem solchen Fall die verschiedenen Reifeparameter mit dem NO_3-N-Anteil im Kompost korrelieren sind jedoch nicht bekannt.

Während beim C/N-Verhältnis also ein unmittelbarer kausaler Zusammenhang zur Kompostreife entsprechend der o. g. Darstellungen auszuschließen ist, kann ein solcher Zusammenhang zwischen NO_3-N-Anteil und anderen Reifeparametern des Kompostes entsprechend der Definition nach Kap. 2. derzeit für spezifische Kompostierungsverfahren/Prozessteuerungen auf Kleinmieten aufgrund der fehlenden systematischen Untersuchungen weder ausgeschlossen noch bestätigt werden. In der derzeitigen Anlagenpraxis mit in aller Regel sehr großvolumigen Mieten auch in späteren Rottephasen hat dieser Parameter aus den angeführten Gründen jedoch nur eine geringe Bedeutung.

Gleichwohl kann der NO_3-N-Anteil am löslichen N bei Komposten, deren Herstellung schwerpunktmäßig auf den Substrateinsatz ausgerichtet ist, einen **wertvollen zusätzlichen Hinweis zum Reifezustand** vermitteln. Umgekehrt zeigen **hohe NH_4-N-Gehalte** in den Komposten generell an, dass allen in diesem Artikel beschriebenen **Reifeparametern besondere Beachtung** geschenkt werden sollte,

um mögliche Probleme bzgl. mangelnder Reife auszuschließen. Bei Grüngutkomposten wird diesbezüglich aufgrund von Praxiserfahrungen oft ein Wertebereich von >100 mg NH_4-N angenommen, ab dem besondere Aufmerksamkeit erforderlich ist. Das im Rahmen der RAL-Gütesicherung für Grüngutkomposte der BGK 2023 erhobene 90 % Percentils des NH_4-N-Gehaltes von 230 mg N/l FM weist auf die Relevanz entsprechender Daten für eine kleinere Anzahl an Komposten hin (*37*).

4.2.3 Rottegrad und Pflanzenverträglichkeit bzw. N-Immobilisation

Betrachtet man die bisherigen Ergebnisse aus den Studien der 1990er Jahre (s. Kap. 3.3.3.) und die neuen Daten aus dem Projekt TerÖko, so ergeben sich mehrere grundsätzliche Schlussfolgerungen hinsichtlich der Frage nach **möglichen Zusammenhängen** zwischen **den Parametern Rottegrad** (Selbsterhitzungstest) und **Pflanzenverträglichkeit** (Biotest RAL-GZ 251 Substratkompost mit Sommergerste bei 50 % Kompostanteil) sowie zu **deren Praxisrelevanz:**

a) Der Parameter Rottegrad (im Selbsterhitzungstest) lässt bei Grüngutkomposten einen absicherbaren **Zusammenhang zum Parameter Pflanzenverträglichkeit** erkennen, jedoch nicht bei Biogutkomposten. Auch bei Grüngutkomposten ist der Zusammenhang jedoch sehr schwach und weist bei einem Bestimmtheitsmaß in den durchgeführten Studien von B=5-7 % keine Praxisrelevanz auf. Nur anhand solcher Rottegradmessungen können daher keine belastbaren, sicheren und reproduzierbaren Aussagen zu möglichen Pflanzenunverträglichkeiten von Komposten gewährleistet werden. Dementsprechend kann der über die Selbsterhitzung erhobene Rottegrad auch in keinem Fall Tests bzgl. des Parameters Pflanzenverträglichkeit ersetzen.

b) Der Parameter Rottegrad für sich alleine betrachtet kann daher die **„Reife" von Biogut- und Grüngutkomposten wie in Kap. 2.2 definiert** nur teilweise und nicht vollumfänglich beschreiben.

c) **Weitere Einschränkungen bzgl. der Aussagekraft** des über die Selbsterhitzung gemessenen Rottegrads gelten nach den bisherigen Erkenntnissen insbesondere für Komposte, die auf Basis von Grüngut mit höheren Holzanteilen gewonnen werden, wie sie gerade in Bezug auf die damit meist gegebenen niedrigen Salz-, Na- und Cl-Gehalte für die Substratherstellung erwünscht sind.

d) Diese Ergebnisse begründen sich möglicherweise in **methodischen Aspekten**, d. h. konkret einer zu niedrigen Sensitivität der Methode der Selbsterhitzung bei bestimmten Prüfmaterialien. Da die Selbsterhitzung bei der im Vergleich zu Bioabfallkomposten z. T. anderen Stoffgruppenzusammensetzung und schlechteren C-Verfügbarkeit in holzreichen Grüngutmaterialien geringer ausfällt und sich außerdem über längere Zeiträume erstreckt als bei Bioabfällen, ist es naheliegend anzunehmen, dass während der Analyse v. a. bei holzreichen Grüngutkomposten oft nur eine (sehr) geringe Temperaturentwicklung in dem vorgeschriebenen Dewar-Testgefäß erfolgt.

   Dieser mögliche Effekt der ungenügenden Erfassung einer reduzierten rottebedingten Selbsterhitzung im Testmaterial bedingt durch eine zu geringe Sensitivität der Testmethode könnte ggf. weiterhin durch die relativ kleinen Volumina im Test (2 l FM) und möglicherweise auch eine nicht ausreichende Isolierung der Testgefäße (= höhere Wärmeabstrahlung) unterstützt werden. Auch physikalische Einflüsse wie die Wärmekapazität des Prüfmaterials und des Prüfgefäßes und die erforderliche Energie zur Erwärmung bzw. Verdunstung von Wasseranteilen des Prüfmaterials sind hierbei zu beachten.

   Weitere diesbezügliche Untersuchungen zur Analysenmethode der Selbsterhitzung beim Einsatz im Bereich der Grüngutkomposte und die ggf. mögliche methodische Weiterentwicklung wären daher relevant. Denkbar wäre es, eine komplette Überarbeitung der Methode für die Analyse von Substratkomposten auf Basis von Grüngut, Rinde und ähnlichen Rohmaterialien zu prüfen. Dies

ist bereits verschiedentlich diskutiert worden und eine entsprechende Diskussion wird im Lauf des Jahres Eingang in etablierte Gütesicherungen für Komposte bei der BGK finden.

Nach bisherigen Überlegungen könnten zwecks Testanpassung insbesondere höhere geprüfte Volumina, eine bessere Isolierung der Gefäße und eine feinere Abstufung der temperaturbezogenen Richtwerte für den Rottegrad im Bereich der Fertigkomposte mit Rottegrad V (20°C bis 30°C) zielführend sein. In diesem Falle würde voraussichtlich eine Durchführung des Tests in klimatisierter Umgebung mit minimalen Schwankungen der Umgebungstemperatur erforderlich werden. Weiterhin wäre die bisherige Feuchteeinstellung anhand der „Faustprobe“ nicht mehr ausreichend, vielmehr müsste eine exakte Einstellung der Wassergehalte im Testmaterial erfolgen (Anteil der maximalen Wasserkapazität, wie z. T. bereits früher umgesetzt – *14*). Zielgerichtete neuere Entwicklungen zur Prüfung der vorgenannten Randbedingungen für eine mögliche Testanpassung der Rottegradanalyse sind den Autoren bisher jedoch nicht bekannt.

e) Der Parameter **Rottegrad auf Basis der Messung der Atmungsaktivität** (hier AT_4) könnte nach den dargelegten ersten Ergebnissen eine höhere Sicherheit bzgl. der Einschätzung des Rottefortschritts bei Grüngutkomposten ermöglichen als der Parameter Rottegrad nach Selbsterhitzungstest. Weitere Reihenuntersuchungen im F u. E.-Projekt TerÖko müssen im laufenden Jahr jedoch zur Prüfung dienen, inwieweit die bisherigen positiven Ergebnisse reproduzierbar sind und ob darauf aufbauend tatsächlich allgemeingültige Aussagen möglich sein werden.
Darüber hinaus sind auch im Kontext mit der **Rottegradmessung über die Atmungsaktivität eine Reihe von Fragen grundsätzlicher wie methodischer Natur** zu klären.

Dies betrifft alleine schon die Zielsetzung (Ist die Definition eines „inerten“ Materials wie in den Deponieverordnungen auch für Komposte im Substrateinsatz sinnvoll?), den Testzeitraum (reichen 4 Tage?) und die Bezugsgrößen (TM, OTM, beides?) sowie die Richtwertfestlegung (bisherige Richtwerte im Rahmen der Gütesicherung der BGK, Ableitung aus der Deutschen bzw. Österreichischen Deponieverordnung oder anderen Regelwerken/Normen?).

Weiterhin weist Binner (*40*) mit seinen umfangreichen Arbeiten zum Vergleich der Methoden „Atmungsaktivität“ und „Gasbildungsrate“ beim Vollzug der österreichischen Deponieverordnung auf eine **Reihe methodenbezogener Fragestellungen** hin, die für eine belastbare und sichere Aussage der Ergebnisse aus den Messungen zur Atmungsaktivität relevant sind. Dies betrifft neben der bereits diskutierten Einstellung der Feuchtegehalte im Prüfmaterial v. a. die Vermeidung von Hemmstoffeinflüssen und die sichere Erfassung von Lag-Phasen mit der anschließenden entsprechenden Messwertkorrektur.

Wie die in Kap. 3 dargestellten Untersuchungsergebnisse zeigen, kommt dem Parameter **Rottegrad** auf Basis des Selbsterhitzungstests weiterhin auch **keine sichere Aussagfähigkeit bzgl. möglicher/zu erwartender N-Immobilisierungsraten in Komposten** zu. Insbesondere ist bemerkenswert, dass 57 % der analysierten Fertigkomposte mit Rottegrad IV oder V in diesen Untersuchungen eine erhebliche N-Fixierung zeigten und die im Projekt TerÖko diskutierte Benchmark einer N-Fixierung bei höheren Komposteinsatzmengen von max. 125 mg N/l FM nicht einhalten konnten. Von Seiten wesentlicher Gütesicherungsorganisationen existieren bereits ähnliche Anforderungen. So definiert die BGK in ihrem Methodenbuch Komposte mit N-Immobilisierungsraten von mehr als 125 mg N/l FM als „nicht stabil in Bezug auf den Stickstoffhaushalt“ (*23*). Die Gütegemeinschaft Substrate für Pflanzen e. V. (GGS) lässt bei der Zertifizierung von Rindenhumus als Substratausgangsstoff eine maximale N-Fixierung von 120 mg N/l FM zu (*50*).

4.2.4 Pflanzenverträglichkeit und N-Immobilisation

Betrachtet man einen möglichen **Zusammenhang** bzgl. der Ergebnisse der beiden **Reifeparameter Pflanzenverträglichkeit** (Biotest mit Sommergerste nach RAL-GZ 251 Substratkompost) **und N-Immobilisierung** (Zöttl-Test), so sind nach den in Kap. 3 dargestellten Untersuchungsergebnissen zunächst gleichlautend negative Ergebnisse beider Qualitätsparameter bei **extrem schlechten Kompostmaterialien** festzustellen. Diese zeigten gleichermaßen sehr niedrige Pflanzenverträglichkeitswerte wie extrem hohe N-Fixierungsraten.

Hingegen wurden **keine Zusammenhänge** des Parameters N-Immobilisation zu den Ergebnissen der Pflanzenverträglichkeit ersichtlich, wenn eine nur **moderate bis mittlere N-Fixierung** bei den Komposten gegeben war. Auch bei nur gering fixierenden Komposten wurden also vielfach deutliche bis starke Pflanzenunverträglichkeiten gefunden. Dies ist grundsätzlich auch nicht überraschend, da verschiedenste Ursachen von Pflanzenunverträglichkeiten, insbesondere die möglichen Gehalte an Phytotoxen im Kompost, naturgemäß im Zöttl-Test gar nicht erfasst werden können/sollen.

Weiterhin konnten zwar relevante, aber noch nicht besonders hohe N-Fixierungsraten verursacht durch Zugabe von Holzhäcksel zu einem pflanzenverträglichen Grüngutkompost im Biotest auf Pflanzenverträglichkeit über eine entsprechend hohe N-Zugabe komplett aufgefangen und damit Mindererträge vermieden werden. Gerade dieses Ergebnis weist auf die **sehr unterschiedlichen, möglichen Ursachen** hin, wenn in diesem Biotest auf Pflanzenverträglichkeit Mindererträge gefunden werden und daraus Pflanzenunverträglichkeiten abgeleitet werden.

So können extrem ungünstige Kompostmaterialien durchaus schon alleine bedingt durch ihre hohe N-Fixierung Mindererträge im Pflanzenverträglichkeitstest erzeugen, ohne dass dabei weitere Ursachen hinzukämen. Ein solches Ergebnis ist selbstverständlich als wichtiger Hinweis zu werten, dass diese Komposte tatsächlich noch nicht ganz reif sind oder ungünstigen Rottebedingungen unterlagen. Es bedeutet jedoch nicht zwangsläufig, dass mit diesen Komposten zusätzlich Pflanzenunverträglichkeiten aufgrund weiterer Ursachen auftreten müssen. Dies könnten z. B. Sauerstoffkonkurrenz im Wurzelraum oder phytotoxische Substanzen sein, wie sie deutlich unreife Materialien kennzeichnen. Umgekehrt lässt ein negatives Ergebnis im Pflanzenverträglichkeitstest aufgrund von Phytotoxen wie z. B. organischen Säuren keine Rückschlüsse auf eine zu erwartende N-Fixierung durch ein solches Material zu.

Im Gegensatz zu der obigen Darstellung bzgl. des Parameters Rottegrad (im Selbsterhitzungstest) sind zwischen den Ergebnissen der Tests auf Pflanzenverträglichkeit und N-Immobilisierung zwar unter bestimmten Rahmenbedingungen Zusammenhänge erkennbar. Diese sind jedoch erstens in keinem Fall so eng, dass ein Test den anderen ersetzen könnte. Zweitens treten sie nach bisherigen Erkenntnissen nur bei extremen Kompostmaterialien auf die man ja im Normalbetrieb einer Kompostierungsanlage tunlichst zu vermeiden versucht. Und drittens können sich, wie angeführt, sehr unterschiedliche Ursachen auf die Ergebnisse in den beiden Tests auswirken. Dies bedeutet auch konkret, dass eine mit Mindererträgen im Biotest festgestellte Pflanzenunverträglichkeit ebenso gut durch nur eine als auch durch mehrere Ursachen begründet sein kann, incl. einer starken N-immobilisation.

Eine **zentrale Stellung** bei der Bestimmung der Kompostreife und der Einsatzfähigkeit von Komposten im Substratbereich nimmt nach allen bisherigen Erkenntnissen die **Analyse der Pflanzenverträglichkeit** ein (**Biotest mit Sommergerste** entsprechend Methodenhandbuch der BGK für die RAL-Gütesicherung 251 Substratkomposte – *23*). Dieses Testverfahren ist auf dem jetzigen Kenntnisstand bzgl. der Absicherung des Komposteinsatzes im Substratbereich nicht ersetzbar.

Wie die Ergebnisse des angeführten DBU-Forschungsvorhabens zur Substratentwicklung auf Kompostbasis darüber hinaus zeigen, leistet die Sommergerste bzgl. der Anzeige möglicher Pflanzenunverträglichkeiten von Komposten selbst für den Zierpflanzenbereich ähnlich gute Aussagen wie

direkt aus diesem Bereich eingesetzte Testpflanzen, z. B. Petunien, Geranien und Begonien. Gleiches gilt im Vergleich zu der ebenfalls z. T. etablierten und geeigneten Testkultur Chinakohl. Ungeeignet sind für solche Biotests hingegen i. d. R. die z. T. ebenfalls genutzten Testpflanzen, die salzempfindlich sind, wie Kopfsalat. Hier besteht die große Gefahr, dass im Biotest Minderwuchs alleine schon aufgrund einer salzbedingten Ertragsdepression auftritt. Damit bleibt im Falle von Minderwuchs aufgrund des Salzgehaltes im Kompost unklar, ob nicht auch phytotoxische Verbindungen, die einen schlechten Kompostierungsprozess oder mangelnde Kompostreife anzeigen, dafür eine Rolle gespielt haben. Und eine solche Erkenntnis spiegelt doch das eigentliche Testziel wider. Die Praxisrelevanz dieser Zusammenhänge zeigt sich auch alleine schon in der Tatsache, dass nach eigenen Daten z. B. bei Kopfsalat bereits Keimhemmungen und Wuchsdepressionen ab Salzgehalten von 1,2-1,5 g KCl/l FM im Substrat auftreten können, während Grüngutkomposte im Substrateinsatz durchaus auch 3-5 g KCl/l FM Kompost aufweisen können.

Die bisherigen Studienergebnisse weisen weiterhin eindeutig darauf hin, dass das Biotestverfahren zur Pflanzenverträglichkeit mit Sommergerste **starke N-Immobilisierungsraten** über Mindererträge anzeigt. Hingegen sind damit schwächere bis mittlere N-Fixierungsraten ggf. nicht oder zumindest nicht sicher über das Biotestverfahren erfassbar, was v. a. durch die vorgeschriebene hohe N-Zugabe im Test (250 mg N/l FM Substrat) bedingt sein könnte.

Auch vor diesem Hintergrund wird es als sinnvoll angesehen, für sensible Anwendungsbereiche der Grüngutkomposte wie insbesondere Kultursubstrate für den Erwerbsgartenbau, beide Testverfahren zu kombinieren. Das heißt konkret, neben dem Biotest auf Pflanzenverträglichkeit nach RAL-GZ Substratkompost einen zusätzlichen Test auf „N-Stabilität“ (hier im Wesentlichen N-Fixierung) durchzuführen. Hierfür hat sich eine auf dem „Zöttl-Test“ basierende Methode bereits seit langen Jahren als Standard v. a. bei der Untersuchung von Rindenhumus aber auch Komposten etabliert (*51, 52, 53*). Im Hinblick auf die Relevanz dieses Tests und methodische Fragen bzgl. z. B. des Prüfzeitraums bei unterschiedlichen Materialien, die Einstellung der Wassergehalte und mögliche Düngerzugaben wird empfohlen, die hierfür im Methodenbuch der BGK (*23*) hinterlegte Testmethode zu überprüfen und ggf. weiterzuentwickeln.

Ob darüber hinaus beim Einsatz von Komposten in gärtnerischen Erden und Kultursubstraten der bisher im RAL-GZ 251 Substratkompost verankerte **Test auf gasförmige Phytotoxen** zwingend erforderlich ist, sollte geprüft werden. Die bisher nur vereinzelt vorliegenden Untersuchungen lassen nach aktuellem Wissensstand der Autoren keine sicheren Schlussfolgerungen zu, ob gasförmige Phytotoxen – abgesehen von einer ggf. starken NH_3-Freisetzung aus bestimmten Komposten – tatsächlich eine wesentliche Rolle bzgl. möglicher Pflanzenunverträglichkeiten spielen.

Hinsichtlich der Praxisrelevanz einer phytotoxischen NH_3-Freisetzung ist weiterhin zu berücksichtigen, dass diese nach bisherigen Ergebnissen nur für Biogutkomposte als sicher gelten kann, da sehr hohe NH_4-N-Mengen über 400-500 mg NH_4-N/l FM in Grüngutkomposten nur in absoluten Ausnahmefällen vorkommen. Dies wird auch durch die Daten der BGK aus der Gütesicherung 251 Kompost für 2023 bestätigt, die für Grüngutkomposte einen Median von 39 und ein 90 %-Percentil von 230 mg NH_4-N/l FM ausweisen, während die Biogutkomposte 2023 einen Median von 274 und ein 90 %-Quantil von 739 mg NH_4-N/l FM erreichten (*37*).

Praxisrelevant erscheint dieser Test nach bisherigem Wissenstand daher eher nur in wenigen Fällen, v. a., wenn Biogutkomposte in Substraten eingesetzt werden, was in geringem Umfang für Blumenerden im Hobbybereich gilt.

5 Fazit: Praxisrelevante Reifeparameter für Grüngutkomposte beim Einsatz in gärtnerischen Erden und Kultursubstraten

Eine ausreichende **Reife – wie in Kap. 2.2 definiert als Kombination einer bereits weitgehend abgeschlossenen Rotte und einer guten Pflanzenverträglichkeit** – ist eine der **wichtigsten Eigenschaften von Grüngutkomposten**, die in **gärtnerischen Erden und Kultursubstraten** eingesetzt werden. Anders als bei der Freilandverwertung von Komposten kommen in Substraten mögliche Auswirkungen einer fehlenden Kompostreife i. d. R. unmittelbar zur Geltung, da die Pflanzenwurzel in abgeschlossenen Gefäßen diesen negativen Einflüssen kaum oder gar nicht ausweichen kann. Dies gilt für Phytotoxen im Material ebenso wie für auftretende „Nachrottephänomene" aufgrund von noch wesentlichen Anteilen mikrobiell umsetzbarer organischer Substanz im Kompost, also z. B. Sauerstoffkonkurrenz im Wurzelraum, Verpilzung und N-Fixierung. Wie die aufgeführten Daten zeigen, können dadurch erhebliche Pflanzenschädigungen hervorgerufen werden.

Um dies zu vermeiden und einen sicheren Komposteinsatz in Substraten auch bei sehr hohen Anforderungen, wie sie v. a. im Erwerbsgartenbau gegeben sind, zu gewährleisten, müssen im Rahmen der Kompost-Gütesicherung alle relevanten Aspekte der Reife eines Komposts geprüft werden. Betrachtet man unter diesem Gesichtspunkt die aktuell in Gütesicherungen – v. a. der RAL-Gütesicherung 251 Substratkompost – enthaltenen Parameterkataloge, Grenzwerte und Vorgehensweisen, so ist folgendes festzustellen:

a) Die **Prüfung der Pflanzenverträglichkeit** ist ein zentrales Element jeder Gütesicherung von Komposten für den Substrateinsatz und daher unabdingbar. Biotests, wie im RAL-GZ 251 Substratkompost als **Keimpflanzentest mit Sommergerste** verankert, sind hierfür i. d. R. gut geeignet und liefern zuverlässige Ergebnisse. Der Qualitätsparameter Pflanzenverträglichkeit ist nach allen bisherigen Erkenntnissen nicht durch die Prüfung anderer Qualitätsparameter ersetzbar.

   Drauf hinzuweisen ist, dass bei den Biotests geeignete Prüfkulturen wie Sommergerste oder Chinakohl eingesetzt werden sollten, die sensitiv auf pflanzenschädigende Stoffe reagieren, aber keinen Einfluss des Parameters Salzgehalt auf die Testergebnisse zulassen, wie dies z. B. bei Salat und Kresse der Fall ist.

   Im Rahmen eines möglichen Updates der Gütesicherung Substratkompost im RAL-GZ 251 der BGK wird außerdem angeregt, bei diesem Parameter wieder den früher genutzten Richtwert von 90 % Relativertrag in Bezug zur Kontrolle einzusetzen. Im Hinblick auf Prävention und eine bessere Kultursicherheit auch bei Einbeziehung hoher Kompostmengen in ein Kultursubstrat wird es als sinnvoll angesehen, den vor einigen Jahren im Wesentlichen aus statistischen Gründen auf 80 % Relativertrag herabgesetzten Richtwert für diesen speziellen Anwendungszweck zu revidieren und wieder den schärferen Richtwert einzusetzen.

b) Inwieweit über den vorgenannten Keimpflanzentest hinausgehende Biotests auf **gasförmige Phytotoxen** für die heutige Praxissituation, in der fast nur Grüngutkomposte im Substratbereich eingesetzt werden, noch ihre Berechtigung haben, sollte geprüft werden.

c) Eine **Analyse auf N-Immobilisierung** von Komposten über den **eingeführten Zöttl-Test** ist zwecks notwendiger Absicherung des Komposteinsatzes in Substraten anzuraten und sollte gerade bei hohen Substratanforderungen wie sie im Erwerbsgartenbau gestellt werden, als gesetzt gelten. Eine nochmalige Betrachtung der Testmethode im Lauf von weiteren Entwicklungen zur

Gütesicherung von Substratkomposten v. a. im Hinblick auf die Fragestellung der pH-bedingten Ausgasung von NH_3 aus dem zugegebenen Dünger wird vorgeschlagen.

d) Die Erfassung des Parameters **Rottegrad** über die **Methode der Selbsterhitzung** die bei der Gütesicherung von Biogutkomposten eingeführt, geeignet und auch für die Eigenüberwachung gut praxistauglich ist, wird nach den vorliegenden Ergebnissen nicht als sinnvoll bzgl. der Gütesicherung von Grüngutkomposten für den Substrateinsatz angesehen. Insbesondere für Grüngutkomposte mit höheren Holzanteilen im Input liefert diese Methode keine sicheren Werte, die eine **realistische Einschätzung** des **Rottefortschritts** gewährleisten und **orientierende Aussagen** zur **Reife** des geprüften Komposts ermöglichen. Inwieweit sich mit einer modifizierten Methodik, die die unter 4.2.3. d) angeführten Aspekte berücksichtigt, bessere Ergebnisse erzielen ließen, ist derzeit nicht bekannt.

e) Der **Rottegrad,** der über die Methode der **Atmungsaktivität** (AT) bestimmt wird, könnte nach ersten Ergebnissen bessere und sicherere Aussagen zum Rottefortschritt von Grüngutkomposten erlauben, als die Messung über die Selbsterhitzung. Die Messung der Atmungsaktivität (AT) ist eine auch schon früher zur **Prüfung von Rottefortschritt** und **Kompostreife** erfolgreich genutzte Prüfmethode. Sie wird überdies genutzt, um ablagerungsfähiges Material nach einer mechanisch-biologischen Restmüllbehandlung zu charakterisieren, wofür Vorgaben zur Methode und entsprechende Grenzwerte in der Deutschen wie der Österreichischen Deponieverordnung aufgeführt sind.

Diese Zusammenhänge sind insbesondere von Bedeutung, wenn es um die Gütesicherung von Grüngutkomposten für den Einsatz in gärtnerischen Erden und Kultursubstraten geht. Die o. g. bisherigen guten Ergebnisse mit der Methode der Atmungsaktivität bei verschiedenen Grüngutkomposten müssen jedoch im weiteren Verlauf des Projektes TerÖko im Hinblick auf Reproduzierbarkeit und Anwendbarkeit auf unterschiedliche Kompostmaterialien überprüft werden. Weiterhin stellen sich im Rahmen einer Verifizierung verschiedene Fragen zu Randbedingungen und Durchführung der Testmethode, wie sie bereits in Kap. 4.2.3 angesprochen wurden.

Eine entsprechende Methodenprüfung schließt auch Überlegungen zu neuen Richtwerten beim Parameter Atmungsaktivität für Komposte im Substrateinsatz ein. Die seitens des BGK-Methodenbuchs für diese Methode bisher vorgegebenen Richtwerte zur Definition des Rottegrades (*23*) sind für den Bereich von Fertigkomposten beim Substrateinsatz nach den neu vorliegenden Ergebnissen voraussichtlich als zu hoch anzusehen.

Bei der Richtwertfestlegung für diese Methode zur Prüfung von Substratkomposten sollte daher auch ein Abgleich mit den über die o. g. Deponieverordnungen gesetzten Grenzwerten für ablagerbare Restabfälle erfolgen, die eine nur noch sehr geringe Belastung mit mikrobiell umsetzbaren organischen Anteilen beschreiben. Denn mit den Grenzwerten der Deponieverordnung wird ja letztlich ein „weitgehend umsetzungsstabiles/inertes“ Material definiert, was auch für den Einsatz von Komposten in Kultursubstraten ein wesentlicher Gesichtspunkt ist.

Die in der deutschen bzw. österreichischen Deponieverordnung diesbezüglich aufgestellten Grenzwerte mit max. 5,0 bzw. 7,0 mg O_2/g TM stellen dabei(etwas) höhere Anforderungen an das Prüfmaterial, als dies mit dem derzeit seitens der BGK festgelegten Richtwert für Rottegrad V mit max. 20 mg O_2/g OM der Fall ist. Letzterer entspräche bei einem durchschnittlichen Gehalt der Komposte von 40 % OM (d. TM) umgerechnet ca. 8,0 mg O_2/g TM (Median des OM-Gehaltes aller Komposte in der RAL-Gütesicherung 251 Kompost in 2022 lag bei 40,8 % OM (d. TM) (Thelen-

Jüngling, 2023)). Die neue österreichische Kompostverordnung hat den o. g. Grenzwert von 7,0 mg O_2/g TM in 2024 zur Definition stabiler/reifer Komposte übernommen (*54*).

f) Weiterhin wird in diesem Zusammenhang empfohlen, die aktuellen Anpassungen auf europäischer Ebene bzgl. **des OUR-Tests** zu verfolgen (*55*). Dieser ist ähnlich wie der Test auf Atmungsaktivität aufgebaut, wird allerdings im aquatischen Milieu durchgeführt, was die grundsätzliche Frage bzgl. seiner Eignung für aerobe feste Materialien wie Komposte aufwirft.

g) Weitere Parameter wie das **C/N-Verhältnis** und der **Anteil an NO_3-N** am **gesamten löslichen N** sind in einer Betrachtung zur Reife von Komposten hilfreich und sollten genutzt werden, soweit vorhanden. Als alleinige Merkmale zur sicheren Einschätzung der Reife eines Kompostes – was die notwendige Pflanzenverträglichkeit ebenso wie eine fehlende wesentliche N-Fixierung einschließt – sind sie hingegen nicht geeignet. Weiterhin ist beim C/N-Verhältnis für eine sachdienliche Interpretation der Werte die Kenntnis des verarbeiteten Materials, der Rottezeit und -technik sowie der Sieblinie der Komposte notwendig.

Zusammenfassend lässt sich damit festhalten, dass in Bezug auf die notwendige **Definition einer ausreichenden „Reife“** von Grüngutkomposten zum Einsatz in gärtnerischen Erden für den Hobbybereich bzw. Kultursubstraten für den Erwerbsgartenbau, nach Stand des Wissens kein **einzelner „Schlüsselparameter“** in der **Gütesicherung der Komposte** existiert, der eine **allgemeingültige, sichere Aussage** erlaubt. Aufgrund der sehr hohen Anforderungen der o. g. Anwendungsbereiche an Komposte als Substratzuschlagstoffe zwecks Gewährleistung der Kultursicherheit wird daher die generelle Untersuchung der **drei wesentlichen Qualitätsparameter:**

- **Pflanzenverträglichkeit** (Keimpflanzentest nach RAL-GZ Substratkompost),
- **N- Immobilisation** (Zöttl-Test) und
- **Rottegrad** (Methode noch abschließend festzulegen)

als erforderlich angesehen. Aus der Kombination der Ergebnisse dieser drei Qualitätsparameter lassen sich mit **hoher Sicherheit die notwendigen Schlussfolgerungen bezüglich der Einsatzfähigkeit der Komposte im Bereich der Kultursubstrate** ziehen. Diese Aussage wird auch durch die in Abb. 11 festgehaltenen Ergebnisse bei der Kompostierung eines holzreichen Grüngutkompostes im Projekt TerÖko weiter untermauert.

Inwieweit darüber hinaus der Parameter „gasförmige Phytotoxen“ bei der Gütesicherung von Substratkomposten noch zwingend erforderlich ist, sollte geprüft werden. Die Einbeziehung weiterer Hilfsparameter (sofern vorliegend) wie des C/N-Verhältnisses oder des Anteils des NO_3-N am gesamten mineralischen N ist als sinnvoll zu betrachten, jedoch nicht ausschlaggebend.

Literatur

(*1*) Hirschler, O. (2022). Minderung des Torfeinsatzes in Deutschland: Was kann die Kompostwirtschaft dazu beitragen?
In: Kern, M.; Raussen, T. (2022). Steigende Wertschätzung für die Produkte der Bioabfallwirtschaft. Tagungsband „Biomasseforum Hersfeld 2022“, S. 63-70, Verlag Witzenhausen-Institut

(*2*) Luyten-Naujoks, K. (2024). Verbändeposition zur Torfminderung. H & K -Nachrichten Q 1/2024, S. 11

(*3*) Industrieverband Garten - IVG (Hrsg., 2025). Produktionsstatistik Consumer-Erden und Kultursubstrate – Produktionsjahr 2024. IVG, Düsseldorf; https://ivg.org/wp-content/uploads/2025/03/IVG-Produktionsstatistiken_2024-1.pdf (Zugriff 08/25)

(*4*) Frankenberg, A.; Buck, J.; Gottschall, R. (2023). Torfminderungsstrategie: Weniger Torf, mehr Kompost im Bio-Kräutertopf – Ergebnisse aus dem Projekt TerÖko.
In: Kern, M.; Raussen, T. (2023). 40 Jahre Biotonne – Erfolgsmodell für Nachhaltigkeit und Klimaschutz. Tagungsband „Biomasseforum Hersfeld 2023“, S. 126-136; Verlag Witzenhausen-Institut

(*5*) Gottschall, R.; Frankenberg, A.; Buck, J. (2024). Eignen sich Grüngutkomposte als Torfersatz im Topfkräuteranbau? Gemüse 4/2024, 53-55

(*6*) Gottschall, R.; Hauke, H.; Bieker, M.; Recht, R.; Peitzmeier, M.; Stöppler-Zimmer, H. (1997). Projektteil B, PlanCoTec: Kompostqualität und -herstellung. In: Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU, Hrsg.): Substratentwicklung auf Kompostbasis;
Abschlussbericht des gleichnamigen F- u. E-Vorhabens, Schriftenreihe der Deutschen Bundesstiftung Umwelt „Initiativen zum Umweltschutz“ Nr. 4, S. 8-106, Zeller Verlag, Osnabrück

(*7*) Weinhold, F.; Scharpf, H.C. (1997). Projektteil C, LVA Hannover-Ahlem: Pflanzenbauliche Untersuchungen. In: Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU, Hrsg.): Substratentwicklung auf Kompostbasis; Abschlussbericht des gleichnamigen F- u. E-Vorhabens, Schriftenreihe der Deutschen Bundesstiftung Umwelt „Initiativen zum Umweltschutz“ Nr. 4, S. 107-134, Zeller Verlag, Osnabrück

(*8*) Thelen-Jüngling, M. (2024). BGK-Statistik für 2023: Gütegesicherte Kreislaufwirtschaft. H & K – aktuell, Q1/24, 7-9
(https://www.kompost.de/fileadmin/user_upload/Dateien/HUK_aktuell/2024/H_K-Q-1-2024.pdf - Zugriff 31.08.2025)

(*9*) BGK-Bundesgütegemeinschaft Kompost e. V. (2025) RAL-GZ 251 Fertigkompost und Substratkompost, Köln, https://www.kompost.de/guetesicherung/guetesicherung-kompost, Zugriff 21.8.2025

(*10*) GGS – Gütegemeinschaft Substrate für Pflanzen e. V. (2025): RAL-GZ 255 Blumenerde, Hannover, https://www.substrate-ev.org/kriterien/blumenerde/, Zugriff 21.4.2025

(*11*) GGS – Gütegemeinschaft Substrate für Pflanzen e. V. (2025): RAL-GZ 252 Kultursubstrate, Hannover, https://www.substrate-ev.org/kriterien/kultursubstrate/, Zugriff 21.4.2025

(*12*) Will, T. (2022). Qualitätsschwankungen und unsichere Qualitätsparameter bei Grüngutkomposten. Diskussionsbeitrag von T. Will (Fa. Patzer Erden) beim TerÖko-Workshop der LVG Heidelberg, 9/2022

(*13*) Terstroet, P. (2024). Auswirkungen der Torfminderungsstrategie auf den Einsatz von Komposten in Hobbyerden. Vortrag zum BGK-Jahrestreffen 2024, Augsburg (https://www.kompost.de/publikationen/aktuelle-nachrichten/detail-ansicht/auswirkungen-der-torfminderungsstrategie-auf-den-einsatz-von-komposten-in-hobbyerden), Zugriff 30.08.2025

(*14*) Becker, G. (1998). Der Rottegrad als Gewährleistungskriterium für Kompostierungsanlagen. Münsteraner Schriftenreihe zur Abfallwirtschaft, Band 1. LASU-Labor für Abfallwirtschaft, Siedlungswasserwirtschaft und Umweltchemie der FH Münster (Hrsg.)

(*15*) DIN (Hrsg., 2012). Bodenverbesserungsmittel und Kultursubstrate: Bestimmung der aeroben biologischen Aktivität – Teil 1, Sauerstoffaufnahme (OUR). DIN EN 16087-1: 2011, deutsche Fassung

(*16*) Bidlingmaier, W.; Barth, J. (1993). Anforderungsprofile für Komposte im europäischen Vergleich. In: Wiemer, K.; Kern, M.: Biologische Abfallbehandlung, Tagungsband „Abfallwirtschaft. Neues aus Forschung und Praxis (1993)“, S. 105-130. M.I.C. Baeza-Verlag, Witzenhausen

(*17*) Kehres, B. (1990) Zur Qualität von Kompost aus unterschiedlichen Ausgangsstoffen. Dissertation, Univ. Kassel, Eigenverlag, Witzenhausen

(*18*) Gottschall, R. (1991). Möglichkeiten des Komposteinsatzes in Blumenerden und Substraten. Deutsche Friedhofskultur 82/6, 208-212

(*19*) Gottschall, R.; Treis, T.; Raussen, T. (2023). Wachstumsmarkt Biogut- und Grüngutkomposte – Bedarfsanalyse 2030. In: Kern, M.; Raussen, T.: 40 Jahre Biotonne – Erfolgsmodell für Nachhaltigkeit und Klimaschutz. Tagungsband Hersfelder Biomasseforum 2023, S. 69-90

(*20*) Gottschall, R.; Bruns, C. (2024). Grüngutkomposte in gärtnerischen Kultursubstraten: Qualitätssicherung und notwendige Kompostreife. Gemüse 8/2024, 36-37

(*21*) Bruns, C.; Janoura, R. (2024). Suppressive Effekte von Kompost. Gemüse 10/2024, 30-32

(*22*) Thelen-Jüngling, M. (2025). Protokoll der Sitzung des Bundesgüteausschusses der BGK 4/2025. BGK Köln

(*23*) BGK-Bundesgütegemeinschaft Kompost (Ed.) Methodenbuch zur Analyse Organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate, 5th ed.; BGK: Köln, Germany, 2006; Letzte Ergänzung 2015.

(*24*) DIN (2024). DIN EN 17505:2024-04, Boden- und Abfallbeschaffenheit - Temperaturabhängige Unterscheidung von Gesamtkohlenstoff (TOC400, ROC, TIC900); Deutsche Fassung EN 17505:2023. DIN-Media GmbH

(*25*) Bioabfallverordnung (BioAbfV 2012/22). Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf Landwirtschaftlich, Forstwirtschaftlich und Gärtnerisch Genutzten Böden; Bundesministerium f. Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz: Berlin, Germany, Available online: https://www.gesetze-im-internet.de/bioabfv/ (accessed on 15.05.2025).

(*26*) Jourdan, B. (1988). Zur Kennzeichnung des Rottegrades von Müll- und Müll-Klärschlammkomposten. Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft, Band 30, Erich Schmidt-Verlag

(*27*) LAGA-Länder Arbeitsgemeinschaft Abfall (Hrsg., 1995). Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 21: Merkblatt M 10 über Qualitätskriterien und Anwendungsempfehlungen für Kompost: Stand 15.02.1995. Erich-Schmidt-Verlag, Berlin

(*28*) Bidlingmaier, W. (Hrsg.) (1999): Biologische Abfallverwertung, Ulmer-Verlag

(*29*) Gottschall, R. (1990): Kompostierung: Optimale Aufbereitung und Verwendung organischer Materialien im ökologischen Landbau, Alternative Konzepte 45, 5. Auflage, C.-F.-Müller-Verlag, Karlsruhe

(*30*) Kranert, M. (1999). Grundlagen der Kompostierung; in: Bidlingmaier, W. (Hrsg.): Biologische Abfallverwertung, S. 37-55, Ulmer Verlag, Stuttgart

(*31*) Fricke, K., T. Turk, H. Vogtmann (Hrsg.) (1989): Erste Witzenhäuser Abfalltage – Grundlagen der Kompostierung von Bioabfällen, 75 - 183, Tagungsband Universität GH Kassel, Witzenhausen

(*32*) Fischer, P. (1988). Kompostierung von Grünrückständen - Ersatzprodukte für Torf durch Kompostierung pflanzlicher Materialien. Materialien Nr. 49 d. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, München

(*32a*) Fischer, P. (1991). Vom Grüngut zum Kompost, Leitfaden für die Kompostierung von pflanzlichen Rückständen, Bayer. Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, München

(*32b*) Jauch, M.; Fischer, P. (1991). Anforderungen an die Qualität von Komposten aus der Sicht des gärtnerischen Pflanzenbaus, ZVG Gartenbau-Report, 17/3, 12 – 15

(*33*) Gottschall, R. (2023). Analysedaten von Grüngut aus Landkreissammlungen der Anlage Ellershausen. Unveröffentlichte Versuchsdaten aus dem Projekt TerÖko. ISA, Neu-Eichenberg

(*34*) Gottschall, R., Biala, J. Vogtmann, H. (1995): Gartenbauliche Verwertung von kompostiertem BTA-Hydrolyserest, Müll & Abfall, 12/95, 829 – 838

(*35*) Bruns, C.; Gottschall, R. (2023). Analysedaten von im Projekt TerÖko hergestellten Grüngutkomposten der Anlagen Frankenhausen, Ellershausen und Wernfeld. Unveröffentlichte Versuchsdaten des Projektes TerÖko. Univ. Kassel, FÖL Witzenhausen

(*36*) Thelen-Jüngling, M. (2023): Statistik erzeugter Kompostmengen aus der Gütesicherung RAL GZ 251 der BGK 2022, H & K 1/2023, 3-4

(*37*) Thelen-Jüngling, M. (2024): Statistik erzeugter Kompostmengen aus der Gütesicherung RAL GZ 251 der BGK 2023, H & K 1/2024, 7-8

(*38*) Thom, M., Stöppler-Zimmer, H.; Gottschall, R. (1993). Berechnung der Korrelationen zwischen Parametern zur Bestimmung der Kompostqualität, insbesondere der Pflanzenverträglichkeit und rottebeschreibenden Parametern. Studie der igw-Kompostverwertung im Auftrag der Fa. Bühler, Braunschweig. IGW-Kompostverwertung, Witzenhausen

(*39*) Kranert, M.; Cord-Landwehr, K. (Hrsg., 2010). Einführung in die Abfallwirtschaft. 4. Auflage. Verlag Vieweg + Teubner, Springer-Fachmedien, Wiesbaden

(*40*) Binner, E. (2004). Bestimmung von Atmungsaktivität und Gasbildungspotential – neueste Erkenntnisse betreffend Fehlinterpretationen. Institut f. Abfallwirtschaft d. Universität f. Bodenkultur, Wien, Abfallforschungstage 2004.

(*41*) AbfAblV - Abfall Ablagerungs-Verordnung (2001/2009). Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen. BGBl. I S. 305 v. 20.2.2001. Außerkrafttreten/Übergang in Deponie-Verordnung 2009 (s. 42)

(*42*) DepV (2009/2021). Deponie-Verordnung, Anhang 4, Nr. 33.1: 2021-07 sowie Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und

Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung; Bundesgesetzblatt Jahrgang 2021 Teil I Nr. 43

(*43*) Thelen-Jüngling, M. (2025). Vergleich von AT_4 und OUR-Bestimmung. Anlage 1 zur Sitzung des Bundesgüteausschusses der BGK, 2./3.4. 2025, S. 1-4. BGK Köln

(*44*) Hirai, M. F.; Chanyasak, V.; Kubota, H. (1986). Effect of Compost Maturity on Plant Growth. Biocycle 04/1986, 58-61

(*45*) Zucconi, F.; Forte, M.; Monaco, A.; de Bertoldi, M. (1981). Biological Evaluation of Compost Maturity. Biocycle 08/1981, 27-29

(*46*) KTBL (Hrsg. 2024). Kompostierung im landwirtschaftlichen Betrieb: Verfahren, Recht, Kosten. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, Darmstadt

(*47*) Kranert, M.; Fritzsche, A.; Böhme, L.; Gottschall, R. Impact factors on the quality of separate-collected organic waste fromhouseholds. In Organic Resources and Biological Treatment—10th International Conference on Circular Economy and Organic Waste, 1st ed.; ORBIT, Ed.; ORBIT: Heraklion, Greek, 2016; Volume 1, pp. 82–85.

(*48*) Kranert, M.; Gottschall, R.; Bruns, C.; Hafner, G.; Schiere, O.; Seibel, C. (2007). Grünabfälle - besser kompostieren oder energetisch verwerten?- Vergleich unter den Aspekten der CO2-Bilanzund der Torfsubstitution. EdDE-Dokumentation 11, EdDE e.V., Köln

(*49*) Gottschall, R.; Vogtmann, H. (1988). Bedeutung und Verwendungsmöglichkeiten von Kompost in den „Grünen Bereichen“. Ifoam-Sonderausgabe Nr. 24. Stiftung Ökologie und Landbau, Kaiserslautern – ISBN 3-926104-24-4

(*50*) Gütegemeinschaft Substrate für Pflanzen e.V. (GGS, 2025). Gütekriterien für Rindenprodukte. GGS, Hannover (https://www.substrate-ev.org/kriterien/rindenprodukte/), Zugriff 30.8.2025

(*51*) Zöttl, H.-W. (1958). Die Bestimmung der Stickstoffmineralisation im Waldhumus durch den Brutversuch. Z. f. Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde, 81 (1), 35-50

(*52*) Meinken, E. (1985). Verfügbarkeit von Pflanzennährstoffen in Kultursubstraten aus Baumrinde. Dissertation, Universität Hannover, Fachbereich Gartenbau

(*53*) Grantzau, E.; Meinken, E.; Deller, B. (2006). Bestimmung der Stabilität des Stickstoffhaushalts organischer Materialien. VDLUFA-Methodenbuch Band 1: Die Untersuchung von Böden. A 13.5.1., 14.S., VDLUFA-Verlag, Darmstadt

(*54*) Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Klima und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft Österreich – BMLUK (2001/2025). Die Verordnung über Qualitätsanforderungen an Komposte aus Abfällen, BGBl. II Nr. 292/2001 (https://www.bmluk.gv.at/themen/klima-und-umwelt/abfall-und-kreislaufwirtschaft/recht/abfallwirtschaftsgesetz-verordnung/kompost.html), Zugriff 30.8.2025

Danksagung

An den zahlreichen älteren Projekten von PlanCoTec/ISA, die in diesem Übersichtsartikel aufgeführt sind, haben eine Reihe von Kollegen*innen bei der PlanCoTec-Gottschall, Witzenhausen und dem ISA-Ingenieurbüro f. Sekundärrohstoffe, Neu-Eichenberg, mitgewirkt, bei denen sich die Autoren an dieser Stelle noch einmal herzlich bedanken möchten:

- Dipl.-Ing. agr. Johannes Biala
- Dipl.-Ing./Dipl. geogr. Marion Bieker
- Dipl. Übers. Heidi Keber
- Dipl.-Ing. Martin Peitzmeier
- Dipl.-Ing. Richard Recht
- Dr. Dipl.-Ing. agr. Holger Stöppler-Zimmer
- Dipl.-Ing. Michael Thom

Ein herzlicher Dank geht weiterhin an Prof. Dr. Hardy Vogtmann (ehemals Fachgebiet ökologischer Landbau der Univ. Kassel) für die wissenschaftliche Begleitung eines Teils der vorgestellten Arbeiten.

Für eine Reihe von Kompostanalysen im gemeinsamen Projekt „Substratentwicklung auf Kompostbasis“ bedanken wir uns vielmals bei Dr. Frank Weinhold und Prof. Dr. H.-C. Scharpf (ehemals LVG Hannover-Ahlem).

Ein herzlicher Dank gilt auch den Kollegen*innen Dr. Gabriele Becker (INFA), Dipl.-Ing. agr. Maria Thelen Jüngling und Dr. Andreas Kirsch (BGK-Bundesgütegemeinschaft Kompost) sowie Dr. Manfred Bischoff (LUFA Nord-West) für das Redigieren des Artikels und eine Reihe von Anregungen und fruchtbaren Diskussionen zum Thema.

Ein weiterer herzlicher Dank geht an die Projektkoordinatorin TerÖko, Andrea Frankenberg von Bioland, und die geschätzten Kollegen*innen aus diesem Projekt, deren zahlreiche Diskussionsbeiträge mit dazu geführt haben, dass dieser Artikel entstanden ist.

Für die Förderung des F u. E-Projektes „Substratentwicklung auf Kompostbasis“ in den Jahren 1994-1996 bedanken wir uns auch an dieser Stelle vielmals bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, für die Förderung des Projektes „TerÖko“ in den Jahren 2020-2025 beim Bundesprogramm ökologischer Landbau (BÖL) in der BLE.

Weitere Infos und Ergebnisse des „TerÖko“-Projektes „Torfreduzierte und torffreie Substrate für den Ökologischen Kräuterbetrieb – Erprobung, Optimierung und Wissenstransfer unter: www.bio-zierpflanzen.de/anbauerinnen/forschung/projekte/teroeko/

Gefördert durch:

Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat

BÖL BUNDES-PROGRAMM ÖKOLOGISCHER LANDBAU

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

In Memoriam

Es ist uns ein Anliegen im Rahmen dieser Arbeit an die lieben Kollegen*in Dipl.-Ing. Gartenbau Heidi Hauke (PlanCoTec-Gottschall) sowie Dipl.-Ing. Gartenbau Martin Jauch und Prof. Dr. Peter Fischer (ehemals Institut f. Pflanzenernährung der FH Weihenstephan) zu erinnern, die viel zu früh verstorben sind. Mit ihren Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten haben diese Personen ab den 1990er-Jahren wesentlich zur Charakterisierung von Grüngutkomposten als Substratzuschlagstoffe beigetragen sowie den Einsatz dieser Komposte als Torfersatz im Substratbereich vorangetrieben.