

ZÜRCHER HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN  
DEPARTEMENT LIFE SCIENCES UND FACILITY MANAGEMENT,  
INSTITUT FÜR UMWELT UND NATÜRLICHE RESSOURCEN, WÄDENSWIL

**Biozyklische-vegane Humuserde im Vergleich mit konventionell-biologischem Kompost**

BACHELORARBEIT

von

**Renaud-dit-Louis Simone**

Bachelorstudiengang UI20

Abgabedatum: 11. Januar 2024

Studienrichtung: Umweltingenieurswesen

FACHKORREKTUR:

**Mathis, Alex**

ZHAW Life Sciences und Facility Management

Institut für Umwelt und natürliche Ressourcen

Grüentalstrasse 14, 8820 Wädenswil

**Dr. Kulli Honauer, Beatrice**

ZHAW Life Sciences und Facility Management

Institut für Umwelt und natürliche Ressourcen

Grüentalstrasse 14, 8820 Wädenswil

# IMPRESSUM

- Organisation: Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen
- Schlagworte: Biozyklische Humuserde, Nitratauswaschung, Topfversuch, Abbaubersuch, Pflanzenwachstum, biozyklisch veganer Anbau
- Zitiervorschlag: Renaud-dit-Louis, S. (2024). Biozyklische-vegane Humuserde im Vergleich mit konventionell-biologischem Kompost. Bachelorarbeit. Institut für Umwelt und natürliche Ressourcen (IUNR), Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW), Wädenswil.

## DANK

An dieser Stelle möchte ich mich bei meinem Betreuer Alex Mathis für die unaufgeforderte Unterstützung, die kurzfristige Verfügbarkeit bei Herausforderungen und die wertvollen Feedbacks bedanken. Danke auch an Beatrice Kulli für diverse Abklärungen und Anregungen während der Sitzungen. Dank an Simon Heiniger für die Einführung in den Abbaubersuch, die Auswertungen und die Unterstützung bei technischen Fragen.

Ein besonderer Dank geht an Matthias Lutz, der kurzfristig das Krankheitssymptom der Gurken untersucht hat. Dem Biozyklischen Park in Kalamata, Griechenland, sei für die Bereitstellung des in diesem Versuch verwendeten biozyklischen Humusbodens ebenfalls herzlich gedankt.

Außerdem möchte ich mich an dieser Stelle bei meinem Umfeld für die moralische Unterstützung während der Arbeit bedanken, die mich wesentlich vorgebracht hat. Liebe WG, vielen Dank für eure unermüdlichen Ohren zum Thema BioHu, die pragmatischen Tipps und danke für die vielen zufälligen Gespräche auf dem Flur und für euer Wissen. Vor allem möchte ich auch den geliebten Menschen in meinem Leben von Herzen danken.

## Zusammenfassung

Bio-vegane Produktionssysteme sind eine Nischeninnovation, um umweltschädliche landwirtschaftliche Praktiken zu vermeiden, die unter anderem das Klima und den natürlichen Stickstoffkreislauf beeinträchtigen können. Um der Herausforderung der Düngung in einem bio-vegane Produktionssystem zu begegnen, wird biozyklische-Humuserde (BioHu) von zertifizierten biologisch-vegane Betrieben verwendet. BioHu ist ein veganes Kompostprodukt, dessen organische Substanz nährstoff- und kohlenstoffstabilisierende Eigenschaften besitzt. Diese Eigenschaften wurden in einem Topfversuch im Vergleich zu einem konventionell-biologischen Kompost (NB) aus der Schweiz untersucht. Dazu wurden die zu untersuchenden Komposte als Reinsubstrate eingesetzt. So entstanden drei Verfahren: junge BioHu (BH1), alte BioHu (BH20) und der "Neubauerkompost" (NB), wobei sich die beiden BioHu in ihrer Reifedauer unterscheiden. Der Anbauversuch im Gewächshaus mit drei verschiedenen Kulturen (Salat, Gurke, Gerste) pro Medium lieferte während einer Anbauperiode Ergebnisse zur Nitratauswaschung und zu den Pflanzenmasseerträgen. Ein Abbaueversuch unter aeroben Bedingungen über 4 Monate lieferte Ergebnisse zur Kohlenstoffstabilität der Kompostsubstrate. Im direkten Vergleich deuten die Ergebnisse darauf hin, dass BH20 das stabilste Kompostsubstrat sein könnte, was durch die längere Reifezeit von BH20 unterstützt wird. Das Erklärungsmodell für die höhere Stabilität des Kohlenstoffs in BH1 im Vergleich zu NB bleibt offen, eine kalorimetrische Messung und eine Analyse der mikrobiellen Gemeinschaft könnten weitere Erkenntnisse liefern.

Die Unterschiede in den Pflanzenmasseerträgen zwischen den Kulturen und Substraten werden auf verschiedene Faktoren zurückgeführt, wie z. B. Schädlingsbefall, Unkrautdruck, Bewässerung, Ansprüche der Kulturen und Substrateigenschaften wie Wasserspeicherkapazität, Porosität und Feststoffdichte. Trotz der abiotischen und biotischen Faktoren, die die Ergebnisse des Pflanzenwachstums stark beeinflussen, scheint BioHu ein großes Potenzial für hohe Erträge zu haben, wenn die Bewässerung an das Substrat angepasst wird. BioHu reagiert empfindlicher auf suboptimale Bewässerung als NB. Trotz suboptimaler Bewässerung und hohem Stickstoffgehalt der BioHu, von dem vermutlich ein Teil mineralisiert wurde, war die Nitratauswaschung aus der BioHu geringer als aus dem Neubauerkompost. Eine an den Bedarf der Kultur angepasste Düngung scheint jedoch einen größeren Einfluss auf die Verminderung der Nitratauswaschung zu haben als das Substrat.

## Abstract

Bio-vegan production systems are a niche innovation to avoid environmentally damaging agricultural practices that affect the climate and the natural nitrogen cycle, among other things. To meet the challenge of fertilisation in an organic-vegan production system, organic humus soil (BioHu) from certified organic-vegan farms is used. BioHu is a vegan compost product whose organic matter has nutrient and carbon stabilising properties. These properties were analysed in a pot experiment in comparison with a conventional organic compost (NB) from Switzerland. The composts to be analysed were used as pure substrates. This resulted in three methods: young BioHu (BH1), old BioHu (BH20) and the "Neubauerkompost" (NB), whereby the two BioHus differed in their maturing time. The cultivation trial in the greenhouse with three different crops (lettuce, cucumber, barley) per medium provided results on nitrate leaching and plant mass yields during one cultivation period. A rotting test under aerobic conditions over 4 months provided results on the carbon stability of the compost substrates. In direct comparison, the results indicate that BH20 could be the most stable compost substrate, which is supported by the longer maturing time of BH20. The explanatory model for the higher stability of carbon in BH1 compared to NB remains open, a calorimetric measurement and an analysis of the microbial community could provide further insights.

The differences in plant mass yields between the crops and substrates are attributed to various factors such as pest infestation, weed pressure, irrigation, crop requirements and substrate properties such as water storage capacity, porosity and solids density. Despite the abiotic and biotic factors outside the substrate that strongly influence the results of plant growth, BioHu appears to have great potential for high yields if irrigation is adapted to the substrate. BioHu is more sensitive to sub-optimal irrigation than NB. Despite suboptimal irrigation and high nitrogen levels of BioHu that were mineralised, BioHu appears to be less susceptible to nitrate leaching than NB. The leached nitrate concentrations seem to depend more on a fertilisation adapted to the needs of the crop than on the substrate.

# Inhalt

<b>1. EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
<i>Spannungsfeld Landwirtschaft</i> .....	1
<i>Umweltgefährdende landwirtschaftliche Praxis</i> .....	1
<i>Biologische und Bio-vegane Landwirtschaft als ressourcenschonender Lösungsansatz</i> .....	2
<i>Forschungsfragen und -ziele</i> .....	3
<b>2. LITERATUR</b> .....	<b>4</b>
2.1 BEGRIFF BIOZYKLISCH-VEGANE LANDWIRTSCHAFT .....	4
2.1.1 <i>Definitionen vegane Landwirtschaft</i> .....	4
2.1.2 <i>Verbreitung der veganen Landwirtschaft</i> .....	4
2.1.3 <i>Biozyklisch-veganer Anbau</i> .....	5
2.2 BIOZYKLISCH HUMUSERDE .....	7
2.2.1 <i>Ausgangsmaterial, Kompostierung und Nachreifeprozess</i> .....	7
2.2.2 <i>Eigenschaften BioHu</i> .....	8
2.2.3 <i>Erklärungsmodell</i> .....	9
2.3 KOMPOST .....	10
2.3.1 <i>Was geschieht mit dem Stickstoff während der Kompostierung?</i> .....	10
2.3.2 <i>Eigenschaften von Kompostsubstraten</i> .....	11
2.3.3 <i>Freisetzung und Fixierung von Stickstoff bei der Kompost-Anwendung</i> .....	12
2.3.4 <i>Beeinflussende Substratfaktoren auf die Nitratauswaschung</i> .....	13
2.3.5 <i>Beeinflussende Umweltfaktoren auf die Nitratauswaschung</i> .....	16
2.4 KULTUREN .....	17
2.4.1 <i>Wachstumsindikatoren</i> .....	19
2.5 ABBAUVERSUCH .....	20
2.6 VOR- UND NACHTEILE VON ANBAU- UND GEFÄSSVERSUCHEN ZUR BESTIMMUNG DER NITRATAUSWASCHUNG .....	22
<b>3. METHODEN</b> .....	<b>23</b>
3.1 VERGLEICH VON BIOHU UND SUBSTRATKOMPOST (THEORIE) .....	23
3.2 SUBSTRATANALYSEN .....	23
3.2.1 <i>Lagerung Substrat und Probenahme</i> .....	23
3.2.2 <i>Bestimmung der Trockensubstanz</i> .....	23
3.2.3 <i>Analyse von Kohlenstoff und Stickstoff</i> .....	24
3.2.4 <i>Nachweis von Nitrat im Drainwasser</i> .....	24
3.2.5 <i>Bestimmung des EC und Salzgehalts</i> .....	25
3.2.6 <i>Festlegen der Humuszahl</i> .....	25
3.2.7 <i>pH-Bestimmung</i> .....	25
3.2.8 <i>Erhebung der Feststoffdichte</i> .....	26
3.2.9 <i>Bestimmung des Volumengewichts von Kompost</i> .....	26
3.2.10 <i>Messung der Wasserhaltekapazität und Porosität</i> .....	26
3.3 ANBAUVERSUCH .....	27
3.3.1 <i>Bonitur</i> .....	28
3.3.2 <i>Messung des Chlorophyllindex</i> .....	30
3.3.3 <i>Nitratbestimmung in der Gurke</i> .....	30

3.4 NITRATAUSWASCHUNG .....	30
3.5 ABBAUVERSUCH.....	31
3.6 STATISTIK.....	32
<b>4. RESULTATE.....</b>	<b>33</b>
4.1 VERGLEICH VON BIOHU ZU SUBSTRATKOMPOST (LITERATURARBEIT).....	33
4.2 SUBSTRATANALYSE.....	35
4.3 ANALYSE AUSWASCHUNG.....	37
4.4 TEMPERATURDATEN.....	38
4.5 ANALYSE BIOMASSE UND WURZELN.....	39
4.5.1 Gerste .....	39
4.5.2 Gurke.....	41
4.5.3 Salat.....	44
4.5.4 Trockenmasse Gurke, Salat, Gerste .....	47
4.5.5 Krankheiten.....	48
4.5.6 Chlorophyllindex.....	50
4.5.7 Wurzelbonitur.....	50
4.6 ANALYSE CO <sub>2</sub> -PRODUKTION DES ABBAUVERSUCHS .....	52
<b>5. DISKUSSION .....</b>	<b>53</b>
5.1 VERGLEICH VON BIOHU ZU SUBSTRATKOMPOST (LITERATURARBEIT).....	53
5.2 NITRATAUSWASCHUNG .....	55
5.3 UNTERSCHIEDE IM PFLANZENWACHSTUM.....	58
5.4 CO <sub>2</sub> -PRODUKTION WÄHREND DEM ABBAUVERSUCH.....	62
<b>6. SCHLUSSFOLGERUNG.....</b>	<b>64</b>
<b>7. LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>65</b>

## Liste der Abkürzungen

BioHu	Biozyklische Humuserde
BH1	junge biozyklische Humuserde
BH20	alte biozyklische Humuserde
NB	Neubauerkompost
WHK	Wasserhaltekapazität
TS	Trockensubstanz
POM	partikuläre organische Masse
MAOM	mineralisch-assoziierte organische Masse

## 1. Einleitung

### **Spannungsfeld Landwirtschaft**

Die Landwirtschaft kann multifunktionale Leistungen erbringen. So werden bei der Bewirtschaftung von Land nicht nur Lebensmittel, Brennstoff oder Textilien produziert, sondern auch Ökosystem- und Kulturleistungen erbracht, indem beispielsweise Landschaften offengehalten werden. In der Schweiz sind Leistungen, wie– Ernährungssicherheit, Erhalt der natürlichen Lebensgrundlage oder Pflege der Kulturlandschaft sogar als Anforderungen an die Landwirtschaft gesetzlich verankert (Bundesgesetz über die Landwirtschaft (Landwirtschaftsgesetz, LwG), 1998). Die Ansprüche an die Landwirtschaft sind vielfältig und kreieren mit den aktuell gängigen Produktionssystemen Spannungsfelder zwischen Ernährungssicherheit, Energie-/ Textilproduktion, Umweltauswirkungen und sozialen sowie kulturellen Sachverhalten. Gemäss Willet et al. (2019) ist die Nahrungsmittelproduktion eine der grössten Triebkräfte der globalen Umweltveränderungen. Willet et al. (2019) bezeichnen die nicht nachhaltig produzierten Lebensmittel gar als ein globales Risiko für die Ernährungssicherheit und für die Stabilität des Erdsystems. Auch laut Foley et al. (2011) kann die Anforderung an den Erhalt der natürlichen Lebensgrundlage aufgrund des Agrarsystems nicht ausreichend erfüllt werden, weil das System zu Degradierung von Land, Wasser, Artenvielfalt und Klima führt. Die intensivierte Landwirtschaft ermöglicht eine gesteigerte Produktivität, die theoretisch genügend Lebensmittel für die steigende Nachfrage (aufgrund des Bevölkerungswachstums) zur Verfügung stellen könnte (Albrecht & International Assessment of Agricultural Knowledge, Science and Technology for Development, 2009). Allerdings wirtschaftet sie auf Kosten der natürlichen Ressourcen. So werden der Klimawandel, Biodiversitätsverluste, schwindende Wasserressourcen, Veränderung von natürlichen Phosphor- und Stickstoffkreisläufen, Landnutzungsänderungen und die chemische Verschmutzung tangiert (Poore & Nemecek, 2018; Rockström et al., 2009; Willett et al., 2019). Weiterführend können diese Umweltauswirkungen irreversibel Folgen haben und das Klimasystem verändern. Die Folgen der Umweltauswirkungen beeinflussen schliesslich wiederum die Nahrungsmittelproduktion, weil diese von einem funktionierenden Erdsystem abhängig ist (Willett et al., 2019).

### **Umweltgefährdende landwirtschaftliche Praxis**

Es stellt sich die Frage, welche landwirtschaftlichen Praktiken negative Umweltauswirkungen verursachen und welche Massnahmen getroffen werden müssten, dass in einem für die menschliche Entwicklung sicheren Rahmen gewirtschaftet werden könnte. Das Modell der planetaren Grenzen geht dem Aspekt des für die menschliche Entwicklung sicheren Handlungsspielraum nach. Durch das Modell werden die Umweltauswirkungen der einzelnen Bereiche wie beispielsweise dem Klimawandel quantifiziert und in Zusammenhang gesetzt mit einem für die Menschen sicheren Handlungsrahmen. Ein besonderes Augenmerk ist auf die Bereiche des Klimawandels und des Stickstoffkreislaufs zu legen, in welchen die planetaren Grenzen bereits überschritten wurden. Insbesondere die Viehwirtschaft und die Stickstoffemissionen von Düngern spielen eine bedeutende Rolle bei der Überschreitung dieser planetaren Grenzen (Poore & Nemecek, 2018; Reutimann et al., 2022; Rockström et al., 2009). Für die

## Einleitung

Viehwirtschaft wie für die Stickstoffemissionen von Düngern bestehen alternative Ansätze, welche die negativen Umweltemissionen reduzieren (Engelhardt et al., 2020).

### **Biologische und Bio-vegane Landwirtschaft als ressourcenschonender Lösungsansatz**

Empirisch betrachtet können biologische Produktionssysteme aufgrund ihres organischen und reduzierten Düngereinsatzes grundsätzlich dazu beitragen, dass weniger Stickstoff in die Umwelt gelangt. Beispielsweise sind die Nitratemissionen ins Grundwasser bei einer auf den Ertrag angepassten und organischen Düngung geringer als bei intensiver Düngung mittels mineralischer Dünger bei gleichem totalen Stickstoffgehalt (Kramer et al., 2006; Wei et al., 2021). Ein innovativer Ansatz zur Schonung natürlicher Ressourcen bietet ein biologisch-veganes Produktionssystem. Durch den Verzicht auf die Viehwirtschaft innerhalb einer veganen landwirtschaftlichen Produktion könnten klimaschädliche Kohlenstoff- und Stickstoff-Emissionen eingespart werden (*Umwelt Schweiz 2018*, 2018). Um den Stickstoffbedarf der Pflanzen organisch zu decken, stehen pflanzliche Dünger wie Komposte, Mulche und andere Biomasse zur Verfügung (Mann, 2020; Schmutz & Foresi, 2017). Aufbauend auf diesen Aspekten bietet sich beispielsweise die Kompostierung von nicht tierischem Material an, um Umweltauswirkungen der Viehwirtschaft und gewisse Stickstoffemissionen von Düngern zu umgehen.

Im Rahmen der „biozyklisch-veganen Landwirtschaft“ wurde ein veganes Kompostprodukt entwickelt namens „biozyklische Humuserde“ (BioHu). Der biozyklisch-vegane Anbau wirtschaftet vegan und biologisch. Das bedeutet, dass weder die kommerzielle Tierhaltung erlaubt ist noch tierische Produkte (Gülle, Mist, Schlachtabfälle) eingesetzt werden und zertifizierte Betriebe keine synthetischen Mittel verwenden im Anbau. Der biozyklischen-veganen Landwirtschaft liegt das Schliessen und der Erhalt von Kreisläufen zugrunde (Santi, 2022).

Kompost als Abfallprodukt ist ein wichtiger Bestandteil der landwirtschaftlichen Kreislaufwirtschaft. Ausserdem gewinnt das Produkt Kompost an Bedeutung unter anderem aufgrund seiner Nährstoff- und Kohlenstoffspeicherfähigkeit. Nebst dem durch die Speicherfähigkeiten zugeschriebenen Potenzial hat die Kompostwirtschaft auch Schwachstellen. Beispielsweise nimmt die Kohlenstoffbindungsrate langfristig ab (Martínez-Blanco et al., 2013). Zudem spielt die Anwendungsart des Kompostes eine grosse Rolle bei der Nitrat Auswaschung (Wei et al., 2021).

Erste Beobachtungen und Versuche, die mit der BioHu unternommen wurden, scheinen vielversprechend zu sein hinsichtlich der Kohlenstoffsequestrierung und einer verminderten Eutrophierung (J. Eisenbach, 2022).

### Forschungsfragen und -ziele

Das vegane Kompostprodukt BioHu, als neuartige, nährstoff- und kohlenstoffstabilisierte Form organischer Substanz, soll auf seine Eigenschaften untersucht werden. Im Rahmen dieser Arbeit stehen dabei die Kohlenstoffspeicherung und der Faktor der Nitratauswaschung im Zentrum. Anhand folgender Fragen sollen in dieser Arbeit dem Potenzial der BioHu nachgegangen werden:

- Wie lässt sich biozyklische Humuserde definieren im Vergleich zu normalem Kompostsubstrat?
- Ist die Gefahr einer Auswaschung von Nitrat bei der biozyklischen Humuserde geringer im Vergleich zu konventionellem Kompost?
- Wie unterscheidet sich das Pflanzenwachstum in der biozyklischen Humuserde im Vergleich zu Kompost?
- Wie ist das Abbauverhalten (Corg) von biozyklischer Humuserde im Vergleich zu Kompost?

Die vorliegende Arbeit nutzt eine Literaturrecherche als auch einen An- und einen Abbaueversuch, um das Pflanzenwachstum, die Nitratauswaschung und das Abbauverhalten zu untersuchen. Mittels der Literaturrecherche wird das Konzept der biozyklisch-veganen Landwirtschaft erläutert. Die Literaturrecherche dient zudem dazu den Begriff biozyklische Humuserde zu definieren und abzugrenzen von dem Begriff des Kompostsubstrats. Mit bestehenden und öffentlich zugänglichen Quellen zur BioHu werden auf deren Ausgangsmaterialien, Kompostierung und Reifegrad eingegangen. Nebst der Nitrat- und Kohlenstoffspeicherungsfähigkeit von Kompost werden die Wasserhaltekapazität, die elektrische Leitfähigkeit, die Humuszahl und der pH beleuchtet. Beim Anbauversuch in Töpfen wird im Drainwasser das Nitrat gemessen. Anhand der Messwerte sollen im Vergleich mit einem Kompostsubstrat aus der Schweiz Aussagen über die Auswaschungsgefährdung von Nitrat der biozyklischen Humuserde gemacht werden.

Der Vergleich des Pflanzenwachstums und der Pflanzengesundheit zwischen der biozyklischen Humuserde und Kompost erfolgt, indem während der gesamten Kulturdauer Bonituren von drei unterschiedlichen Kulturen (Salat, Gurken, Gerste) durchgeführt werden. Um lediglich die N-Wirkung des Substrats auf den Ertrag zu erfassen, wurden keine weiteren Düngerzugaben verabreicht. Anhand der durchgeführten Substratanalysen, den durch die Literaturrecherche ermittelten Einflussfaktoren auf einen Anbauversuch und den Erträgen wird das Ertragsniveau verglichen.

Um die Stabilität von Kohlenstoff im Substrat zu beurteilen, wird die CO<sub>2</sub>-Produktion auf dem OxiTop® Messsystem der Xylem Analytics Germany Sales GmbH & Co während knapp vier Monaten gemessen. Aufgrund des Einflusses des Alters und der Reife eines Komposts auf die Kohlenstoffproduktion werden bei der BioHu zwei Verfahren von unterschiedlichem Alter geprüft. Das Forschungsziel ist somit darauf ausgerichtet agronomische und umweltauswirkende Aspekte beider Substrate zu untersuchen.

## 2. Literatur

In diesem Kapitel wird der Begriff biozyklische-vegane Landwirtschaft ausgeführt. Zudem wird die Kombination der biologischen mit der veganen Landwirtschaft erläutert. Die Rolle des Kompostes, bestehend aus nicht tierischen Materialien als Hauptbestandteil einer biologisch-veganen Düngung, wird beleuchtet. Ein besonderes Augenmerk wird auf die Eigenschaften der Nitrat- und Kohlenstoffspeicherung gelegt. Die Ergebnisse bei einem Anbauversuch in Töpfen können durch unterschiedliche Faktoren beeinflusst werden. Um diese in der Arbeit zu berücksichtigen, werden beeinflussende Faktoren zum Schluss dieses Kapitels dargestellt. Letztlich werden die Vor- und Nachteile eines OxiTop Messsystems für die CO<sub>2</sub>-Produktion diskutiert.

### 2.1 Begriff biozyklisch-vegane Landwirtschaft

#### 2.1.1 Definitionen vegane Landwirtschaft

Mann (2020) beschreibt eine vegane Landwirtschaft als ein landwirtschaftliches Produktionssystem, welches keine Tiere tötet. Der Begriff vegane Produktion wird von Dorgbetor et al. (2022) mit den Worten „rein pflanzliche landwirtschaftliche Produktion“ bezeichnet. Ergänzend wird angefügt, dass ein veganes Produktionssystem keine Form der Viehhaltung oder Erzeugnisse von Wiederkäuern umfasst. Diese Definition der veganen Landwirtschaft über den Ausschluss von nicht erlaubten Bestandteilen wird auch von Visak (2007) verwendet. Die Verwendung von Dung, der bei der Tierproduktion anfällt, wird ausgeschlossen, sowie die Produktion der tierischen Produkte: Fleisch, Milch, Eier und Honig. Krayer (2021) verwendete den Begriff vegane Landwirtschaft, um pflanzliche Produktionssysteme zu beschreiben, die keinen Zusammenhang mit tierischen Produktionssystemen haben. Im Gegensatz zur traditionellen Landwirtschaft, bei der die pflanzliche mit der tierischen Produktion verknüpft ist in ihren Masse-, Nährstoff- und Energieflüssen.

#### 2.1.2 Verbreitung der veganen Landwirtschaft

Obwohl die vegane Ernährung in der Bevölkerung immer grössere Akzeptanz und Verbreitung findet (Statistiken zu vegetarisch und vegan lebenden Menschen in der Schweiz 2022, 2022; Vegane Lebensmittel, 2021) und bereits vegane Landwirtschaft erfolgreich praktiziert wird (Engelhardt et al., 2020; Seymour & Utter, 2021; Visak, 2007), bestehen noch wenige wissenschaftliche Konzepte zur Umsetzung einer veganen Landwirtschaft. Dass es sich um eine kleinskalige Verbreitung von vegan wirtschaftenden Betrieben handelt, zeigt sich beispielsweise an der Nennung der biozyklisch-vegane Landwirtschaft in einer Steckbriefsammlung von Nischeninnovationen für das Ernährungssystem in Europa (Engelhardt et al., 2020). Die biologische, vegane Landwirtschaft ist eine Untergruppe im Bereich der veganen Landwirtschaft. Die Definition der veganen Landwirtschaft bestimmt kein Anbausystem. Ein Betrieb ohne Viehwirtschaft kann zwischen den verschiedenen Produktionssystemen konventionell oder biologisch wählen (Krayer, 2021; Mann, 2020). Aufgrund der moralischen Motivation für die Anliegen der Umwelt und der Tierethik kombinieren die meisten Betriebe die vegane Landwirtschaft mit einer biologischen Anbauweise (Bonzheim, 2014). Insgesamt wurden in Nordamerika um die 50

Betriebe erfasst, die biologisch und vegan wirtschaften (Utter & Seymour, 2021). In Europa existieren aktuell um die 70 Betriebe, die selbsterklärt vegan oder zertifiziert biologisch-vegan wirtschaften. Zertifiziert sind die Betriebe entweder mit den biozyklisch-veganen Richtlinien oder mit den „Stockfree-Organic Standards“, einem England und Irland vorherrschenden biologisch-veganen Label (Location – Vegan-Farming.Org, 2023). Folgend wird vertieft auf die biozyklisch-vegane Landwirtschaft eingegangen.

### 2.1.3 Biozyklisch-veganer Anbau

Die Grundlagen für die biozyklisch-vegane Anbauweise wurde in den zwanziger und dreissiger Jahren des 20. Jahrhunderts von den ersten Landbaupionier:innen gelegt. Weiterentwickelt wurde der Ansatz ab den 1950er Jahren von Adolf Hoops, der ab den achtziger Jahren zusammen mit Dr. agr. Johannes Eisenbach die Grundlagen für die biozyklisch-veganen Richtlinien legte. Das Ziel der biozyklisch-veganen Idee besteht im Erhalt und der Wiederherstellung von natürlichen Kreisläufen. Der Erhalt der natürlichen Bodenfruchtbarkeit wird als ein Grundbaustein betrachtet, um gesunde Pflanzen, gesunde Menschen und schliesslich einen gesunden Kreislauf zu schaffen. Ursächlich für den Einbezug des veganen Prinzips sind die negativen Effekte der Viehwirtschaft auf die Umwelt, das Klima, die Gesundheit, die soziale Gerechtigkeit und die Ernährungssicherheit. Zudem werden die ethischen Aspekte als weitere Begründung aufgeführt. Die negativen Effekte der Viehwirtschaft auf das Klima, die bei einer veganen Wirtschaftsweise wegfallen, werden von Poore und Nemecek (2018) ausführlicher erläutert. Sie schreiben, dass bei einem Verzicht auf Viehwirtschaft aufgrund eines geringeren Ressourceneinsatzes Emissionen vermieden werden können, weil einerseits kein Futtermittel transportiert werden muss und andererseits kein Verlust an Kalorien besteht durch das System Tier entsteht. Des Weiteren entfällt durch den Verzicht auf die Viehwirtschaft die Entwaldung für die Landwirtschaft, die hauptsächlich für den Anbau von Futtermittel anfällt und zur Freisetzung von Kohlenstoff führt. Zuletzt fallen keine Emissionen aus enterischer Fermentation, der Gülle und der Verarbeitung von tierischen Produkten an.

Der biozyklisch-veganen Wirtschaftsweise werden bezüglich der Standorteignung Regionen der gemässigten Zonen zugeordnet und Orte, an welchen die traditionelle Landwirtschaft mit Tierhaltung nicht möglich ist (Santi, 2022). Seit 2017 ist der biozyklisch-vegane Anbau international vom weltweiten Netzwerk zur Förderung der ökologischen Landwirtschaft und der nachhaltigen Entwicklung, dem IFOAM (International Federation of Organic Agriculture Movements), anerkannt (Förderkreis Biozyklisch-Veganer Anbau e.V., o. J.). Im folgendem Absatz werden Unterschiede zwischen den Richtlinien für den biozyklisch-veganen Anbau zu anderen biologischen Anbausystemen beschrieben.

Der wesentliche Unterschied zwischen den Richtlinien der biozyklisch-veganen Produktion zur konventionell-biologische Produktion liegt darin, dass bei letzterer Tierhaltung für kommerzielle Zwecke nicht ausgeschlossen wird. Für eine biologische Produktion ist die Tierhaltung nicht verpflichtend im Gegensatz zur biologisch-dynamischen Produktionsweise, in der sie Voraussetzung ist für eine Demeter-Zertifizierung (Verein für biologisch-dynamische Landwirtschaft und Schweizerischer Demeter-Verband, 2023). Die Tierhaltung ist gemäss den Demeter-Richtlinien von Bedeutung für die Humusbildung. Demgegenüber stehen die biozyklisch-veganen Richtlinien, laut welcher für Humusbildung nicht zwingend tierische Produkte benötigt werden. Stattdessen soll reifes Kompostsubstrat genutzt

werden zur dauerhaften Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit. Weitere Praktiken, um die Bodenfruchtbarkeit zu erhöhen, bestehen darin den Boden ganzjährigen zu bedecken und in der Erhöhung des Humusgehalts im Boden mittels Leguminosen, Mulch und der Flächenkompostierung. Ausserdem soll eine schonende Bodenbearbeitung durchgeführt werden. Durch die Förderung der Bodenfruchtbarkeit soll die biozyklisch-vegane Produktionsweise zur Pflanzengesundheit beitragen. Zusätzlich dazu werden in den biozyklisch-vegane Richtlinien Mischkultursysteme und die Schaffung optimaler Wachstumsbedingungen aufgezählt, um die Pflanzengesundheit zu fördern. Im Allgemeinen steht der präventive Ansatz im Zentrum bei der Schädlings-, Beikraut- und Krankheitsbekämpfung. Synthetische Betriebsmittel werden weder in der Nährstoffversorgung noch bei dem Schädlings-, Beikraut- und Krankheitsmanagement eingesetzt (Santi, 2022).

Die Chancen der biozyklisch-vegane Landwirtschaft sind ökologisch, ökonomisch und sozialer Natur (Tierwohl). Neben der Förderung der Biodiversität, dem ökologischen Potenzial für Boden, Wasser, Klima, Luft und der Förderung von regionalen Nährstoffkreisläufen nennt Engelhardt (2020) das ökonomische Potenzial für regionale Wirtschaftskreisläufe, die Erhöhung der Ernährungssicherheit und der Herstellung von Transparenz entlang der Wertschöpfungskette. Ob die Ernährungssicherheit verbessert wird durch ein veganes Anbausystem oder beeinträchtigt wird, ist nicht abschliessend geklärt (Dorgbeter et al., 2022; Engelhardt et al., 2020; Seymour & Utter, 2021). Aufgrund der Kombination der vegane Landwirtschaft mit der biologischen Landwirtschaft sieht sich die biozyklisch-vegane Landwirtschaft mit den Herausforderungen beider Produktionsweisen konfrontiert. Die Gewährleistung der Ernährungssicherheit des biologischen Landbaus wird von Barbieri et al. (2021) in Frage gestellt. Besonders die Mindererträge der biologischen gegenüber der konventionellen Landwirtschaft werden dabei als Ursache aufgeführt. Die Viehhaltung spiele in der biologischen Landwirtschaft eine wichtigere und komplexere Rolle, um die Verfügbarkeit von Nahrungsmitteln sicherzustellen, als bisher angenommen. Anders als in anderen Studien zur Skalierbarkeit der biologischen Landwirtschaft wurde von Barbieri et al. (2021) die Stickstoffverfügbarkeit berücksichtigt. Die Verfügbarkeit dieses Nährstoffs wird als grundlegender limitierender Faktor genannt für die globale Umsetzung. Ausserdem verweisen Seymour und Utter (2021) sowie Schmutz und Foresi (2017) im Rahmen der biologisch vegane Landwirtschaft auf die Herausforderung der Nährstoffverfügbarkeit. Dieser Herausforderung soll im biozyklisch-vegane Anbau zum einen mit Mischkulturen, Mulchen und Gründüngungen begegnet werden, zum anderen mit der BioHu. Die Rolle der BioHu im biozyklisch-vegane Anbau, sowie deren Bestandteile, Nachreifungsprozess und Eigenschaften werden anschliessend betrachtet.

## 2.2 Biozyklisch Humuserde

Die Verwendung von reifem Kompost in Substratqualität (bspw. BioHu) ist ein wesentliches Kennzeichen des biozyklisch-veganen Anbauprinzips. In dieser Arbeit wird der Begriff Kompostsubstrat verwendet für reifen Kompost in Substratqualität. Die Voraussetzung für eine dauerhafte Bodenfruchtbarkeit wird im biozyklisch-veganen Anbauprinzip durch die BioHu bereitgestellt. Ausserdem dient die BioHu als Hauptgrundlage der Pflanzenernährung und des Pflanzenschutzes (Santi, 2022). Die Bedeutung der BioHu im biozyklisch-veganen Anbau für die Bodenfruchtbarkeit, die Pflanzenernährung und -gesundheit lässt sich durch ihre Eigenschaften erklären, die im folgenden Kapitel erläutert werden.

### 2.2.1 Ausgangsmaterial, Kompostierung und Nachreifeprozess

Ursprünglich stammt die BioHu aus dem Biocyclic Park in Kalamata, Griechenland (*BIOCYCLIC PARK / Kalamata*, o. J.). Als Ausgangsmaterial für die BioHu werden Oliventrester, Traubentrester und Olivenblätter verwendet. Die BioHu ist somit rein pflanzlichen Ursprungs. Hergestellt wird der Kompost nach dem gelenkten Wärmerotte-Verfahren mit der Lübke-Hildebrandt Methode. Im Unterschied zur Lübke-Hildebrandt Methode wird auf die Zugabe von Erde oder Ton verzichtet. Der dadurch entstandene Qualitätskompost wird anschliessend mit einem Nachreifeverfahren zu BioHu weiterverarbeitet. Die organische Substanz bestehe in diesem stabilen Zustand der BioHu fast ausschliesslich aus reinem Humus und wird daher auch als Humuserde bezeichnet. Die Reifestufe einer Humuserde gehe über den Rottegrad (Rottegrad V) eines gewöhnlichen Kompostsubstrates hinaus (Santi, 2022), wobei mit Rottegrad der Abbaugrad der organischen Substanz bezeichnet wird (Bundesgütegemeinschaft & Kompost e.V., 2010). Die Skala der Rottegrade reicht vom Rottegrad II bis zum Rottegrad V. Die Rottegrade II und III werden als unreifer Frischkompost bezeichnet. Fertigkomposte werden in den Rottegrad IV und V eingeteilt und Kompostsubstrat in den Rottegrad V.

Das Nachreifeverfahren erfolgt anhand einer permanenten Bepflanzung der Kompostmieten mit Mischkulturen über eine Dauer von mindestens fünf Jahren (Eisenbach, 2022). Der gesamte Herstellungsprozess wird dokumentiert und ist von der international anerkannten Öko-Kontrollstelle CERES zertifiziert (Förderkreis Biozyklisch-Veganer Anbau e.V., o. J.).

### 2.2.2 Eigenschaften BioHu

Da die BioHu andere Eigenschaften als handelsübliche Komposte hat, wird sie zur Verwendung als Dünger wie auch als reines Substrat empfohlen. Die niedrige elektrische Leitfähigkeit (Tabelle 1) und die weitgehende Absenz von wasserlöslichen Nährstoffen bei Abtropftest werden als Indizes für eine tiefe Auswaschungsgefährdung der BioHu bezeichnet. Weitere Eigenschaften der BioHu sind in der folgenden Tabelle (Tabelle 1) aufgelistet.

*Tabelle 1 Eigenschaften der BioHu und deren Ausprägungen (Eisenbach, 2022; Förderkreis biozyklisch-veganer Anbau, o.J)*

<b>Eigenschaften</b>	<b>Ausprägung BioHu (mind. 8 Jahre)</b>
Spezifisches Gewicht	700-850 g/Liter
elektrische Leitfähigkeit	< 600 $\mu$ S/cm
Wasserlöslichkeit der Nährstoffe	Keine nennenswerten Mengen an wasserlöslichen Nährstoffen
Kationen-Austauschkapazität	> 80 meq/100g
pH	7.6
Wasserhaltekapazität	über 80%
Stickstoffgehalt	2.5 - 3.0%
C:N-Verhältnis	8 - 12
Pflanzengesundheit	Extrem gesund, weil fast keine Fungizide eingesetzt werden müssen
Pflanzenwachstum	Aussergewöhnlich kräftig
Wurzelfreundlichkeit	Keine Einschränkungen, Einsatzmöglichkeit bereits bei Sämlingen und Jungpflanzen
Ertrag	Sehr hohe Erträge

Verschiedene Feldversuche von Eisenbach et al. (2019), Roussis et al. (2019) und Kakabouki et al. (2021) haben die Auswirkung von BioHu auf das Wachstum und den Ertrag von Süsskartoffeln und Tomaten untersucht. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass BioHu den Ertrag beider Kulturen signifikant erhöhte im Vergleich zu unbehandelten Kontrollen und Kulturen, die mit anorganischem Dünger behandelt wurden. Die BioHu kann gemäss Eisenbach et al. (2018, 2019) eine vielversprechende Steigerung der Ernteerträge darstellen. Es wird davon ausgegangen, dass die BioHu optimale Umgebungsbedingungen für das Pflanzenwachstum bietet. Die gleichen Ergebnisse wurden von Schubert (2023) an Deutschem Weidelgrass beobachtet als die BioHu als reines Substrat angewendet wurde. Es wird vermutet, dass bei der Anwendung von BioHu als eine Düngerzugabe der Stickstoff immobilisiert und damit eine negative kurzfristige Stickstoffwirkung erzielt wird. Schubert (2023) erwähnt, dass die BioHu kein kurzfristig pflanzenverfügbarer N-Dünger zu sein scheint. Es wird die These aufgeführt, wonach die Stickstoff-Bereitstellung für die Pflanzen hauptsächlich über die Bakterien und Mykorrhizen in der BioHu geschieht und diese Mechanismen aufgrund von Umweltfaktoren nicht abgelaufen sind. Diese These der Stickstoff-Bereitstellung über die Bakterien und Mykorrhizierung korrespondiert mit dem Erklärungsmodell für die Eigenschaften der BioHu von Eisenbach et al. (2019) und Eisenbach (2022).

### 2.2.3 Erklärungsmodell

Gemäss Eisenbach et al. (2019) besteht das Erklärungsmodell für die Eigenschaften der BioHu darin, dass es sich um eine kohlenstoffstabilisierte Form organischer Substanz handelt. Die Kombination aus mikrobiellem Abbau und symbiontischer Prozesse innerhalb von Mischkultursystemen während dem Nachreifeprozess fixieren den Kohlenstoff der organischen Substanz in einer vorkristallinen Gitterstruktur. Die Pflanzen leben in Symbiose mit den freilebenden Azotobacter, welche in der Lage sind Stickstoff aus der Luft zu binden und der Pflanze zur Verfügung zu stellen und im Austausch dafür Kohlenstoff erhalten. Der Kohlenstoff wird von den Pflanzen über die Wurzeln in den Boden geleitet. Im Boden steht er den Azotobacter als Baustoff und Energielieferant zur Verfügung. Der Stoffaustausch stimuliert das Pflanzenwachstum, wodurch wiederum mehr Kohlenstoff in den Boden geleitet wird. Dr. agr. Eisenbach (2022) nimmt an, dass dieser Kohlenstoff unter anderem eine vorkristalline Gitterstruktur formt. Innerhalb der Gitterstruktur können sich Azotobacter ansiedeln. Die festgestellten steigenden Pflanzenmasseerträge mit fortschreitendem Nachreifeprozess der BioHu lassen sich dadurch erklären. Die Entwicklung zur vorkristallinen Gitterstruktur während dem Nachreifeprozess bietet zunehmende Ansiedlungsmöglichkeiten für Azotobacter, wodurch das Pflanzenwachstum stimuliert wird. Zudem soll die vorkristalline Gitterstruktur Nährstoffmoleküle vor der Auswaschung schützen (L. Eisenbach et al., 2019). Auch die langfristige Kohlenstoffspeicherung und der Anstieg der Bodenfruchtbarkeit lässt sich gemäss Eisenbach (2022) auf die stabilisierte Struktur zurückführen.

Die dauerhafte Bindung des Kohlenstoffs in der BioHu gegenüber dem Kompost geht aus den Ergebnissen von Kakabouki et al. (2021) nicht hervor. Kakabouki et al. (2021) haben die Respiration von organischen Reststoffen (BioHu, Kompost, Mist) und mineralischem Dünger gemessen anhand der Titrationmethode. Die beobachteten CO<sub>2</sub> Messwerte waren bei der BioHu im Jahr 2018 höher als beim untersuchten Kompost, obwohl der gemessene Bodenkohlenstoff gleich war. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass eine höhere organische Substanz mit einer höheren mikrobiellen Aktivität im Boden einhergeht. Eine höhere organische Substanz kann die Bodenqualität verbessern und somit die Bedingungen für den Pflanzenbau. Die Auswertung der Ergebnisse belegt, dass die BioHu die höchsten Erträge erbracht hat, was mit der verbesserten Bodenqualität zu erklären sei.

Das Ertragspotential und die Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit konnte demnach literaturübergreifend bestätigt werden. Die Ergebnisse zur Stabilität des Kohlenstoffs wichen jedoch von den theoretischen Erwartungen ab.

## 2.3 Kompost

Auch die BioHu ist im Wesentlichen ein Kompost, der einen zusätzlichen Verarbeitungsschritt durchläuft. Nach der Kompostierung wird die BioHu als Miete belassen und mit Mischkulturen bepflanzt. Die Kompostierung an sich ist eine umweltfreundliche und effiziente Methode zur Entsorgung und Wiederverwertung von Biomasseabfällen, bei der Nährstoffe in den Kreislauf zurückgeführt werden. Die Biomasseabfälle, die für die Produktion von BioHu verwendet werden, sind Oliventrester, Traubentrester und Olivenblätter (Zhao et al., 2020). Durch die Umwandlung von organischen Abfällen in Kompost bietet die Kompostierung eine wertvolle Ressource zur Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit und -qualität (Kupper & Fuchs, 2007), wie auch Studien zur BioHu gezeigt haben. Kompost hat verschiedene Eigenschaften und Auswirkungen auf den Boden. Einerseits können die physikalischen Eigenschaften des Bodens verbessert werden, indem die Wasserspeicherkapazität erhöht, der Gesamtgehalt der organischen Substanz gesteigert und die Struktur optimiert werden (Ayilara et al., 2020; Jakobsen, 1996; Kupper & Fuchs, 2007; Martínez-Blanco et al., 2013). Andererseits enthält Kompost wichtige Nährstoffe wie Stickstoff, der für das Wachstum und die Entwicklung von Pflanzen unerlässlich ist (Kupper & Fuchs, 2007; Liu et al., 2014). Nebst den physikalischen Wirkungen auf den Boden wird das Bodenleben von Kompost positiv beeinflusst (Šimon & Czakó, 2014).

Kompost hat einen wichtigen Einfluss auf die Stickstoffdynamik. Der Einsatz von Kompost wird als eine mögliche Lösung gegen die Eutrophierung und Degradierung von Ökosystemen genannt (Houlton et al., 2019; Jakobsen, 1996). Die Nitratauswaschung aus landwirtschaftlichen Böden liegt den Problemen als Hauptquelle zu Grunde (Goucher et al., 2017; Tamagno et al., 2022). Kompost kann diese Prozesse insofern beeinflussen, indem er die Bodenqualität erhöht und eine Quelle von Nährstoffen in organischer Form darstellt, die von den Mikroorganismen im Boden langsam in einer pflanzenverfügbaren Form freigesetzt werden. Kompost wirkt daher wie ein Langzeitdünger (Liu et al., 2014; Šimon & Czakó, 2014). Weitere beeinflussende Faktoren für die Nitratauswaschung sind das C:N-Verhältnis und die Nitratkonzentration selbst. Abhängig von der Qualität des Komposts und der Anwendung hat Kompost das Potential die Auswaschung zu mindern. Umweltfaktoren wie die Temperatur und die Häufigkeit, die Menge und die Intensität des Niederschlags spielen ebenfalls eine Rolle in Bezug auf ihre Auswirkung auf die Nitratauswaschung (Bruin et al., 2010; Houlton et al., 2019; Lv et al., 2019; McNeill & Unkovich, 2007).

### 2.3.1 Was geschieht mit dem Stickstoff während der Kompostierung?

#### **Stickstoffverluste während der Kompostierung**

Kompost hat nicht nur Vorteile in Bezug auf Stickstoffverluste, sondern kann auch selbst Stickstoffverluste verursachen, die während des Produktionsprozesses entstehen. Im Durchschnitt gehen während der Kompostierung etwa 30 % des ursprünglich vorhandenen Gesamtstickstoffs verloren. Die Stickstoffverluste sind auf verschiedene Faktoren zurückzuführen, unter anderem auf die Kompostierungsmethode, das Ausgangsmaterial und die Dauer der Kompostierung. BioHu ist ein Produkt, das mindestens fünf Jahre lang reift, was eine wesentlich längere Produktionszeit ist als bei den meisten Komposten. Zeitabhängige Stickstoffverluste könnten daher bei der BioHu-Produktion relevant sein. Das C:N-Verhältnis und der pH-Wert der Ausgangsmaterialien können den Prozess beschleunigen oder verlangsamen. Bei der Kompostierungsmethode spielen der Feuchtigkeitsgehalt und die Anzahl der

Umsetzungen eine wichtige Rolle, da sie den Sauerstoffgehalt in der Miete wesentlich beeinflussen. (Zhao et al., 2020). Zusätzlich zu den Stickstoffverlusten während der Kompostierung entstehen auch Treibhausgase. Teilweise können mehr Treibhausgase anfallen bei der Produktion von Kompost (50-180 kg CO<sub>2</sub>-eq/ t FS) als bei der Produktion von Mineraldüngern (50-100 kg CO<sub>2</sub>-eq/ t FS) gemäss den Zahlen aus den Branchenrichtlinien zu Produktion aus Vergärung und Kompostierung (2022). Deshalb ist eine Optimierung der Kompostierungsmethode im Hinblick auf den Stickstoffverlust ratsam.

### **Stickstoffformen während der Kompostierung**

Bei der Kompostierung kommen in den unterschiedlichen Phasen unterschiedliche Mikroorganismen zum Einsatz. Während Mikroorganismen die organische Substanz abbauen, wird Kohlenstoff in die Atmosphäre abgegeben und Stickstoff wird in Form von Ammoniakgas freigesetzt. Nach der Mineralisation wird Ammonium zu Nitrat umgewandelt (Nitrifizierung), wobei als Zwischenprodukt Nitrit entsteht. Damit der gesamte Prozess reibungslos ablaufen kann, ist ausreichend Sauerstoff erforderlich, da sonst Ammonium nicht nitrifiziert werden kann (Kupper & Fuchs, 2007; Liu et al., 2014). Ammonium ist besonders auswaschungsgefährdet und tritt vor allem in jungen Komposten auf, die sich noch in der Nitrifizierungsphase befinden. Sobald der Kompost reif ist, wird er in der Landwirtschaft, im Gartenbau oder im gedeckten Pflanzenbau ausgebracht. In der Schweiz geschieht dies in der Regel nach 11 bis 38 Wochen. BioHu durchläuft also einen deutlich längeren Produktionsprozess. Vor der Anwendung müssen Kriterien zur Reifebeurteilung sowie gewisse Qualitätsanforderungen erfüllt sein. Bezüglich Stickstoff sind die Anforderungen der Schweizer Qualitätsrichtlinien, dass der mineralische Stickstoff mehrheitlich in Form von Nitrat vorliegt, keine Stickstoffblockierung durch die Anwendung erfolgt und wenig Nitrit vorhanden ist. Alle diese Anforderungen sollten für BioHu kein Problem darstellen. Die Anforderungen an den Gesamtstickstoffgehalt liegen über 12 g / kg TS, wobei der mineralische Stickstoff von besonderer Bedeutung ist, da er pflanzenverfügbar ist. Komposte mit hohem Reifegrad weisen im Allgemeinen ein geringes Risiko der Stickstoffblockierung auf. (Baier et al., 2022; Borchard et al., 2012; McNeill & Unkovich, 2007).

### **2.3.2 Eigenschaften von Kompostsubstraten**

Die Anforderungen für Kompost werden unterteilt nach ihrem Anwendungszweck. Die im vorherigen Kapitel beschriebenen Anforderungen bezüglich des Stickstoffs basieren auf Kompost, der für den Gartenbau verwendet wird. Der Kompost eignet sich für den Einsatz als Substrat. Weitere Kriterien für Kompostsubstrat nach den Qualitätsrichtlinien der Branche (Baier et al., 2022) sind in der Tabelle 2 aufgelistet (siehe Anhang 1).

Zusätzlich zu den in der Tabelle 2 aufgeführten Kriterien werden von der Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (SR 814.81) der Schweiz Forderungen gestellt an den Schwermetallgehalt, die polzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe, Dioxine, Furane und den Fremdstoffanteil. Insgesamt 27 Angaben müssen getestet und deklariert werden, wenn Kompost für den Gartenbau in der Schweiz in den Verkauf gelangt. Die Angaben zur Pflanzenverträglichkeit sind in der Tabelle 2 wörtlich kurz zusammengefasst. Die Qualitätsrichtlinien der Branche (2022) sind verkürzt dargestellt und teilweise erweitert mit Angaben aus anderen Quellen (Ho et al., 2022; Kupper & Fuchs, 2007).

### 2.3.3 Freisetzung und Fixierung von Stickstoff bei der Kompost-Anwendung

Kompost dient den Mikroorganismen im Boden als Nährstoffquelle für das mikrobielle Wachstum und den Stoffwechsel, da die Zersetzung der organischen Substanz in Komposten oft noch nicht vollständig abgeschlossen ist. Zuerst findet eine Assimilation statt, wodurch die organische Substanz zunimmt, sowie eine Dissimilation. Sobald die Mikroorganismen genügend Stickstoff für die Assimilation haben, werden Abfallprodukte freigesetzt (Averill & Waring, 2018). Diese Abfallprodukte werden mineralisiert. Je nach Zusammensetzung des Kompostes erfolgt nach der Mineralisation eine anschließende Nitrifikation und Denitrifikation. Folgend findet ein kontinuierlicher Transfer statt zwischen dem Stickstoff, der in der mikrobiellen Biomasse immobilisiert ist, und dem freigesetzten mineralischen Stickstoff als gelöster und pflanzenverfügbarer Stickstoff. Die Immobilisierung von Stickstoff kann auf verschiedene Weisen erfolgen. Es gibt die organische und die nicht-biologische Immobilisierung. Die organische Immobilisierung erfolgt über Mikroorganismen. Indirekt können die Mikroorganismen Ammonium und in geringem Masse Nitrat assimilieren. Die direkte biologische Fixierung findet statt, indem die Mikroorganismen niedermolekulare stickstoffhaltige organische Verbindungen nutzen, ohne dass der Stickstoff den Ammonium Pool durchläuft. Die nicht-biologische Immobilisierung beinhaltet die Fixierung von Stickstoff entweder an Ton-Gittern oder die Adsorption an organischer Substanz (Borchard et al., 2012; Lv et al., 2019; McNeill & Unkovich, 2007). Die Sorption von organischem Kohlenstoff ist abhängig vom pH-Wert als auch von der Nährstoffversorgung der mikrobiellen Masse. Herrscht ein stabiler pH-Wert und sind die Mikroorganismen in Unterversorgung mit Stickstoff, kann eine Stickstoffdüngung die mikrobielle Aktivität steigern, wodurch die Zersetzungsrate steigt. Die Zunahme des Mikrobewachstums und deren Aktivität erhöht die Sorption von gelösten Stoffen an Ton-Gittern oder organischen Substanzen (Averill & Waring, 2018).

#### **Verfügbarkeit von Stickstoff für die Pflanzen**

Befindet sich der Stickstoff in mineralischer Form kann er von den Pflanzen aufgenommen werden. Die Aufnahme von organischem Stickstoff ist seltener und erfolgt hauptsächlich bei niedrigen mineralischen Stickstoffkonzentrationen im Boden sowie geringer Konkurrenz zu Bodenmikroben. Kompost hat eine tiefe direkte Stickstoffverfügbarkeit für die Pflanzen von lediglich 5 – 15% des gesamt ausgebrachten Stickstoffs (Reimer et al., 2023). Beeinflusst wird die Stickstoffaufnahme der Pflanzen durch die Konzentration von Ammonium und Nitrat in der Bodenlösung, die Wurzelverteilung und die Mykorrhizierung, die mittels Enzyme nicht verfügbare Nährstoffe freisetzen kann. Des Weiteren spielen der Bodenwassergehalt und die Durchlüftung, die Temperatur und die Pflanzenwachstumsrate bedeutende Rollen bei der Stickstoffaufnahme durch die Pflanze. Bei einer nicht an den Pflanzenbedarf angepassten Düngung geht der überschüssige Stickstoff in ionischer oder gasförmiger Form verloren (Auswaschung, Verflüchtigung, Denitrifikation). Aufgrund der Adsorption von Ammonium an Kationenaustauschstellen im Boden ist der Massefluss und die Diffusion von Ammonium geringer als die von Nitrat (Bruin et al., 2010; Liu et al., 2014; Lv et al., 2019; McNeill & Unkovich, 2007; Šimon & Czakó, 2014). In der Studie von Reimer et al. (2023) erwies sich die N-Versorgung der Pflanzen als wichtigster Faktor für die Ernteerträge. Wobei die Stickstoffwirkung von der moderaten Mineraldüngung zu höheren Trockenmasse Erträgen führt als die Stickstoffdüngung bei Kompostanwendung. Dies führen Reimer et al. (2023) darauf zurück, dass die Düngereffizienz von der Mineraldüngung höher ist als bei einer regulären Kompostanwendung. Diese Ineffizienz wird durch die mangelnde

Synchronisierung zwischen dem Stickstoffbedarf der Pflanzen und der Freisetzung des Stickstoffs verursacht. Am meisten Stickstoff wird im Sommer freigesetzt, aufgrund hoher Temperaturen die Mineralisierung zunimmt. Der höchste Stickstoffbedarf vieler Kulturen ist im Frühjahr. Nach der Ernte und im Winter werden zudem bis zu 35% mineralisiert, weil der Kompost weiter zersetzt wird. Dadurch kann ein Stickstoffverlust entstehen, wenn keine Deckfrüchte vorhanden sind (Bruin et al., 2010; Reimer et al., 2023).

Diese langsame Stickstofffreisetzung über die Zeit kann einerseits dazu führen, dass eine mangelnde Synchronisation zwischen Stickstoffbedarf der Pflanzen und der Freisetzung besteht (Reimer et al., 2023). Andererseits kann die langsame Freisetzung kontinuierlich Stickstoff bereitstellen, wodurch das Risiko von Nitratverlusten verringert werden kann, und die Effizienz erhöht wird (Y. Xu et al., 2020). Die Freisetzung des mineralischen Stickstoffs ist abhängig von den landwirtschaftlichen Praktiken, den Mikroorganismen, der Bodenbeschaffenheit, der Temperatur, dem Wassergehalt, dem organischen Dünger und der Kultur (Liu et al., 2014; Reimer et al., 2023). Kulturen mit verlängerten Wachstumsperioden im Sommer wie Mais oder spätreifende Kartoffeln profitieren stärker von einer Kompostdüngung aufgrund des Musters der Stickstofffreisetzung (Reimer et al., 2023).

Die mangelnde Synchronisation der Stickstoffdüngung mit dem Stickstoffbedarf der Pflanzen wird von Lv et al. (2019) nebst Überschwemmungsbewässerung als Hauptursache für die Nitratbelastung des Grundwassers genannt. So wurden die Auswaschungsverluste des Gesamtstickstoffs durch die Anwendung von Kompost erhöht. Eine Tropfbewässerung in Kombination mit einer optimierten Düngung reduzierte die Auswaschung von Nitrat und gelöstem organischem Stickstoff (GOS) um 88-90% ohne den Ertrag zu beeinträchtigen. Die Auswaschung von GOS wird in wenigen Studien berücksichtigt. Nichtsdestotrotz trägt GOS zur Eutrophierung und Versauerung bei. Das gemessene Verhältnis von GOS zu Nitrat im Drainwasser ist 1:2. Die gesamt ausgewaschenen Stickstoffmenge besteht demnach laut Lv et al. (2019) aus einem Teil GOS und aus zwei Teilen Nitrat. Bei Xu et al. (2020) waren gar 54-67% des gesamten ausgewaschenen Stickstoffs GOS. Die zweitgrößte ausgewaschenen Stickstoffform war Nitrat und der Anteil an Ammonium war relativ gering.

### 2.3.4 Beeinflussende Substratfaktoren auf die Nitratauswaschung

#### **Huminstoffe, Humuszahl und Corg**

Huminstoffe sind wichtige Komponenten von Humus und haben zahlreiche agronomisch Funktionen, zu welchen die Nährstoffrückhaltung gehört. Die Rückhaltung von Nährstoffen kann mit dem chemischen Aufbau der Huminstoffe erklärt werden (Ho et al., 2022). Aufgebaut sind die Huminstoffe aus Gruppen wie Carboxyl und phenolischen Säuren. Wenn COOH deprotoniert wird, kann es eine Bindungsstelle sein für Amine. Zudem handelt es sich bei den Huminsäuren um stickstoffreiche Heteropolymere. Daher scheinen sie indirekt eine Rolle zu spielen in der Auswaschung von Stickstoff (Zavarzina et al., 2021). Über die Humuszahl und den Gehalt an organischem Kohlenstoff können Aussagen über Huminstoffe im Medium gemacht werden. Zwar bestehe kein direkter Zusammenhang zwischen der Humuszahl und den Huminstoffen, dennoch wird bei der Bestimmung der Humuszahl die Farbgebung des flüssigen Extrakts den Vorläufern der Huminstoffe zugeordnet. Mit fortschreitender Reifung werden die wasserlöslichen Vorläufer in die komplexen Moleküle der Huminstoffe eingebaut, wodurch die Farbintensität des wässrigen Extraktes sinkt (Kupper & Fuchs, 2007). Eine kleine Humuszahl deutet

auf einen reifen Kompost hin, in welchem stabile Humusverbindungen vorhanden sind. Stabile Humusverbindungen weisen darauf hin, dass Huminstoffe vorliegen. In stabilen Humusverbindungen wird Stickstoff eingebaut oder daran adsorbiert (Abächerli et al., 2010; Zavarzina et al., 2021). Der organische Kohlenstoff weist auf das Vorhandensein von Huminstoffen hin, weil er zu 80-90% aus Huminstoffen besteht (Zavarzina et al., 2021).

### **C:N-Verhältnis**

Mehrere Quellen weisen darauf hin, dass das C:N-Verhältnis signifikant die Stickstoffauswaschung beeinflussen (Ho et al., 2022; Zhao et al., 2020). Auch Hauert (2012) schreibt, dass das C:N - Verhältnis auf die Stickstofftransformation Einfluss nimmt. So wird bei einem C:N-Verhältnis von weniger als 25 der Stickstoff mineralisiert, vorausgesetzt der Boden ist gut durchlüftet und nicht vernässt. Eine Immobilisation des Stickstoffes findet statt, wenn das C:N-Verhältnis grösser als 25 ist, in diesem Falls wird der Stickstoff für den Aufbau der mikrobiellen Biomasse verwendet (Hauert, 2012). Diese Auswirkungen des C:N-Verhältnisses auf die Stickstofftransformation wurde von den Autor:innen Zaho et al. (2020) und Ho et al. (2022) in Zusammenhang mit dem Stickstoffverlust gesetzt. Das optimale Verhältnis liege im Bereich von 25-30, dadurch können die Verluste weitgehend verhindert werden (Zhao et al., 2020). Liegt das Verhältnis unter diesem Optimum, wird vermutet, dass die Mikroorganismen mit zu viel Stickstoff versorgt sind, was zu den Stickstoffverlusten führt. Die Verluste werden in diesem Fall verstärkt durch hohe Temperaturen (Ho et al., 2022). Im Fall eines zu hohen C:N-Verhältnis von 35-50 könne es auch zu Stickstoffverlusten kommen. Diese Erkenntnisse beruhen auf Beobachtungen während der Kompostierungsdauer (Ho et al., 2022; Zhao et al., 2020).

Darüber hinaus hängt die Aufnahme von Kohlenstoff und Stickstoff durch Mikroorganismen vom ursprünglichen Versorgungsgrad mit diesen Nährstoffen zusammen. Das C:N-Verhältnis sei nicht der einzige Faktor, der die Stickstofftransformation beeinflusst, vielmehr sollte laut Xu et al. zusätzlich zum C:N-Verhältnis auch die molekulare Komposition der organischen Masse charakterisiert werden. Die molekulare Komposition des Substrates kann vermutlich die Fähigkeit der Mikroorganismen beeinflussen, Kohlenstoff als Nährstoff oder für Energie zu nutzen. Aus diesem Grund könnten die Immobilisation und die Nitrifikation beeinflusst werden, was sich wiederum auf die Stickstoffauswaschung auswirkt (Y. Xu et al., 2020).

Nebst dem optimalen C:N - Verhältnis spielen demnach die Versorgung der Mikroorganismen mit Kohlenstoff und Stickstoff sowie die molekulare Komposition von Kohlenstoff und Stickstoff bedeutende Rollen bezüglich der Stickstoffauswaschung.

### **pH**

Nicht nur der absolute pH-Wert modifiziert Stickstofftransformationen, sondern auch Änderungen im pH-Wert (Averill & Waring, 2018; McNeill & Unkovich, 2007). Ursächlich für die pH-bedingte Nitratauswaschung wird von einigen Autor:innen die Nitrifikation genannt, die selbst vom pH-Wert beeinflusst wird. Die optimalen pH-Bedingungen für die Nitrifikation liegen im Bereich gemässiger pH-Werte (Averill & Waring, 2018; Borchard et al., 2012; McNeill & Unkovich, 2007). Laut Nevins et al. (2020) liegt der optimale pH für die Nitrifikation bei etwa 8.0. Averill & Waring (2018) spezifizieren, dass die Nitrifikation lediglich ein Problem darstellt, wenn mehr Stickstoff vorhanden ist, als die Pflanzen benötigen. Die Nitrifikation kann in diesem Fall den pH-Wert des Bodens senken, wodurch das mikrobielle Wachstum und die Zersetzung reduziert werden. Einerseits kann eine gehemmte

mikrobielle Aktivität dazu führen, dass weniger nitrifiziert, wodurch der Stickstoffverlust sinkt. Andererseits nimmt die mikrobielle Biomasse als Speicher für Stickstoff ab. Von Wang et al. (2019) wurde bei sauren Bedingungen ( $\text{pH} < 7$ ) im Boden eine höhere Nitratauswaschung gemessen. Zhao et al. (2020) haben bei sauren pH-Werten ( $\text{pH} < 5$ ) eine Reduktion des Stickstoffverlustes festgestellt. Sie führen dieses Verhalten auf eine gehemmte mikrobielle Aktivität zurück. Gleichermassen wurden die Stickstoffverluste gehemmt bei pH-Werten von mehr als 8.5. Auch hier werden die sinkenden Stickstoffverluste mit einer gehemmten mikrobiellen Aktivität begründet. Bei pH-Werten, die im neutralen Bereich lagen ( $\text{pH}$ : 5.5-7.0) wurde eine tiefere Stickstoffauswaschung angegeben, je näher der pH-Wert bei 7 lag. Ebenso wie bei den stark vom neutralen pH abweichenden Werten wurde hier die Aktivität der Mikroorganismen als Erklärung herangezogen. Im neutralen pH-Bereich ist die mikrobielle Aktivität ausgeprägt und kann dadurch als mikrobielle Stickstoff-Senke fungieren (Zhao et al., 2020). Ein stabiler pH führt zum Wachstum der mikrobiellen Biomasse (Averill & Waring, 2018).

Zusammenfassend liegt der Änderung der Stickstoffauswaschung aufgrund des pH-Wertes die mikrobielle Biomasse und deren Aktivität zugrunde. Eine hohe Aktivität der mikrobiellen Biomasse kann einerseits dazu führen, dass die Nitrifikation gesteigert wird, was bei niedrigem Stickstoffbedarf der Pflanzen, zu einer Stickstoffauswaschung führen kann. Andererseits kann eine gesteigerte mikrobielle Biomasse vermehrt Stickstoff aufnehmen, wodurch die Stickstoffverluste gemindert werden. In den Bereichen von 4,0-5,5 und 5,5-7,0 und  $> 8,5$  scheint die Stickstoffauswaschung am geringsten zu sein gemäss (2020). Laut Wang et al. (2019) ist die Nitratauswaschung am geringsten bei pH-Werten  $> 7$ .

### **Feuchtigkeitsgehalt**

Eine zu hohe Feuchtigkeit kann die Nitratauswaschung erhöhen (Bruin et al., 2010). Zum einen kann Feuchtigkeit die Mineralisation beschleunigen (Lv et al., 2019). Zum anderen kann die Aktivität der aeroben Mikroben verringert werden durch zu viel Feuchtigkeit im Substrat (Kupper & Fuchs, 2007). Um die mikrobielle Aktivität aufrechtzuerhalten und Stickstoffverluste zu verhindern, wird von Zhao et al. (2020) ein optimaler Feuchtigkeitsgehalt im Kompost zwischen 40 und 60% empfohlen. Die Feuchtigkeit hängt indirekt mit der Wasserhaltekapazität des Substrates sowie der Bewässerung zusammen, die bedeutend auf die Nitratauswaschung einwirken (McNeill & Unkovich, 2007). Denn die Bewegung von Nitrat bedingt die Mobilität von Wasser im Substrat ab (Lv et al., 2019).

### 2.3.5 Beeinflussende Umweltfaktoren auf die Nitratauswaschung

Als Umwelteinfluss auf die Nitratauswaschung wird unter anderem auch die Temperatur genannt und der Niederschlag (Tamagno et al., 2022; Y. Wang et al., 2019).

#### **Bewässerung**

Die Studie von Xu et al. (2020) geht davon aus, dass aufgrund der intensiven Gemüseproduktion in Gewächshäusern mit hohen N-Düngungsraten ein Großteil des überschüssigen Stickstoffs an die Umwelt verloren geht. Intensive Gemüseproduktionssysteme seien potenzielle Hotspots für die N-Auswaschung. Laut Xu et al. (2020) sind detaillierte Studien erforderlich, um Strategien zur Verringerung der N-Auswaschungsverluste aus Gewächshausböden im Gemüseanbau zu entwickeln. Die Studie von Lv et al. (2019) weist darauf hin, dass in Solargewächshäusern das Grundwasser aufgrund der Überflutungsbewässerung mit Nitrat kontaminiert wird. In der Regel ist die Nitratauswaschung im Freiland jedoch geringer als im Gewächshaus. Aus Kostengründen wird in Gewächshäusern nicht übermäßig bewässert. Gemäss McNeill & Unkovich (2007) kann eine an den Boden, die Kultur und die Witterung angepasste Bewässerung die Nitratauswaschung minimieren. Demgegenüber kann eine suboptimale Bewässerung die Nitratauswaschung gar fördern. Bruin et al. (2010) führen die Tröpfchenbewässerung als eine konkrete Umsetzung der geplanten Bewässerung auf. Mit einer Tröpfchenbewässerung kann die Nitratauswaschung reduziert werden, weil die Bewässerung abhängig von der Pflanzenaufnahme geschieht (mehr dazu in Kapitel 2.9: Wasserbedarf der Kulturen). Die Resultate von Lv et al. (2019) verdeutlichen die Erkenntnisse über die Vorteile der Tröpfchenbewässerung. So reduzierte die Tropfbewässerung die Auswaschung von Nitrat und DON um 88 bis 90%. Als Beispiel für eine suboptimale Bewässerung nennen die Autor:innen Lv et al. (2019) die Bewässerungen mittels Überschwemmung. Solche agronomische Praktiken haben zur Folge, dass Stickstoff nicht effizient genutzt wird.

#### **Temperatur**

Die Autor:innen Liu et al. (2014) kommen zum Ergebnis, dass die Freisetzung von mineralischem Stickstoff von der Temperatur abhängt. Ebenso wird von McNeill & Unkovich (2007) die Temperatur als beeinflussender Faktor für die Nitrifikation angegeben. Die Untersuchung von Bruin et al. (2010) gelangt zum Schluss, dass die Nitratauswaschung bei den höchsten Temperaturen am geringsten war. Zurückgeführt wird diese Erkenntnis auf das geförderte Pflanzenwachstum. Bei keiner Quelle wurde die Temperatur genauer bestimmt. Lv et al. (2019) äussern, dass hohe Temperaturen die Mineralisation beschleunigen, ohne Konkretisierung, wie sich dies auf die Nitratauswaschung auswirkt. Eine Konkretisierung wird von Jabloun et al. (2015) gemacht. So nahm gemäss ihrer Sensitivitätsanalyse die Auswaschung von Nitrat mit zunehmender Temperatur zu. Ein Temperaturanstieg fördert die Mineralisierung, was laut Jabloun et al. (2015) vermutlich die Nitratauswaschung erhöht, weil der mineralische Stickstoff im Boden erhöht wird.

## 2.4 Kulturen

Bei der Beurteilung des Pflanzenwachstums spielen die Umweltfaktoren Temperatur, CO<sup>2</sup>, Lichtintensität und die agronomischen Faktoren der Bewässerung, des Pflanzmediums und der Düngung wichtige Rollen. Da die Lichtintensität und das CO<sup>2</sup> in diesem Versuch nicht aufgezeichnet wurde, wird nicht genauer darauf eingegangen. Ebenso können Beikräuter und Krankheiten oder Schädlinge einen Einfluss auf die Entwicklung nehmen.

### Stickstoffbedarf von Pflanzen

Der Stickstoffbedarf unterscheidet sich je nach Kultur. Er kann die Stickstoffnutzungseffizienz beeinflussen und somit die Nitratauswaschung (Tamagno et al., 2022). Der Stickstoffbedarf von Gemüsekulturen kann den Bedarf von Getreidekulturen weitaus übersteigen wie ersichtlich an dem folgenden Beispiel. Für die Gemüsekulturen wurde Neuweiler (2011) herangezogen, für die Gerste die GRUD (Richner & Sinaj, 2017):

Kultur	Stickstoffbedarf (Kilogramm pro Hektare)
Gurke	210 kg N/ha
Salat Lollo, grün	130 kg N/ha
Sommergerste	90 kg N/ha

Die Untersuchungen von Xu et al. (2020) haben gezeigt, dass eine negative Beziehung zwischen der Stickstoffaufnahme der Pflanzen und der Auswaschung besteht. Die Stickstoffernährung der Pflanze ist entscheidend für die Ertragsfähigkeit der Pflanze. Die Aufnahme von Stickstoff über die Wurzel wird sowohl von der Ausprägung des Wurzelsystems selbst als auch von abiotischen Faktoren beeinflusst. Die abiotischen Faktoren: Salz, Dürre und extreme Temperaturen beeinträchtigen die Aufnahme. Zusätzlich zu diesen Faktoren gelten die Düngung, der pH-Wert und der Niederschlag als regulierende Komponenten der Stickstoffaufnahme (Sajjad et al., 2021).

Eine übermassige Stickstoffdüngung kann gemäss Zhang et al. (2022) das Pflanzenwachstum signifikant hemmen und den relativen Gehalt an Chlorophyll erhöhen. Ein Stickstoffmangel hingegen kann an der Veränderung in der Pflanzenfarbe sichtbar werden. Chlorosen, die von hellgrün bis gelb reichen, sind Kennzeichen für akute Symptome. Auch Stickstoffmangel kann das Pflanzenwachstum und Chlorophyllfluoreszenzparameter beeinflussen (Wani et al., 2022)

### Wasserbedarf von Pflanzen

Über das Wasser nehmen Pflanzen wichtige Bausteine wie Wasserstoff und Sauerstoff auf, womit sie die organische Substanz bilden (Hauert, 2012). Der Wasserverbrauch im Unterglasanbau ist aufgrund des fehlenden Niederschlags und einer stärkeren Verdunstung höher als im Freiland. Hauert (2012) unterscheidet die Bewässerungsintervalle und Menge nach Bodenart, weil das Wasserspeichervermögen zwischen den Bodenarten variiert. Zudem ist der Wasserbedarf abhängig von der Pflanzenart, der Temperatur und dem Licht. Höhere Temperaturen bei gleichzeitig viel Licht führen zu einem höheren Wasserbedarf der Pflanzen. Bei Topfpflanzen wird die Einheit Liter pro m<sup>2</sup> pro Tag verwendet.

Beispielsweise liegt der Bedarf der Gurken gemäss Hauert (2012) in einem Bereich von 1,2 – 3,7 l/m<sup>2</sup> und Tag. Der Wasserbedarf von Salat liegt zwischen 0,5 – 2,5 l/m<sup>2</sup> und Tag. Hingegen bei Getreide wird der Wasserbedarf pro Ertrag [t/ha] angegeben. Bei Gerste beträgt er bei optimalen Verhältnissen 40 mm/m<sup>2</sup> und bei schlechten Wachstumsbedingungen (unzureichend Nährstoffzufuhr, extreme Wasserverluste durch Verdunstung, hohe Temperaturen und niedrige Luftfeuchtigkeit) 90 mm/m<sup>2</sup> (*Wasserbedarf im Pflanzenbau*, 2018). Übermässige Zugaben von Wasser, die den Bedarf übersteigen, sind für Nitratauswaschungen verantwortlich (J. Xu et al., 2020).

### **Temperaturbedarf**

Nebst dem Wasser- und Nährstoffbedarf wird die Temperatur als wesentlich steuernde Variable für das Wachstum von Gemüsekulturen wie Salat und Gurken oder Getreidekulturen wie Gerste betrachtet. Der gut verträglich Temperaturbereich für Gefässpflanzen liegt im Bereich von 10-35°C, wobei bei 10°C das Wachstumstempo am niedrigsten ist (Atwell et al., 1999). Von O'sullivan et al. (2017) wurde die Hitzebeständigkeit von Pflanzen betrachtet. Kritische Temperaturen, bei welchen das Photosystem II gestört wird, reichen von 41.5°C bis 50.8°C.

### **Pflanzmedium**

Die Eigenschaften der schweizerische Qualitätsrichtlinie der Branche für Kompost und Gärgut für Kompostsubstrate wurden so gewählt, dass für das Pflanzenwachstum und die Pflanzengesundheit im gedeckten Anbau optimale Bedingungen vorausgesetzt werden (siehe Anhang 1). Es gibt eine grosse Palette an unterschiedlichen Pflanzmedien, die alle andere Eigenschaften besitzen trotz den Vorgaben der Qualitätsrichtlinien. Daher ist es erforderlich, die Bewirtschaftung den Pflanzmedien anzupassen, um optimale Bedingungen für das Pflanzenwachstum sicherzustellen. Schafer und Lerner (2022) sind der Annahme, dass kaum ein Substrat alle notwendigen Eigenschaften vereint und schlagen aus diesem Grund Substratmischungen vor.

### **Beikraut**

Nicht-Kulturpflanzen spielen nebst den vielen Nachteilen für das Pflanzenwachstum und -entwicklung auch positive Rollen. Zu den Nachteilen zählen das Konkurrieren der Un- oder Beikräutern mit den Kulturpflanzen um Nährstoffe. Die Ernteerträge können erheblich beeinträchtigt werden durch Nicht-Kulturpflanzen. Die Beschattung, die Konkurrenz um Wasser, die Funktion als Wirtspflanze für Schädlinge und Krankheiten werden als weitere Gründe für die Ernteverluste genannt („Weeds of Farm Crops“, 2023). Andererseits können Unkräuter die Biodiversität auf landwirtschaftlichen Flächen fördern, indem sie eine Quelle für Pollen und Nektar für Bienen und Schmetterlinge sind. Ergänzend sollen hier auch die Begünstigung des Mikroklimas für die Entwicklung der Kulturpflanzen und die Minimierung von Auswaschung aufgeführt werden. Für das Aufkommen und die Entwicklung der Unkrautsamen ist die Feuchtigkeit ein entscheidender Faktor (Keerthi et al., 2023)

### **Schädlinge/ Krankheiten**

Die zuvor aufgeführten abiotischen Ursachen wie Temperatur, Bewässerung und Bodenmedium sind beeinflussende Faktoren des Gesundheitszustandes einer Pflanze, die indirekte und direkte Schäden verursachen können, indem sie Eintrittspforten für Schadorganismen bieten. Zu den Ursachen der Erkrankungen gehören nebst den abiotischen Ursachen biotische Ursachen wie Krankheitserreger und tierische Schädlinge. Mögliche Schadsymptome, die durch tierische Schädlinge entstehen, beinhalten: Welken, Farbveränderungen, Absterbeerscheinungen, Formveränderungen, mechanische Schäden und Störung der Photosynthese. Saugende Insekten wie Blattläuse können Saft aus den Pflanzen saugen und dadurch zu vermindertem Wachstum und deformierten Früchten führen. Saugende Insekten verbreiten

zudem virale Krankheiten, was zu erheblichen Ernteaussfällen führen kann (Prashant et al., 2023). Für die Bekämpfung der Blattläuse ist es wichtig, die einzelnen Arten zu unterscheiden (Schmidt et al., 2008). Auch Thripse beeinträchtigen können anhand ihrer Saugtätigkeit phytopathogenen Bakterien und Pilzen den Eintritt in die Pflanze ermöglichen (Brunner & Ernst Frey, o. J.). Ein weiterer Schadorganismus sind Raupen. Das Wachstum junger Pflanzen wird durch den Befall mit Raupen erheblich gehemmt. Zudem wird befallenes Gemüse für den menschlichen Verzehr ungeeignet (Sajjad et al., 2021). Viele Insekten sind polyphag, wodurch diverse Wirtspflanzen in Frage kommen (Prashant et al., 2023). Aus dem Reich der Pilze ist *Pythium* spp. ein Parasit, der wenig wirtsspezifisch ist. Anhand der Symptome Wurzelfäulnis und gelb-chlorotischen Blättern, welche durch eine zu geringe Nährstoffaufnahme verursacht werden, ist diese *Pythium*-Welkekrankheit erkennbar. Bedingt wird *Pythium* spp. durch vorübergehende Überschwemmungen, hohe Bodentemperaturen, unsachgemäße Düngung und eine hohe Feuchtigkeit (*Pythium Spp.*, 2020).

### 2.4.1 Wachstumsindikatoren

#### **Keimerfolg**

Faktoren, die den Keimerfolg erhöhen sind von Kultur zu Kultur unterschiedlich ausgeprägt. Die abiotischen Faktoren sind die Substrattemperatur, eine niedrige Dichte, hohe Wasserhaltekapazität und genügend Nährstoffe (Alves & Cardoso, 2023; Campbell et al., 2022). All diese Substrateigenschaften können den Keimungsprozess begünstigen. Insgesamt gilt die Temperatur als wichtigstes Umweltsignal, welches die Keimung beeinflusst (Yan & Chen, 2020). Beispielweise wird bei Kopfsalat die Samenkeimung bei 28°C gehemmt. Hingegen wiesen Bakhshandeh et al. (2021) nach, dass die optimale Keimtemperatur für Gurkensamen bei 28°C liegt.

#### **Chlorophyll**

Die Photosynthese und der Transport von Assimilaten wird beeinflusst durch das Nährelement Stickstoff. Chlorophyll ist mit dem Stickstoffwert verbunden und bestimmt den Ertrag von Kulturpflanzen (N. Wang et al., 2021). In der Studie von Saleh et al. (2019) wurde der maximale Chlorophyllgehalt in Pflanzen gemessen, die in stickstoffreicheren Substraten gewachsen sind. Rückführbar ist dieses Phänomen auf eine effiziente Aufnahme und Assimilation von Stickstoff, der einen Hauptbestandteil des Chlorophyllmoleküls ausmacht. Darüber hinaus wurde beobachtet, dass Pflanzen mit reduziertem Wachstum und Chlorosen einen geringen Chlorophyllgehalt aufwiesen. Stickstoffzufuhr und eine an die Kultur angepasste Bewässerung können den Chlorophyllgehalt steigern (N. Wang et al., 2021).

#### **Wachstumshöhe**

Faktoren wie das Wachstum der gesamten Pflanzen und der Blätter dienen als Indikator für das Zusammenspiel zwischen den Ansprüchen der Kulturen und den Umwelt- und agronomischen Faktoren (Atwell et al., 1999).

#### **Trockensubstanz**

Laut Wang et al. (2021) sind die Trockenmassenakkumulation und die Stickstoffmenge positiv miteinander korreliert. Aus diesem Grund wird die Trockenmasse von Szulc et al. (2021) als Indikator für die Effizienz von mineralischem Dünger verwendet. Generell wird die Trockenmasse als Indikator für das Wachstum verwendet, weil sie zusätzlich zur Ressourcennutzungseffizienz der Pflanze die Anreicherung von Biomasse widerspiegelt.

## 2.5 Abbaueversuch

Mit dem OxiTop® Messsystem der Xylem Analytics Germany Sales GmbH & Co kann der aerobe biologische Sauerstoffverbrauch der Mikroorganismen gemessen werden. Die Methode dient zur Überprüfung der biologischen Abbaubarkeit unter aeroben Bedingungen von Feststoffen einschliesslich Kompost (Fachstelle Umweltbiotechnologie, 2022). Und ist somit ein Parameter für die Beurteilung der Stabilität des Kompostes. Anhand der Atmung der Mikroorganismen wird deren Aktivität beurteilt. Die mikrobielle Atmung ist der Prozess, in welchem Mikroben die Energie nutzen, welche in chemischen und organischen Substanzen gespeichert ist. Die Energie wird in körpereigenen Substanzen eingebaut. Ist leicht verfügbare organische Substanz vorhanden, atmen die Mikroorganismen mit hoher Rate. Ein unreifer Kompost hat einen hohen Sauerstoffbedarf, wodurch eine hohe CO<sub>2</sub>-Produktion stattfindet. Dies ist auf eine starke Zunahme von Mikroorganismen zurückzuführen. Eine hohe CO<sub>2</sub>-Produktion deutet auf eine geringe Stabilität und Reife des Kompostes (Mahapatra et al., 2022). Faktoren wie Temperatur, Feuchtigkeit, pH-Wert, verfügbarer Kohlenstoff (labiler und persistenter Kohlenstoff) und Stickstoffgehalt beeinflussen die CO<sub>2</sub>-Produktion und -emission aus dem Boden (Rastogi et al., 2002). Der Prüfzeitraum für die aerobe Bioabbaubarkeit endet mit dem Erreichen der Plateauphase des biologischen Abbaus. Bei Kompost wird das Plateau bei einer Temperatur von 25 °C spätestens nach 12 Monaten erreicht.

Die unterschiedlichen Verweilzeiten des Kohlenstoffs sind nicht nur auf unterschiedliche Molekülstrukturen zurückzuführen. So ist nach den Untersuchungen von Derrien et al. (2023) die Verweildauer des Kohlenstoffs für die meisten Moleküle ähnlich wie im Boden. Dies widerspricht der Vorstellung einer spezifischen Resistenz bestimmter Verbindungen. Eine weitere Theorie für die Persistenz organischer Substanz ist neben dem C:N-Verhältnis, der unterschiedlichen molekularen Zusammensetzung u.a. auch die Bindung organischer Substanz an Mineralien. Durch die Bindung wird die Zugänglichkeit der organischen Substanz für Mikroorganismen verringert. Nicht nur die Persistenz der organischen Substanz muss berücksichtigt werden, um die Dynamik eines Moleküls im Boden zu beschreiben, sondern auch die mikrobielle Ökologie (Derrien et al., 2023). Unter verschiedenen bodenklimatischen Bedingungen ist die Persistenz der organischen Substanz unterschiedlich. Daher kann die Akkumulation organischer Masse lokal unterschiedlich sein.

### **Mineralisch-assoziierte organische Masse (MAOM)**

Mikrobiell umgewandeltes Pflanzenmaterial ist nicht nur wegen der ursprünglichen pflanzlichen Zusammensetzung persistent, sondern auch wegen der mikrobiellen Verbindungen. Mikrobielle Transformationen können organischen Kohlenstoff stabilisieren. Die Zusammensetzung der persistenten organischen Substanz ähnelt eher der von Mikroben als der von Pflanzengewebe, und mikrobielle Verbindungen sind aufgrund ihrer größeren Affinität zur Bindung an Mineralien persistenter als pflanzliche Verbindungen. Die Produkte des mikrobiellen Stoffwechsels (niedermolekulare Verbindungen bis hin zu Strukturpolysacchariden) sind zwar schnell abbaubar und für sich genommen nicht besonders persistent, da sie reich an Energie oder Nährstoffen sind und schnell assimiliert werden können. Jedoch neigen mikrobielle Komponenten zur Bildung mineralischer Verbindungen, und sind auch weniger energiereich als pflanzliche Verbindungen, was sie persistenter macht als pflanzliche Masse.

Neben der mikrobiellen Persistenz können auch pflanzliche Verbindungen zu persistenter organischer Substanz beitragen. Die Persistenz von organischem Material kann auf Wassermangel, niedrige Temperaturen oder einen sauren pH-Wert zurückgeführt werden. Nicht nur eine eingeschränkte mikrobielle Aktivität kann pflanzliche Rückstände vor Abbau schützen, sondern auch mineralische Verbindungen, wie oben für mikrobielle Verbindungen beschrieben. Die an mineralische Komponenten gebundene organische Substanz (MAOM) macht einen großen Teil der gesamten organischen Substanz aus.

### **Partikuläre organische Masse (POM)**

Die POM-Fraktion bezieht sich auf organische Partikel, die nicht an Mineralien gebunden sind (sich zersetzende Pflanzenfragmente; z. B. auch Holzkohle). POM besteht aus groben Pflanzenresten, die in der Regel schneller umgesetzt werden als die organische Bodensubstanz und relativ jung sind. POM kann einige Monate bis einige Jahrzehnte überdauern, ist aber nicht vor Zersetzung durch Mikroorganismen geschützt. Die Größe des POM-Speichers hängt von der Vegetation, der Biodiversität des Bodens und den Bewirtschaftungspraktiken ab. In Böden kann POM bis zu 20 % des organischen Kohlenstoffs ausmachen. Ob Kohlenstoff im MAOM oder im POM gespeichert wird, hängt von der Menge der vorhandenen organischen Masse ab. Wenn wenig organische Substanz vorhanden ist, wird der Kohlenstoff eher im MAOM gespeichert. Die Kohlenstoffspeicherung in MAOM ist begrenzt, während POM unbegrenzt ist. Die Verweildauer von POM erhöht sich, wenn die Bedingungen für den mikrobiellen Abbau ungünstig sind. Aufgrund der kurzen Verweildauer des Kohlenstoffs in POM und der Reversibilität der Kohlenstoffspeicherung durch die Auswirkungen des Klimawandels wird POM in einigen Berechnungsmethoden nicht als Kohlenstoffspeicherungspotenzial berücksichtigt. Andere argumentieren, dass POM einen unbegrenzten Pool für die Speicherung von Kohlenstoff bietet, der später mobilisiert werden kann (Derrien et al., 2023).

Es gibt zwei weitere Theorien zu den Faktoren, die die C-Dynamik im Boden steuern: eine basiert auf der räumlichen Unzugänglichkeit und die andere auf der energetischen Unzugänglichkeit des SOM-Abbaus.

### **räumliche Unzugänglichkeit**

Die organische Substanz wird entweder in der mineralischen Phase oder in Aggregaten eingelagert, so dass die Mikroorganismen nicht mit der organischen Substanz in Kontakt kommen. Die räumliche Unzugänglichkeit hängt von verschiedenen Faktoren ab, die die Mobilität der Organismen bestimmen, wie z. B. Porengeometrie und -konnektivität sowie Wassergehalt (Derrien et al., 2023).

### **Energetische Unzugänglichkeit**

Energetische Unzugänglichkeit entspricht einem ungünstigen Gleichgewicht zwischen der Energie, die die Zersetzer investieren, um Zugang zu einem Substrat zu erhalten, und der Energie, die sie durch dessen Mineralisierung gewinnen. Dieses Konzept hängt also von der Stärke der Bindungen ab, die das Substrat für die Zersetzer teurer oder attraktiver machen. Der Nutzen der Zersetzung entspricht der bei der Mineralisierung der Verbindung (z. B. durch Atmung) freigesetzten Energie und wird kalorimetrisch gemessen. Beständiger organischer Kohlenstoff setzt bei der Mineralisierung weniger Energie frei

als unbeständiger organischer Kohlenstoff. Bei der Verwertung sind jedoch auch die stöchiometrischen Bedürfnisse der Mikroorganismen zu berücksichtigen, da nicht nur Kohlenstoff oder Stickstoff, sondern auch Nährstoffe wie P, Ca, Mn von den Mikroorganismen aufgenommen werden (Derrien et al., 2023).

### **2.6 Vor- und Nachteile von Anbau- und Gefässversuchen zur Bestimmung der Nitratauswaschung**

Die Auswaschung von Nährstoffen kann mit Lysimeterversuchen und Topfversuchen untersucht werden. In Lysimeterversuchen sind die Einflussfaktoren ähnlich heterogen wie bei Feldversuchen. Dadurch bestehen gewisse Schwierigkeiten die Auswaschungsergebnisse einzuordnen (Santikari et al., 2022). Bei den Lysimetern der ZHAW hätte aufgrund ihrer Tiefe die Nitratauswaschung möglicherweise nicht gemessen werden können. Aus diesem Grund wurden Topfversuche durchgeführt. Der Vorteil von Gefässversuchen besteht darin, dass die Umwelteinflüsse weitgehend kontrolliert werden können. Zudem sind die Kosten gering und die Durchführung einfach. Die Reproduzierbarkeit der Topfversuche kann gewährleistet werden, aufgrund der homogenen Bedingungen (Kawaletz et al., 2014). Ein weiterer Vorteil von Topfversuchen ergibt sich daraus, dass das Perkolat gesammelt werden kann für die Nitratbestimmung. Laut Große-Brauckmann (1973) zeigt sich in Topfversuchen ein höherer Flächenertrag im Vergleich zum Feld, was auf eine verbesserte Lichteinwirkung und Wasserversorgung zurückzuführen ist. Die Autor:innen Kawaletz et al. (2014) benennen gewisse Einschränkungen und Nachteile der Topfversuche, die hier aufgeführt werden. Die Nachteile betreffen die Wasserverfügbarkeit, die Bodentemperatur und den eingeschränkten Wurzelraum. Zum einen können die Töpfe schnell austrocknen, wodurch die Wasserverfügbarkeit für die Pflanzen eingeschränkt ist. Zudem wird die Bodentemperatur in den Töpfen anders beeinflusst als in Feldversuchen. Durch zu hohe Temperaturen können laut Kawaletz et al. (2014) Wurzelschäden entstehen, was negative Auswirkungen auf das Wachstum haben kann. Zuletzt wird die Einschränkung des Wurzelraums durch die Töpfe aufgeführt. Poorte et al. (2012) haben in ihrer Metaanalyse bei einer Verdoppelung der Topfgrösse eine Steigerung der Biomasseproduktion von 43% festgehalten. Ausserdem wurde von ihnen auf Studien hingewiesen, die eine beeinträchtigte Mykorrhizakolonisierung in kleineren Töpfen aufzeigen. Letztlich sollten Topfversuche immer durch Feldversuche validiert werden.

## 3. Methoden

### 3.1 Vergleich von BioHu und Substratkompost (Theorie)

Um den Vergleich von der BioHu zum normalen Kompostsubstrat aufzustellen, wurde eine Literaturarbeit durchgeführt. Als Quelle für die BioHu wurden die bestehenden Studien von Kakabouki et al. (2021) und Eisenbach et al. (2019) verwendet. Zudem wurden die Richtlinien der biozyklisch veganen Anbauweise betrachtet (Santi, 2022). Auch das Dokument «Biozyklisch-vegane Kompostveredelung zur Herstellung von Biozyklischer Humuserde in ihrer Bedeutung für die Transformation der Landwirtschaft» von Dr. agr. Johannes Eisenbach (2022) wurde herangezogen. Für die Eigenschaften und Anwendung von normalem Kompost wurden die Branchenrichtlinien der Schweiz für Gärgut und Kompost (2022), Kompost und Gärgut in der Schweiz (Kupper & Fuchs, 2007), das wichtigsten zur Düngung von Hauert (2012) und Ho et al. (2022) berücksichtigt.

### 3.2 Substratanalysen

Die chemischen und physikalischen Substratanalysen wurden gemäss den Referenzmethoden zur Düngeruntersuchung der Forschungsanstalt Agroscope, dem Aufbaukurs „Qualität der Endprodukte“ von educompost und ZHAW internen Weisungen untersucht. In diesem Kapitel werden die BioHu sowie der Neubauerkompost als Substrate bezeichnet, weil im Anbauversuch die Pflanzen direkt in die beiden Medien gepflanzt wurden.

#### 3.2.1 Lagerung Substrat und Probenahme

Die Substrate wurden an der ZHAW in Wädenswil am Campus Grüental in Kühlräumen bei 4°C in den ursprünglichen Substratsäcken gelagert, um Veränderungen der Zusammensetzung zu minimieren. Die Substratproben für die Analysen entstanden repräsentativ durch das Zusammenschütten von Einzelproben wie in der Referenzmethode zur Probenahme von Kompost beschrieben (Bürge, 2020d). Für die Entnahme der Einzelproben wurde jeweils eine Schaufel verwendet. Nach der fertigen Probenahme wurden die Sammelproben mit einer Menge von mindestens 1 Liter in Plastiksäcken an den Untersuchungsort transportiert.

#### 3.2.2 Bestimmung der Trockensubstanz

Benötigt wurde die Trockensubstanz (TS), um die Wasserhaltekapazität und den Salzgehalt zu berechnen. Die Bestimmung wurde angelehnt an die Referenzmethode «Bestimmung der Trockensubstanz und des Wassergehaltes in Düngerproben» der Forschungsanstalt Agroscope (Bürge, 2020b) durchgeführt. Allerdings fand die TS-Bestimmung ohne Exsikkator und mit einer Analysewaage mit einer Messgenauigkeit von lediglich 0.1g (Kern & Sohn GmbH; KB 10000-1N) statt. Die Substratproben wurden in Aluschalen eingewogen und in einem Trockenschrank von Binder (FD115) bei 105°C getrocknet bis zur Gewichtskonstanz. Schlussendlich wurde aus den gewogenen Werten mit folgender Formel (Formel 1) die Trockensubstanz berechnet.

*Formel 1 Berechnung der Trockensubstanz nach der Referenzmethode von Agroscope*

$$\% \text{ TS} = 100 * \frac{(\text{Auswaage der Substratprobe in Aluschale [g]} - \text{Masse der Aluschale [g]})}{(\text{Einwaage der Substratprobe in Aluschale [g]} - \text{Masse der Aluschale [g]})}$$

### 3.2.3 Analyse von Kohlenstoff und Stickstoff

Die Probenvorbereitung zur darauffolgenden Bestimmung des Gesamtkohlenstoffs, Stickstoffs und des Verhältnisses von C:N wurde nach dem ZHAW internen Dokument «TruSpec Makro Analyzer» (Lustenberger & Wanner, 2020) ausgeführt. Getrocknet wurden die Substratproben sowie 3 Proben von Gurkenpflanzen bei 40°C in einem Trockenschrank von Binder (FD115) bei 40°C bis zur Gewichtskonstanz. Dies dauerte je nach Probe 2-3 Tage. Danach wurden die Proben gesiebt mit einem Analyse-sieb aus Edelstahl (ISO 3310-1), welches eine Maschenweite von 2mm besitzt. Die getrockneten und gesiebten Proben wurden in einem 50ml Tube bis zur Mahlung aufbewahrt. Gemahlen wurden die Proben mit einem elektrischen Kaffeeschlagwerk aus Edelstahl von Profi Cook (PC-KSW 1021 N). Zwischen jedem Mahlgang wurde der Edelstahlbehälter ausgewaschen und getrocknet.

Mit dem soil TOC cube wurde TOC (total organic carbon), ROC (residual oxidizable carbon) und TIC (total inorganic carbon) bestimmt gemäss dem Protokoll «soil TOC cube» des Labors der Bodenökologie (Schönenberger & Wanner, 2023a). Vor der Messung erfolgte die Eichung mittels Blank- und Driftmessung. Die Einwaage der Proben erfolgte in austarierten Tiegel anhand eines Apothekerspatel mit Handschuhen. Von jeder Probe wurden zwei Bestimmungen durchgeführt an je 10 Gramm. Nach der Eingabe des Gewichts in das System des soil TOC cube wurden die Tiegel in den Autosampler überführt. Ausgelesen wurden die Messergebnisse mithilfe von Excel.

Die CHN-Analyse erfolgte bei 1150°C im «vario EL cube» nach dem dazugehörigen Protokoll (Schönenberger & Wanner, 2023b), dabei wurden  $C_{\text{tot}}$ ,  $N_{\text{tot}}$  und H bestimmt. Nach der Vorbereitung des «vario EL cube» mittels Blanks- und Driftmessung wurden die Proben eingewogen und analysiert. Auf austarierten Zinnfolien wurden je 10 Gramm Substrat platziert. Schliesslich wurden die Zinnfolien zu Kugeln geformt und in den Autosampler gegeben. Die Messergebnisse wurden mithilfe von Excel ausgelesen.

### 3.2.4 Nachweis von Nitrat im Drainwasser

Um Aussagen zur Stickstoffverfügbarkeit der Substrate und der Auswaschungsgefährdung von Nitrat zu machen, wurde der Nitratgehalt im Drainwasser ermittelt. Als Grundlage für die Versuchsdurchführung wurden die Unterlagen von educompost (Fuchs et al., 2010) und das Protokoll für Nitratschnelltests (*Anwendung von Nitratschnelltests mit Reflektometermessung*, 2018) herangezogen. Es wurden 100 Gramm Probe mit 100 Millilitern destilliertem Wasser vermengt und geschüttelt. Nach der Filtration durch Whatman Filter (602 H 1/2, Produktnr.: 10312651) wurde der Nitratgehalt mit Teststäbchen von Supelco (1.16971, 5-225 mg/L (NO<sub>3</sub>-)) dreifach getestet und im Reflektometer (RQflex® 20) ausgewertet.

### 3.2.5 Bestimmung des EC und Salzgehalts

Die elektrische Leitfähigkeit (EC) wurde gemessen, um den Salzgehalt der Substrate zu quantifizieren. Die Durchführung richtet sich nach den Referenzmethoden der Agroscope «Wasserextraktion (1:10) zur Bestimmung des Salzgehalts und der Farbintensität» sowie «Bestimmung der Leitfähigkeit und des Salzgehalts im Wasserextrakt (1:10)» (Bürge, 2020e, 2020a). Die löslichen Salze und Huminstoffe wurden mit demineralisiertem Wasser (Verhältnis: 1 Teil Substrat:10 Teilen Wasser) während einer Stunde extrahiert. Dazu wurden die Kunststoff-Flaschen auf eine Schüttelmaschine von Edmund Bühler mit 120 Bewegungen pro Minute gebunden. Filtriert wurde mit Faltenfilter von Ahlstrom-Munksjö, wobei ein Vorlauf von 30 bis 50 Millilitern verworfen wurde. Mittels Multimeter mit Temperaturkompensation (HQ40d) und der dazugehörigen Leitfähigkeitssonde (Hach, CDC401-01, 0,01  $\mu\text{S}/\text{cm}$  bis 200,0  $\text{mS}/\text{cm}$ ) wurde die Leitfähigkeit in  $\mu\text{S}/\text{cm}$  im Filtrat gemessen. Zwischen den einzelnen Messungen wurde die Sonde jeweils mit destilliertem Wasser abgespült und getrocknet. Mit folgender Formel (Formel 2) wurde anschliessend die Leitfähigkeit in den Salzgehalt umgerechnet nach der Methode von Agroscope (Bürge, 2020a):

*Formel 2 Berechnung des Salzgehalts als äquivalente Menge Kaliumchlorid in der Probe nach der Referenzmethode von Agroscope*

$$g \text{ KCl}_{\text{eq}}/\text{kg trockener Recyclingdünger} = a * \frac{583.41}{\%TS}$$

$a = \text{abgelesene Leitfähigkeit [mS/cm]}$

### 3.2.6 Festlegen der Humuszahl

Um den Anteil an wasserlöslichen Humusverbindungen zu charakterisieren, wurde die Humuszahl im Filtrat (1:10) aus dem Versuch der elektrischen Leitfähigkeit ermittelt. Die Bestimmung der Humuszahl wurde nach dem Methodikbeschrieb von educompost durchgeführt (Fuchs et al., 2010). Zu den verwendeten Materialien zählt das Set von educompost mit sieben Referenzflüssigkeiten in Reagenzgläsern (Humuszahl 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 30). Dieses Set wurde mit dem in Tubes abgefüllten Filtrat verglichen bei Tageslicht und somit die Humuszahl abgeschätzt.

### 3.2.7 pH-Bestimmung

Die Bestimmung des pH-Wertes der Substrate erfolgte mit 0.01 molarer  $\text{CaCl}_2$ -Lösung nach der Referenzmethode der Forschungsanstalt Agroscope (ART & ACW, 2008). Durch die Verwendung einer  $\text{CaCl}_2$ -Lösung ist der gemessene pH-Wert unabhängig von der Salzkonzentration. Ein (1) Teil Substrat wurde mit 2.5 Teilen 0.01 molarer  $\text{CaCl}_2$ -Lösung aufgeschlämmt. Die Suspension wurde während 30 Minuten 3–4-mal geschüttelt. Anschliessend wurde der pH mit einem Multimeter (HQ40d) und der dazugehörigen Multisonde im Überstand bestimmt. Zwischen den Messungen wurde die Messsonde gespült mit destilliertem Wasser.

### 3.2.8 Erhebung der Feststoffdichte

Zur Ermittlung des biologischen Sauerstoffbedarfs musste die Feststoffdichte der Substrate bekannt sein. Dazu wurde nach dem Kapitel 10.3.5 «Bestimmung der Feststoffdichte» aus dem Dokument zur «Bestimmung des aeroben biologischen Abbaus von Feststoffen in Boden oder Kompost» der ZHAW gearbeitet (Fachstelle Umweltbiotechnologie, 2022). In einem 200 Milliliter grossen Messzylinder wurden 100 Milliliter Wasser gefüllt und danach Substrat zugegeben. Nachdem das Substrat suspendierte, wurde die verdrängte Wassermenge notiert. Die Feststoffdichte des Substrates liess sich folgendermassen berechnen (Formel 3):

*Formel 3 Berechnung der Feststoffdichte des Substrates gemäss ISO 16072 und Fachstelle Umweltbiotechnologie*

$$\rho_{\text{Substrat}} = \frac{\text{Eingewogene Masse Frischsubstanz [g]}}{\text{Volumen des vorgelegten Wassers [cm}^3\text{]} - \text{Volumen der Suspension [cm}^3\text{]}}$$

### 3.2.9 Bestimmung des Volumengewichts von Kompost

Um die Wasserhaltekapazität und die Porosität zu berechnen, ist es notwendig, das Volumengewicht der Substrate zu bestimmen. Angelehnt an die Referenzmethode der Agroscope «Bestimmung des Volumengewichts von Düngern» fand die Durchführung statt (Bürge, 2020c). Die verwendeten Materialien waren ein Messgefäss mit einem Volumen von 1435.15 cm<sup>3</sup> und eine Waage von Sartorius (Messgenauigkeit: 0.01g). Das Messgefäss wurde austariert und anschliessend mit Substrat befüllt. Das Messgefäss wurde auf eine weiche Unterlage gestossen, um eine ähnliche Festigkeit zu erreichen wie im beprobten Substrat. Danach wurde Substrat nachgefüllt, sodass das Messgefäss gefüllt war und gewogen. Aus der gemessenen Masse und dem bekannten Volumen konnte schliesslich das Volumengewicht errechnet werden.

### 3.2.10 Messung der Wasserhaltekapazität und Porosität

Für die Quantifizierung der Wasserhaltekapazität während dem Anbauversuch als auch für die Bestimmung des biologischen Sauerstoffbedarfs wurde die maximale Wasserhaltekapazität (max. WHK) der Proben ermittelt. Mittels Plastikzylindern mit Abflüssen, feinmaschigen Netzen und einer Waage (Sartorius, 0.01 Gramm) konnte der Versuch durchgeführt werden nach einem ZHAW internen Protokoll (Forschungsgruppe Hortikultur, o. J.). In die gewogenen Plastikzylinder wurde ein feinmaschiges Netz über die Abflüsse gelegt und 500 Milliliter Substrat eingewogen. Das feinmaschige Netz dient dazu die eingewogene Probe zurückzuhalten und gleichzeitig kann das Wasser abfliessen. Nach der Einwaage wurden die Abflüsse der Zylinder verschlossen. Die mit Proben gefüllten Zylinder wurden dann mit Wassere durchsättigt (1 Liter) und bei Bedarf wurde das Substrat mit einem weiteren Netz untere Wasser gedrückt. Nach 24 Stunden wurden die Plastikzylinder entwässert und schliesslich gewogen. Die max. WHK wurde daraufhin aus dem Gewichtsunterschied zwischen dem eingewogenen Substrat und den gesättigten Proben berechnet. Zur Berechnung der max. WHK ist ausserdem der Trockensubstanzgehalt erforderlich (siehe Formel 4). Bei der volumetrischen Berechnung der max. WHK wird im Zähler das totale Wasservolumen berechnete, indem vom durchsättigten Substrat die Trockensubstanz von 500 Millilitern Substrat abgezogen wird (siehe Formel 5).

*Formel 4 volumetrische Berechnung der max. WHK*

$$\text{max. WHK}_{\text{vol}} = \frac{(\text{durchsättigtes Substrat [cm}^3\text{]} - (\text{TS Substrat}))[\text{cm}^3]}{\text{Substrat [cm}^3\text{]}} * 100$$

## Methoden

Formel 5 gravimetrische Berechnung der max. WHK

$$\text{max. WHK}_{\text{grav}} = \frac{\text{durchsättigtes Substrat [g]} - (\text{TS Substrat [g]})}{\text{TS Substrat [g]}} * 100$$

Die Porosität wird berechnet aus der Schüttdichte und der Reindichte (einem Literaturwert). Die Schüttdichte setzt sich zusammen aus dem Trockengewicht und dem Schüttvolumen (siehe Formel 6).

Formel 6 Berechnung der Porosität

$$\text{Porosität [\%]} = \left(1 - \left(\frac{\text{Schüttdichte} \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right]}{\text{Reindichte} \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right]}\right)\right) * 100$$

$$\text{Schüttdichte} = \left(\frac{\text{Trockengewicht [g]}}{\text{Schüttvolumen [cm}^3\text{]}}\right)$$

### 3.3 Anbauversuch

Die Durchführung des Anbauversuchs erfolgt, damit eine Nitratauswaschung durchgeführt werden konnte, sowie um das Pflanzenwachstum in der BioHu und dem Neubauerkompost zu bonitieren. Insgesamt wurden drei Kulturen angepflanzt: Nostranogurken (*Cucumis sativus*; 'Swing F1'), grüner Lollo Salat (*Lactuca sativa* varietas *crispa*) und Sommergerste (*Hordeum vulgare* L.). Kultiviert wurden die Pflanzen in Töpfen mit 2.5 Liter Substrat. Die Gurken wurden in einem geheizten Gewächshaus angezogen mit denselben Substraten, in welche sie später umgetopft wurden. Während der Anzucht fand ungefähr alle 5-7 Tage eine Bonitur statt. Danach wurden die Bonituren nur noch alle 14 bis 21 Tage durchgeführt. Pro Kultur wurden 10 Wiederholungen angelegt in dem jeweiligen Substrat. Somit ergaben sich 30 Töpfe pro Substrat. Insgesamt wurden 90 Töpfe aufgestellt (30 x BH1, 30 x BH20, 30 x NB). Am 3.5.2023 wurden 60 Gurkensamen in 10 Centimeter Töpfen aus Kunststoff ausgesät. Nachdem die Samen eingepflanzt waren, wurden die Töpfe mit einer Sandschicht abgedeckt und mit Solbac (Biocontrol; *Bacillus thuringiensis israelensis*) angegossen, um den Befall von Trauermücken zu verhindern. Bei der Gerste wurden 15 Körner pro Topf ausgesät und danach pikieret, dass schliesslich 10 Gerstenpflanzen pro Topf vorhanden waren. Beim Salat wurden am selben Tag wie die Gerste (16.6.2023) 3 Samen pro Topf gesät. Die Kulturdauer der Gurken betrug 15 Wochen, die des Salats 7 Wochen und die der Gerste 14 Wochen. Die Töpfe mit den Pflanzen standen während der gesamten Zeit in einem Gewächshaus. Mit zwei iButton-Logger wurden die Temperatur und die relative Luftfeuchte jede Stunde gemessen, welche zugleich vom Auswertungsprogramm OneWireViewer grafisch dargestellt wurden. Erfasst wurde die Bewässerung gravimetrisch während vier Tagen morgens und oder abends. Nach Versuchsende konnte mithilfe der gravimetrischen Messungen und der max. WHK<sub>grav</sub> die Wasserkapazität über die Versuchsdauer charakterisiert werden (siehe Anhang 4). Nebst der händischen Bewässerung wurden aufgrund der Auswaschungsversuche zusätzliche Wassermengen gegeben. Veranlasst durch den Schädlingsdruck wurden *Phytoseiulus persimilis* gegen Spinnmilben gestreut, sowie auch *Amblyseius cucumeris* gegen Trips und *Chrysoperla carnea* gegen Blattläuse. Alle eingesetzten Nützlinge stammten von Andermatt Biocontrol. Das Unkraut musste zweimal entfernt werden. Des Weiteren fand eine Nitratbestimmung in der Gurke am 20.7.2023 statt, wurde der Chlorophyllindex der Blätter am 3.8.2023 analysiert und die Wurzeln, der Schaden sowie der Ertrag wurden bonitiert. Nach Abschluss des Anbauversuches wurde die Trockensubstanz aller Kulturen ermittelt.



Abbildung 1 Testfläche im Gewächshaus (Fotos: S. Renaud-dit-Louis, 30.06.2023)

### 3.3.1 Bonitur

Zur Bonitur des Wachstums der Kulturen wurden Boniturskalen erstellt. Je nach Wachstumsphase und Kultur kamen unterschiedliche Skalen zur Anwendung. Für die Bonitierung der Gurken, dem Salat und der Gersten wurde zwischen dem Keimungserfolg und dem anschliessenden Wachstum unterschieden.

#### **Gurken**

Von jeder Gurkenpflanze wurden während des Wachstums die Anzahl Blätter, die Höhe, die Blattlänge und Blattbreite sowie die Höhe der Pflanze mit einem Doppelmeter gemessen (siehe Anhang 7). Mit der Zeit wurde dazu übergegangen, statt der Anzahl Blätter die Anzahl der Nodien zu notieren. Weitere Parameter, die im Juli dazukamen, waren die Anzahl der Fruchtstände und der allgemeine Gesundheitszustand (bezeichnet als Befallsstärke). Falls Gurken geerntet werden konnten, wurde deren Gewicht, Länge und Umfang an der breitesten Stelle gemessen. Zudem wurde notiert, ob die Gurke formverändert war. Die Kriterien, die in die Beurteilung des Parameters der Formveränderung einflussen, stammten von den schweizerischen Qualitätsbestimmungen für Nostranogurken (swisscofel & Verband Schweizer Gemüseproduzenten, 2023).

### **Gerste**

Um das Wachstum der Gerste zu quantifizieren, wurden das BBCH-Stadium und mit dem Doppelmeter die Höhe des höchsten Halmes pro Topf bestimmt (siehe Anhang 8). Die Entwicklungsstadien richten sich nach den Darstellungen und Beschreibungen des Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen (2001). Die BBCH-Stadien reichen von der Keimung (BBCH 00) über das Schossen des Haupttriebs (BBCH 30) bis zur Frucht- und Samenreife (BBCH 80) und schliesslich zum Absterben (BBCH 90). Pro Topf konnte jeweils ein grosser Bereich an verschiedenen BBCH-Stadien festgestellt werden. Der kleinste und der grösste BBCH-Entwicklungsstand wurden daher jeweils angegeben. Zusätzlich wurde in den Töpfen mit Gerste zweimalig das Beikraut bonitiert (Juni, September). Vor dem Versuchsabschluss fand eine Bestimmung der Bestockung von drei zufällig ausgewählten Töpfen statt. Die Keimfähigkeit wurde berechnet, indem die gekeimten Samen ins Verhältnis zu der Anzahl gesäten Samen gesetzt wurde. Das Intervall zwischen den unterschiedlichen Boniturzeitpunkten reicht von 6 Tagen bis zu 22 Tagen.

### **Salat**

Gleichwohl wurde bei der Bonitur des Salates das Beikraut bonitiert. Nebst dem Beikrautdruck wurde auch der Schädlingsdruck von Beginn an notiert. Das Wachstum wurde mit einem Doppelmeter gemessen, indem die Höhe des Salates bestimmt wurde. Bei der Endbonitur wurden zusätzlich die Parameter Farbe und Blattkräuselung berücksichtigt (siehe Anhang 9).

### **Wurzeln**

Die Wurzelbonitur wurde bei allen Kulturen nach Abschluss der Kultivierung durchgeführt. Mit Ausnahme bei der Gurke, bei welcher bei der Umtopfung bereits der Zustand der Wurzeln erfasst wurde. Bewertet wurde das Wurzelbild auf die Dichte und Menge der Wurzeln im gestürzten Erdballen (siehe Anhang 10). Beispielhaft wurde bei den Gurken von 3 Pflanzen die Wurzeln ausgewaschen (siehe Anhang 11).

### **Schadbild**

Einmalig wurde der Schaden detailliert erfasst von der Gerste und den Gurken (10.08.2023; siehe Anhang 12). Dafür wurde die Befallshäufigkeit und die Befallsstärke von unterschiedlichen Schadbildern bestimmt. Am 26.6.23 wurde bei den Gurken die Anzahl der befallenen Blätter und deren geschätzte Befallsstärke in Prozent angegeben. Zudem wurde an 3 weiteren Terminen die Befallsstärke der gesamten Pflanze auf einer Skala von 1-9 bewertet (Befallsstärke: 1 kein Befall, 3 = wenig Befall, 5 = mittel, 9 = stark). Für eine Analyse der Krankheitssymptome der Gurke im Labor wurde Dr. Matthias Lutz von der Agroscope in Wädenswil zugezogen.

### **Kulturabschluss**

Hierbei wurde auf die Methode der ZHAW zur «Bestimmung Frisch- und Trockensubstanz von Pflanzen» zurückgegriffen (Forschungsbereich Biologische Landwirtschaft et al., 2022). Die turgeszenten Pflanzen wurden ohne Wurzeln eingewogen für die Frischsubstanz. Danach getrocknet bei 105°C in einem Trockenschrank von Binder (FD115). Spätestens 24 Stunden nach Start der Trocknung wurde die Trockensubstanz notiert. Bei der Gerste wurde der TS des Strohs und der Ähren separat gemessen. Bevor die TS der Gerste bestimmt wurde, wurden exemplarisch von 3 Töpfen pro Substrat die Anzahl Körner pro Ähre gezählt. Zudem wurde für die Quantifizierung des Ertrags das Gewicht von 100 Körnern erfasst (siehe Anhang 14).

### 3.3.2 Messung des Chlorophyllindex

Mit der Chlorophyllmessung vom 03.08.23 sollen Annahmen zur Einschätzung der Versorgung der Kulturen gemacht werden (siehe Anhang 13). Verwendet wurde ein Gerät (MPM-100) von Opti-Sciences. Bei der Gurke wurden 5 Blätter pro Pflanze ausgewählt für die Messung. Bei allen Pflanzen wurde der Chlorophyllindex für die Blätter der Nodien 7, 10, 13, 16 und 20 erfasst. Bei den Blättern wurde auf der Oberseite gemessen und jeweils in der Blattmitte. Es wurde, wenn möglich darauf geachtet, dass kein beschädigter Blattteil gemessen wurde. Einige Blätter (siehe Nodium 7) waren allerdings bereits am Absterben. Gleichermassen wurde bei der Gerste verfahren. Mit dem Unterschied, dass in jedem Topf Messungen von 5 unterschiedlichen Haupttrieben gemacht wurden. Vom Haupttrieb des Gerstenhalmes wurde jeweils das zweitunterste Blatt gemessen. Die Messung wurde im ersten Drittel vom Blatt an Triebnähe durchgeführt. Wenn das unterste Blatt beschädigt war aufgrund von Schädlingen oder einer Krankheit, wurde auf das nächste Blatt ausgewichen am Haupttrieb. Im Gegensatz zur Gerste wurde beim Salat der Chlorophyllindex von nur einem Blatt bestimmt. Dazu wurden Blätter gewählt, die ausgebildet waren und am nächsten zur Mitte. Auf jedem Blatt wurden 3 Messpunkte erfasst: basal, mittig und apikal. Wenn in einem Topf alle Salate abgefressen waren, wurde auf eine Pflanze aus einem anderen Topf des gleichen Substrats ausgewichen.

### 3.3.3 Nitratbestimmung in der Gurke

Von 3 Gurken pro Substrat (BH1, BH20, NB) wurde gemäss der standardisierten Methode von Merck KgaA das vorhandene Nitrat mit einem Reflektometer und Messstäbchen gemessen (2012). Für die Probenvorbereitung wurden die geernteten Gurken gewogen und in einem Mixer zerkleinert. 10 Gramm der Gurke wurde in 50 Millilitern destilliertem Wasser gekocht und in einem Messkolben mit weiterem destilliertem Wasser verdünnt. Nach Abkühlen der Probe konnte die Bestimmung des Nitratgehalts durchgeführt werden (siehe Anhang 15).

## 3.4 Nitratauswaschung

Zur Beantwortung der Auswaschungsgefährdung von Nitrat aus der BioHu und dem Neubauerkompost wurden während dem Anbauversuch pro Kultur zweimal der Nitratgehalt im Drainwasser gemessen (siehe Anhang 16). Dazu wurden die Töpfe erhöht auf Untersetzer gestellt, um das perkolierte Wasser aufzufangen (siehe Abbildung 1). Die zugegebene Wassermenge entsprach der Menge an Wasser, die im Rahmen eines Starkniederschlags in der Schweiz auftritt (siehe Formel 7). Zur Berechnung der notwendigen Menge wurden Daten vom Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz verwendet (*Starkniederschläge - MeteoSchweiz*, o. J.).

*Formel 7 Berechnung der Wassermenge Pro Topf für die Nitratauswaschung*

$$\text{Fläche Topf} [m^2] = \frac{r^2 * \pi [cm^2]}{10'000}$$

$$\text{Wasserzugabe} \left[ \frac{l}{\text{Topf}} \right] = \text{Starkniederschlag} \left[ \frac{l/m^2}{10 \text{ min}} \right] * \text{Fläche Topf} [m^2]$$

Diese Menge wurde gewählt, weil die Substrate hohe Wasserhaltekapazitäten haben und sichergegangen werden wollte, dass bei jeder Auswaschung die gleiche Menge an Wasser zugegeben wird, um die Vergleichbarkeit zu ermöglichen. Es ergab sich eine Menge von 400 Millilitern pro Topf, die jeweils

## Methoden

abgewogen wurde in einem Massbecher. Eine Stunde wurde gewartet, bevor mit der Bestimmung des Nitratgehalts im Drainwasser begonnen wurde. Quantifiziert wurde der Nitratgehalt mit Teststäbchen von Supelco (1.16971, 5-225 mg/L (NO<sub>3</sub>-)) und einem Reflektometer (Rqflex® 20). Bei Werten oberhalb des maximalen möglichen Messwertes (>230 mg/l) wurden keine Verdünnungen durchgeführt aufgrund von Teststäbchenknappheiten. Bei der statistischen Auswertung wurden diese Werte mit 300 mg/l ersetzt, um Tendenzen der Nitratauswaschung ermitteln zu können. Durch die Verwendung von Grösser-Werten konnten Schlussfolgerungen gezogen werden.

### 3.5 Abbauversuch

Mithilfe des Protokolls «Bestimmung des aeroben biologischen Abbaus von Feststoffen in Boden oder Kompost» der Fachstelle Umweltbiotechnologie wurde der Abbauversuch durchgeführt (2022). Die Kompostproben wurden auf 2 Millimeter gesiebt, um die Varianz zwischen



Abbildung 2 Aufbau des Nitratauswaschungsversuchs am Beispiel von Gerste im Substrat BH1

den Substraten zu verkleinern. Weil die Substrate ein unterschiedliches Alter und vermutlich auch einen unterschiedlichen Reifegrad aufweisen, die Substrate aber verglichen werden sollen, wurde die Varianz verkleinert. Alle Partikel sind nun gleich gross, was zur Folge hat, dass keine grösseren Stücke vorhanden sind, welche weniger zur Respiration beitragen. Die unterschiedlichen Respirationsraten lassen sich so vergleichen, obwohl die Substrate ein unterschiedliches Alter haben, wobei das Alter sowie die Ausgangszusammensetzung der Substrate bei der Auswertung der Ergebnisse berücksichtigt werden. Die Wasserkapazität wurde mit der Faustprobe gemäss Platen und Wirtz (2010) auf 50% der Wasserhaltekapazität eingestellt. Danach wurden 50 Gramm der Kompost in 1.5 Liter grosse Schottflaschen gefüllt. Verschlussen wurden die Schottfalschen mit den OxiTop® Messköpfen, an welchen ein Gefäss für das Absorptionsmittel (3 Gramm NaOH) angebracht ist. Sobald das Absorptionsmittel gesättigt war, wurde es ausgewechselt. Vom 14.3.2023 bis zum 07.08.2023 wurden die Substrate inkubiert in einem Thermostatschrank bei 22°C. Pro Substrat wurden 3 Wiederholungen durchgeführt. Die Umrechnung des Druckabfalls in die CO<sub>2</sub>-Produktion sowie die Aufbereitung der Daten fand in Excel statt (siehe Anhang 17).

### 3.6 Statistik

Verwaltet wurden die Daten mit Microsoft Excel (Version 16.80). Die statistische Auswertung wurde in Rstudio Version 2023.9.1.494 durchgeführt (Posit team, 2023). Sofern die Analyse mit einer ANOVA erfolgte, wurde die Normalverteilung der Mittelwerte nicht getestet. Der Verzicht beruht darauf, dass die ANOVA auf die Verteilung der Mittelwerte abzielt. Aufgrund des zentralen Grenzwertsatzes ist die Verteilung der Mittelwerte normalverteilt (Fröhlich et al., 2020). Da in R standardmässig die Welch-ANOVA durchgeführt wird, musste auch die Varianzhomogenität der Stichproben nicht berücksichtigt werden, wenn eine ANOVA gemacht wurde. Post-Hoc-Analysen erfolgten mit dem `tukey_hsd()`, um paarweise Vergleiche zwischen den Stichprobenmittelwerten durchzuführen. Das gewählte Konfidenzintervall lag bei 95%, der korrespondierende  $\alpha$ -Wert bei 5%. Um Unterschiede zwischen zwei Stichproben zu testen, wurde der einseitige `t.test()` verwendet. Die Normalverteilung wurde auch hier nicht überprüft, da es sich um einen parametrischen Vergleichstest handelt und somit das zentrale Grenzwerttheorem greift. Bei der statistischen Analyse der Gurkenernte wurde für die ordinalen Daten der Formveränderungen der Kruskal-Wallis Test verwendet. Für die Darstellung der Daten wurde das Package `ggplot ()` verwendet (siehe Anhang 18). Für die Fehlerbehebung und visuelle Anpassung der Diagramme wurde Chatgpt verwendet (*ChatGPT - OpenAI.*, 2023). Die Website «The R Graph Gallery» (Holtz, 2018) wurde als Quelle genutzt. Ein weiteres KI-Tool, das genutzt wurde - nicht für die Statistik, sondern für die Überprüfung der Schreibweise und Rechtschreibung - ist DeepL Write (*DeepL Write*, 2023).

## 4. Resultate

Das Kapitel ist grundsätzlich nach den Fragestellungen gegliedert, wobei zuerst der Literaturvergleich von BioHu mit Kompostsubstraten, dann die Analyse der gemessenen Substrateigenschaften, die Ergebnisse der Nitratauswaschung, die Biomasse und schließlich die Analyse des Abbaueversuchs behandelt werden. Der Abschnitt zur Biomasse ist unterteilt nach Kultur, Trockenmasse, Schadbildern, Chlorophyllindex und Wurzelbonitur. Eine wörtliche Unterteilung nach Signifikanzniveau wurde nicht vorgenommen. Die genaue Angabe der p-Werte erfolgte nach Ermessen.

### 4.1 Vergleich von BioHu zu Substratkompost (Literaturarbeit)

Die Definition der BioHu im Vergleich zu normalen Kompostsubstrat wird über die Eigenschaften, deren Anwendung, den Auswirkungen auf den Boden ausgeführt. Die BioHu wird als reifer Kompost bezeichnet, der im Unterschied zu normalem Kompostsubstrat eine kohlenstoffstabilisierte organische Substanz aufweist, die sich in Gitterstrukturen angeordnet hat. Aus diesem Grund wird die BioHu als Humuserde bezeichnet. Der Begriff Humuserde wird genutzt, um die BioHu von Kompostsubstraten abzugrenzen, weil durch den Nachreifeprozess der BioHu neue Eigenschaften entstehen. Zu diesen Unterschieden werden von den Quellen zur BioHu die unterschiedliche Kohlenstoffspeicherfähigkeit, Nährstoffspeicherung und Ertragspotenzial aufgezählt. Das Ausgangsmaterial der BioHu ist rein pflanzlich und besteht hauptsächlich aus Oliventrester, Traubentrester und Olivenblättern. Beim Herstellungsverfahren nach der Lübke-Hildebrandt Methode wird kein Ton zugesetzt. Dafür findet nach dem Abschluss der Kompostierung der organischen Substanz ein Nachreifeverfahren statt, bei welchem auf den Mieten während mindestens fünf Jahren Mischkulturen angebaut werden (J. Eisenbach, 2022). Das Ausgangsmaterial von Kompostsubstraten kann pflanzlichen, mikrobiellen oder tierischen Ursprungs sein (Baier et al., 2022). Der Kompostierungsprozess der BioHu wie der Kompostierungsprozess von normalem Kompostsubstrat soll gelenkt sein, unter aeroben Bedingungen geschehen und schliesslich ein stabiles, verrottetes Produkte hervorbringen (Baier et al., 2022; Hildebrandt, 2010). Das spezifische Gewicht der BioHu ist grösser als die Anforderungen an die Kompostsubstrate in der Schweiz (siehe Tabelle 3). Die Literaturwerte der elektrischen Leitfähigkeit der BioHu können geringer sein als die der Kompostsubstrate. Weitere Unterschiede sind bei der Wasserhaltekapazität und dem Stickstoffgehalt zu sehen. Beide Eigenschaften sind bei der BioHu höher. Hingegen ist der Range des C:N-Verhältnises bei der BioHu kleiner und liegt tiefer als die obere Grenze des zugelassenen C:N-Verhältnises der Kompostsubstrate. Die Auswirkungen der BioHu wie die der Kompostsubstrate auf die Kulturpflanzen entsprechen einander weitgehend. Auch der pH-Wert liegt in einem ähnlichen Bereich. Zur Wasserlöslichkeit und der Kationenaustauschkapazität der Kompostsubstrate wurden in den verwendeten Quellen keine Angaben gefunden. Aufgrund der ähnlichen Auswirkungen beider Substrate (BioHu und Kompostsubstrat) auf die Kulturpflanzen werden diese für ähnliche Zwecke eingesetzt. Die Empfehlungen für den Einsatz der BioHu reichen vom Einsatz als Dünger, wobei hier keine kurzfristige Stickstoffdüngewirkung erzielt wird, bis zum Einsatz in der Anzucht bei Sämlingen und Jungpflanzen (J. Eisenbach, 2022; Schubert, 2023). Empfohlen wird der Einsatz von Kompostsubstraten mit den in der Tabelle 3 aufgeführten Eigenschaften im gedeckten Gartenbau und für Substratmischungen, wobei ausgereifter Kompost in der Regel bis zu 50% in Erdenmischungen eingesetzt werde (Baier et al., 2022).

## Resultate

Tabelle 2 Gegenüberstellung der Eigenschaften der BioHu und der Kompostsubstrate

Eigenschaften	BioHu (mind. 8 Jahre)	Kompostsubstrate
Spezifisches Gewicht	700-850 g/l	< 620 g/l
elektrische Leitfähigkeit	< 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$	< 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Wasserlöslichkeit der Nährstoffe	Keine nennenswerten Mengen an wasserlöslichen Nährstoffen	--
Kationenaustauschkapazität	> 80 meq/100g	Kann die KAK im Boden erhöhen
pH	7.6	< 7.8
Wasserhaltekapazität	über 80%	58.5 %
Stickstoffgehalt	2.5 - 3.0%	> 12 g/kg TS (>1.2%)
C:N-Verhältnis	8 - 12	< 20
Pflanzengesundheit	Extrem gesund, weil fast keine Fungizide eingesetzt werden müssen	Krankheitsunterdrückungstests werden empfohlen anzugeben, jedoch bestehen keine empfohlene Werte
Pflanzenwachstum	Aussergewöhnlich kräftig	Zufuhr von Makro- und Mikronährstoffen für eine ausgewogene Pflanzenernährung
Wurzelfreundlichkeit	Keine Einschränkungen, Einsatzmöglichkeit bereits bei Sämlingen und Jungpflanzen	Geringer Salzgehalt und gute Pflanzenverträglichkeit, Puffereigenschaften
Ertrag	Sehr hohe Erträge	Steigern Ertrag und Qualität

Die BioHu hingegen wird direkt als Pflanzsubstrat ohne Zusatz von Erde verwendet (Santi, 2022). Jeweils bei beiden Substraten wird das Potenzial als Torfersatz gesehen. Zu den drei Hauptaspekten der Substrate gehören: Erstens der Einsatz zur Pflanzenernährung und zum Pflanzenschutz, zweitens die Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit durch den Humusgehalt und den hohen Anteil an enthaltenen Mikroorganismen und drittens die Kohlenstoffspeicherung (Baier et al., 2022; Santi, 2022).

Das Erklärungsmodell für die Auswirkungen der BioHu basiert auf einer vorkristallinen Gitterstruktur, die langfristig Kohlenstoff speichert und die Bodenfruchtbarkeit unterstützt. Diese kohlenstoffstabilisierte Form entsteht durch mikrobielle und symbiotische Prozesse zwischen Pflanzen und Azotobacter sowie Mykorrhizen (J. Eisenbach, 2022; L. Eisenbach et al., 2019). Das Erklärungsmodell für die Auswirkungen von Komposten basiert unter anderem auf dem Konzept von Humus, der im Verbund mit Tonmineralien die bodenverbessernden Eigenschaften bewirkt. Die Huminstoffe sind aus funktionellen Gruppen wie Carboxyl und phenolischen OH Säuregruppen aufgebaut, die aktive Adsorptionsstellen und starke Komplexierungsfähigkeit mit Ionen besitzen. Die vorhandene Huminsäure im Humus korreliert mit der Aggregatstabilität, welche die mikrobielle Aktivität steigert. Die direkte und indirekte Förderung des Bodenlebens durch Kompost ist ein weiterer Bestandteil des Erklärungsmodells für die Auswirkungen von Kompost (Hauert, 2012; Ho et al., 2022).

## 4.2 Substratanalyse

Die Analysen der Substrateigenschaften zeigen, dass es keinen signifikanten Unterschied gibt zwischen den Substraten bezüglich der Humuszahl, dem Gehalt an organischem Kohlenstoff (C<sub>org</sub>) und dem Gehalt an anorganischem Kohlenstoff (TIC) (siehe Tabelle 4; Rohdaten in Anhang 20).

Tabelle 3 Mittelwerte der gemessenen Substrateigenschaften

Substrat	pH	Feststoffdichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Leitfähigkeit [mS/cm]	Salzgehalt g KCL <sub>eq</sub> /kg TS	Humuszahl	TS [%]	WHK <sub>vol</sub> [%]	WHK <sub>grav</sub> [%]	Porosität [%]	C:N	C <sub>org</sub> [%]	TIC [%]	C [%]	N [%]
vor Anbauversuch														
BH1	7.79 <sup>a</sup>	1.34 <sup>a</sup>	0.349 <sup>a</sup>	3.47 <sup>a</sup>	25.3 <sup>a</sup>	58.7 <sup>a</sup>	43.3 <sup>a</sup>	99.3 <sup>a</sup>	75.4 <sup>a</sup>	11.6 <sup>a</sup>	18.9 <sup>a</sup>	0.629 <sup>a</sup>	20.6 <sup>a</sup>	1.78 <sup>a</sup>
BH20	7.57 <sup>b</sup>	1.56 <sup>b</sup>	0.223 <sup>b</sup>	1.87 <sup>b</sup>	7 <sup>a</sup>	69.4 <sup>b</sup>	49.4 <sup>b</sup>	78.6 <sup>b</sup>	65.0 <sup>b</sup>	10.8 <sup>a</sup>	12.1 <sup>a</sup>	1.00 <sup>a</sup>	13.4 <sup>b</sup>	1.25 <sup>b</sup>
NB	6.88 <sup>c</sup>	1.27 <sup>a</sup>	1.07 <sup>c</sup>	9.38 <sup>c</sup>	17 <sup>a</sup>	66.6 <sup>b</sup>	53.9 <sup>c</sup>	144 <sup>c</sup>	78.7 <sup>a</sup>	19.0 <sup>b</sup>	16.8 <sup>a</sup>	0.238 <sup>a</sup>	19.2 <sup>a</sup>	1.01 <sup>b</sup>
nach Anbauversuch														
BH1			0.202 <sup>a</sup>	2.01 <sup>a</sup>						12.4 <sup>a</sup>	19.8 <sup>a</sup>	0.675 <sup>a</sup>	22.1 <sup>a</sup>	1.78 <sup>a</sup>
BH20			0.152 <sup>a</sup>	1.28 <sup>b</sup>						11.1 <sup>a</sup>	12.4 <sup>b</sup>	0.950 <sup>a</sup>	13.2 <sup>b</sup>	1.20 <sup>b</sup>
NB			0.298 <sup>b</sup>	2.61 <sup>c</sup>						20.6 <sup>b</sup>	21.6 <sup>a</sup>	0.331 <sup>b</sup>	24.2 <sup>a</sup>	1.18 <sup>b</sup>
Vorher			0.547	4.91						13.8	15.9	0.627	17.8	1.34
Nachher			0.217	1.96						14.4	17.0	0.712	19.3	1.37
Unterschied			*	*						ns	ns	ns	ns	ns

BH1: junge biozyklische Humuserde; BH20: alte biozyklische Humuserde; NB: Neubauerkompost; Unterschied: Unterschied zwischen den Substrateigenschaften vor und nach dem Anbauversuch Die Daten sind Mittelwerte; Unterschiedliche Buchstaben innerhalb einer Spalte zeigen signifikante Unterschiede an gemäss dem Tukey test. Signifikanzlevel: \*p< 0.05; ns: nicht signifikant (p > 0.05) beruht auf dem t-Test.

## Resultate

Zur Kategorie, in welcher sich nur 2 von 3 Substraten unterscheiden, gehören die Feststoffdichte, die Trockensubstanz, die Porosität, das C:N-Verhältnis, der totale Kohlenstoffgehalt und der totale Stickstoffgehalt (siehe Tabelle 4). Die reifere BioHu (BH20) hat eine höhere Feststoffdichte und geringere Porosität als die beiden anderen Substrate (BH1, NB). Hinsichtlich des totalen Kohlenstoffgehalts (C) wies die BH20 einen geringeren Wert auf als die BH1 ( $p = 0.0229$ ) und NB ( $p=0.0411$ ). Die BioHu (BH1), die weniger lang gereift war, hat einen signifikant kleineren Trockensubstanzgehalt im Vergleich zu den anderen Substraten (BH1-BH20:  $p = 0.00383$ ; BH1-NB:  $p = 0.0282$ ). Der totale Stickstoffgehalt der BioHu variierte signifikant, wobei BH1 einen durchschnittlichen totalen Stickstoffgehalt von 1.78 % aufwies, während BH20 einen Gehalt von 1.25% und NB 1.01% hatte. Letztlich wurde beim C:N-Verhältnis des Neubauersubstrates ein deutlich höheres Verhältnis festgestellt im Gegensatz zu den BioHu (NB-BH1:  $p = 0.00243$ ; NB-BH20:  $p = 0.00178$ ).

Zu den Eigenschaften, bei welchen sich alle drei Substrate (BH1, BH20 und NB) signifikant unterscheiden, zählen der pH-Wert, die Leitfähigkeit und die Wasserhaltekapazität. Bei der Betrachtung des pH-Wertes zeigt sich, dass bei der BH1 der signifikant höchste pH-Wert gemessen wurde und beim Neubauerkompost der tiefste Wert. Der Vergleich zwischen den Substraten bezüglich der Leitfähigkeit/Salzgehaltes macht deutlich, dass der Neubauerkompost am meisten gelöste Salze enthält (BH1-NB:  $p = 0.000000301$ ; BH20-NB:  $p = 0.000000549$ ). Signifikant am meisten Wasser kann von dem Neubauerkompost gehalten werden.

BH1 und BH20 unterscheiden sich untereinander in mehreren Eigenschaften als NB von beiden Substraten.

Lediglich auf die Leitfähigkeit hatte der Anbauversuch einen signifikanten Effekt. So wurde aufgrund der Bepflanzung und der Bewässerung eine Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit verzeichnet.

### 4.3 Analyse Auswaschung

Insgesamt wurde aus dem Neubauerkompost am meisten Nitrat ausgewaschen, jene von BH20 war 39% geringer als jene beim Neubauerkompost und jene von BH1 56.53% (Tabelle 5). Vor dem Anbauversuch war im Neubauerkompost am meisten Nitrat vorhanden (mehr als 230 mg NO<sub>3</sub>-/l; vgl. Rohdaten im Anhang 19) während in der BH20 weniger Nitrat im Drainwasser gemessen wurde (132 mg NO<sub>3</sub>-/l). Aus der BH1 wurde kaum Nitrat ausgewaschen (<5 mg NO<sub>3</sub>-/l) vor dem Anbauversuch. Über die Kulturdauer war die Nitratauswaschung aus der BH1 signifikant tiefer als die aus dem NB ( $p = 4.40e-6$ ). Auch der Unterschied in der Nitratauswaschung zwischen dem Neubauerkompost und der BH20 war signifikant ( $p = 1.57e-3$ ). Der gemessene Nitratgehalt im Drainwasser der BH20 unterscheidet sich nicht von der Nitratkonzentration im Drainwasser der BH1.

Tabelle 4 Mittelwerte der Nitratmessungen im Drainwasser der Substrate.

Substrat	BH1, 32 <sup>1</sup>	BH20, 33 <sup>1</sup>	NB, 33 <sup>1</sup>
Nitratgehalt [mg NO <sub>3</sub> -/ l]	71.75 <sup>a</sup>	100.64 <sup>a</sup>	165.06 <sup>b</sup>

<sup>1</sup>n; Mittelwert; BH1 = junge Biozyklische Humuserde; BH20 = alte Biozyklische Humuserde, NB = Neubauer Kompost. Die Variablen zeigen, dass sich der Nitratgehalt bei BH1 und NB sowie bei BH20 und NB signifikant voneinander unterscheiden.

Im Drainwasser wurde am meisten Nitrat festgestellt, wenn keine Kultur oder Salat angepflanzt waren in den Töpfen (Tabelle 6). Zudem zeigt die Tabelle 6, dass aus den Töpfen mit Gurken am wenigsten Nitrat ausgewaschen wurde (Gurke-Salat:  $p = 4.82e-10$ ). Die Konzentration des Nitrats im Drainwasser der Gurken enthielt signifikant weniger Nitrat, als wenn Salat ( $p = 4.82e-10$ ) angepflanzt war und unterschied sich signifikant von der Nitratkonzentration im Drainwasser unter den Gersten ( $p=3.75e-3$ ).

Tabelle 5 Mittelwerte der Nitratmessungen im Drainwasser der Kulturen.

Kultur	Gurke 30 <sup>1</sup>	Gerste 30 <sup>1</sup>	Keine Kultur 8 <sup>1</sup>	Salat 30 <sup>1</sup>
Nitratgehalt [mg NO <sub>3</sub> -/ l]	6.3 <sup>a</sup>	72.6 <sup>bd</sup>	162.13 <sup>b</sup>	246.67 <sup>bc</sup>

<sup>1</sup>n; Mittelwert; Unterschiedliche Variablen zeigen, dass sich der Nitratgehalt zwischen den Ausprägungen signifikant unterscheidet.

## 4.4 Temperaturdaten

Die minimale Temperatur, die gemessen wurde, war 10°C (18.05.2023) und die maximale Temperatur von 43°C wurde an den Tagen 26.06.2023 und 15.07.2023 erreicht (Abbildung 3). Die durchschnittliche Temperatur betrug 23.19°C.

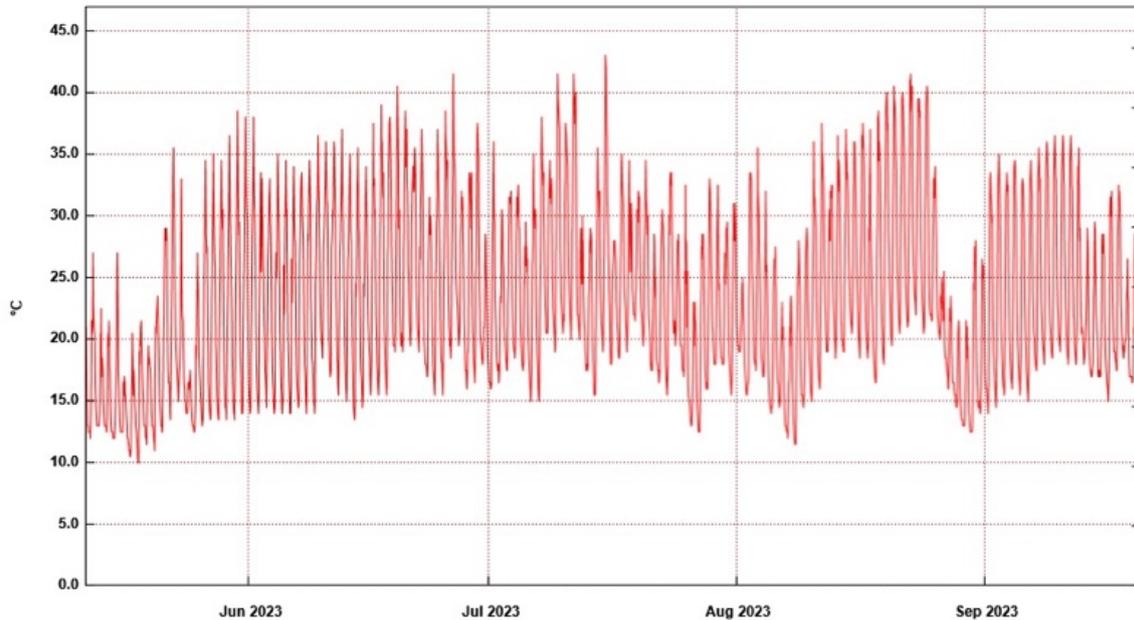


Abbildung 3 Mit iButton-Logger gemessene Temperatur im Gewächshaus auf der Versuchsfläche von Mai bis September

Die minimale, quantifizierte Feuchtigkeit lag bei 19.5% (09.07.2023). Im Gegensatz dazu lag die maximal gemessene Feuchtigkeit bei 97% relativer Luftfeuchtigkeit (27.05.2023; Abbildung 4). Durchschnittlich ergaben alle Messungen über die gesamte Kulturdauer eine relative Luftfeuchtigkeit von 61.46%. Die Zusammenfassung der Klimamessdaten sind im Anhang 6a/6b ersichtlich.

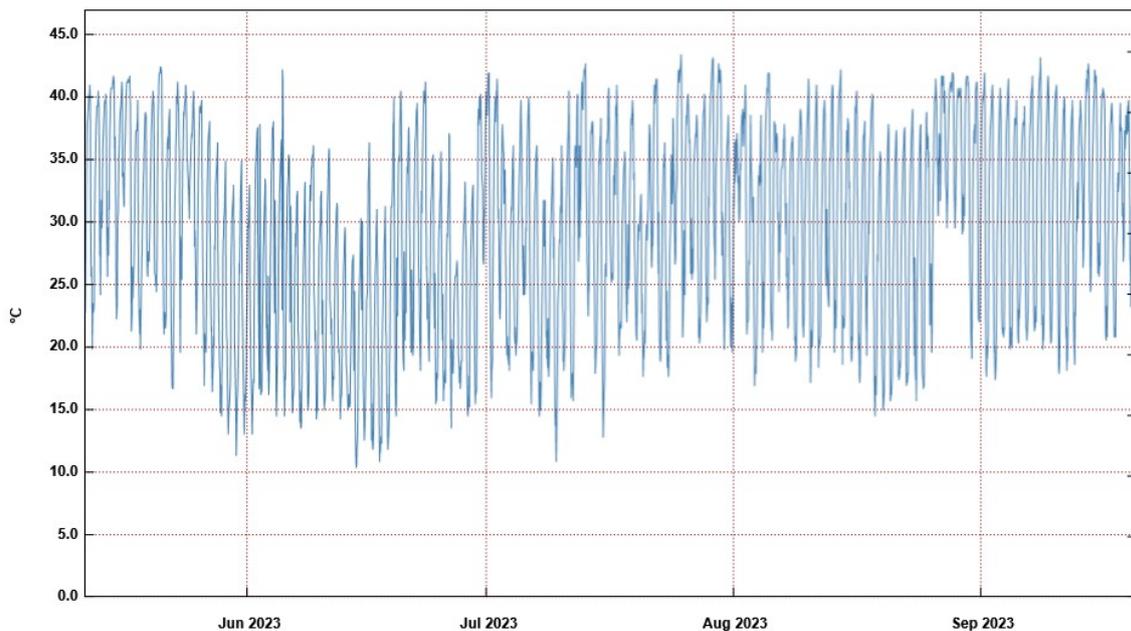


Abbildung 4 Mit iButton-Logger gemessene Feuchtigkeit im Gewächshaus auf der Versuchsfläche von Mai bis September

## 4.5 Analyse Biomasse und Wurzeln

### 4.5.1 Gerste

Zwischen der Keimfähigkeit der Gersten in den verschiedenen Substraten konnte kein Unterschied ausgemacht werden (siehe Tabelle 7). Hingegen war im Beikrautdruck die Beikrautpräsenz bei der BH1 signifikant am höchsten. Ebenso zeigt sich eine statistisch relevante Differenz zwischen der Beikrautpräsenz der BH20 und dem NB. Zur Charakterisierung der Ernte der Gerste wurden die beiden Parameter: Trockensubstanz (Gerstenähren und Gerstenstroh) sowie Tausendkorngewicht (TKG) berücksichtigt. Dabei zeigt sich, dass das TKG der BH1 signifikant tiefer ist. Die Ergebnisse der Trockensubstanz sind in einem separaten Kapitel dargestellt (4.2.3 Trockenmasse Gurke, Salat, Gerste).

*Tabelle 6 Mittelwert und Standardabweichung der Keimfähigkeit der Gerste nach 11 Tagen ( $p > 0.05$ ; ns), des Beikrauts und des TKG.*

Substrat	BH1	BH20	NB
Keimfähigkeit [%]	89.3 <sup>a</sup> ± 11.4	92.7 <sup>a</sup> ± 7.34	94 <sup>a</sup> ± 5.48
Beikraut [1-9]	5.4 <sup>a</sup> ± 1.67	3.2 <sup>b</sup> ± 1.11	1.05 <sup>c</sup> ± 0.224
Tausendkorngewicht [g]	33.7 <sup>a</sup> ± 4.16	48.7 <sup>b</sup> ± 1.15	43.3 <sup>b</sup> ± 2.08

Boniturskala von 1-9. 1 = kein Beikraut, 9 = sehr starke Beikrautpräsenz Unterschiedliche Buchstaben in einer Zeile deuten auf einen signifikanten Unterschied

In der Entwicklung der Gerste konnten Unterschiede zwischen den Substraten festgestellt werden. So unterscheidet sich der Mittelwert der weitest entwickelten Stadien der BH1 signifikant von dem Mittelwert der weitest entwickelten Gersten der NB ( $p = 1.58e-5$  \*\*\*\*) und die Mittelwerte der weitest entwickelten Gersten der NB signifikant von den Mittelwerten der weitest entwickelten Gersten der BH20 ( $p = 3.83e-3$  \*\*). Die BBCHO-Stadien zwischen der BH1 und BH20 unterscheiden sich nicht signifikant. Bei den tiefsten bonitierten BBCH-Stadien pro Zeitpunkt unterscheiden sich die BH1 und die BH20 signifikant ( $p = 5.86e-4$  \*\*\*) und die BH20 und NB signifikant ( $p = 1.03e-4$  \*\*\*). Werden alle BBCH-Stadien zusammengenommen, unterscheiden sich nur die Entwicklungsstadien der Verfahren BH20 ( $\bar{\phi}49.3$ ) und NB ( $\bar{\phi}43.8$ ) signifikant voneinander ( $p = 2.28e-2$  \*). Ab dem 23.08.23 sind die Mittelwerte der wenigsten entwickelten Gersten niedriger als die Werte vor dem 23.08.23. Die Entwicklung der weitest entwickelten Gersten ist nach dem 05.09.23 (Zeitpunkt 6) nur noch marginal (siehe Abbildung 4). Das Intervall zwischen den dem Zeitpunkt 3 (17.7.23) und 4 (8.8.23) ist am grössten mit 22 Tagen.

Die Höhe der Gerste im Neubauerkompost ist signifikant höher als die Höhe der Gerste in der BH20 ( $p = 3.81e-4$  \*\*\*) wie in Abbildung 5 ersichtlich. Auch die Höhe der BH1 unterscheidet sich signifikant von der Höhe der BH20 ( $p = 1.29e-6$  \*\*\*\*). Ein Unterschied in der Höhe zwischen der BH1 und dem Neubauerkompost konnte nicht festgestellt werden ( $p > 0.05$ ). Ab dem 08.08.2023 (t4) kann kein signifikantes Höhenwachstum mehr identifiziert werden ( $p > 0.05$ ). Insgesamt wurden die Gersten zwischen durchschnittlich 57.7 Centimeter (BH20) bis durchschnittlich 63.6 Centimeter (NB) hoch.

# Resultate

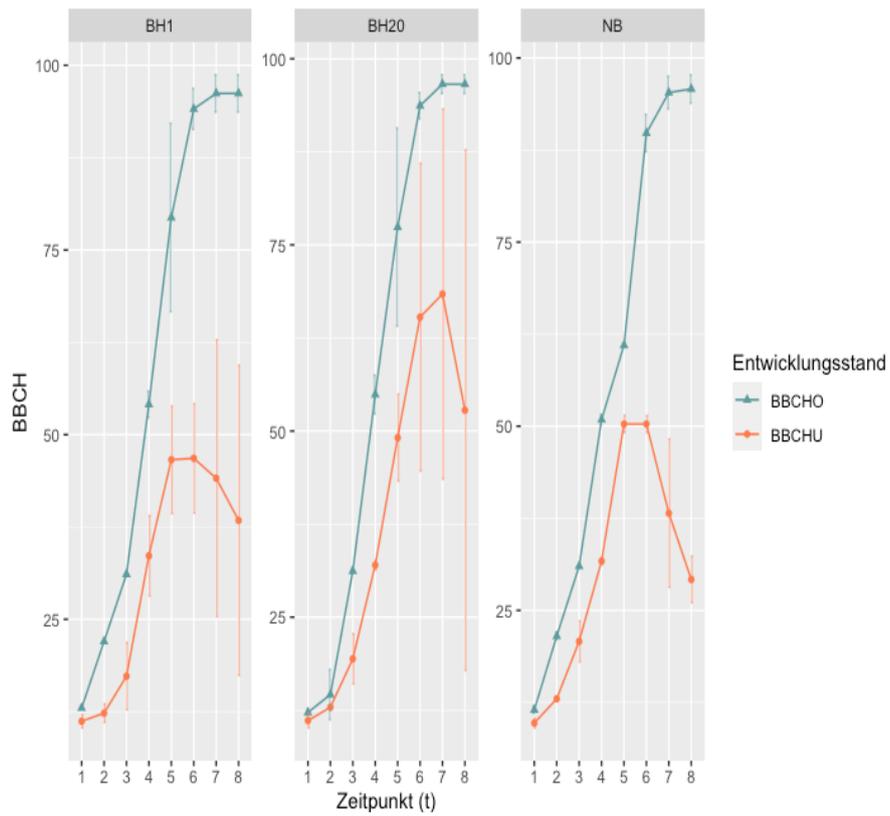


Abbildung 4 Liniendiagramme der bonitierten BBCH-Entwicklungsstadien der Gerste nach Substrat mit Whiskers. BBCHO sind die grössten Entwicklungsstadien zum bonitierten Zeitpunkt und BBCHU sind die kleinsten Entwicklungsstadien zum bonitierten Zeitpunkt. Vom 27.06.2023 (t 1) bis zum 18.09.2023 (t 8)

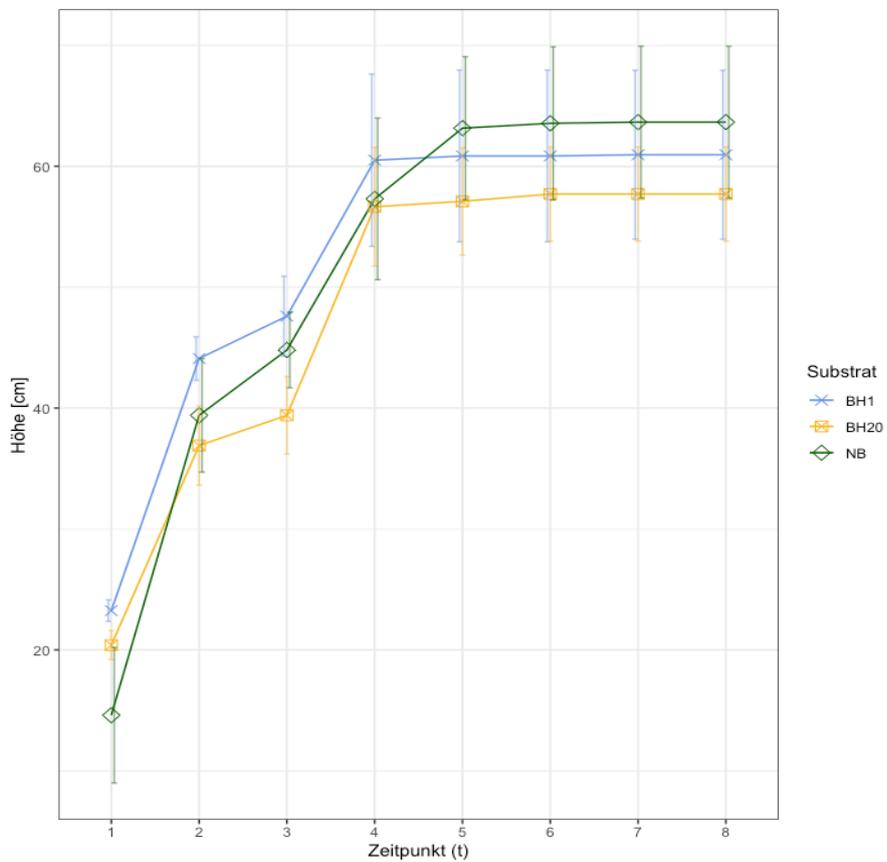


Abbildung 5 Liniendiagramm der bonitierten Höhe der Gerste nach Substrat mit Whiskers. Vom 27.06.2023 (t1) bis zum 18.09.2023 (t2).

## Resultate

### 4.5.2 Gurke

Der Keimerfolg des Neubauerkompost beträgt 77.5%, bei der BH1 72.5% und bei der BH20 62.5% (siehe Abbildung 6).

Es ergaben sich klare Unterschiede im Wachstum zwischen den unterschiedlichen Substraten (BH1-BH2:  $p= 2.52e- 5$  \*\*\*\*; BH1-NB:  $p= 1.68e-13$  \*\*\*\*, BH20-NB:  $p= 7.44e-15$  \*\*\*\*). Der Mittelwert der Höhe der Gurken im Neubauerkompost ist grösser als der Mittelwert von der BH1 mit einem p-Wert von 0.0004235 bei einem Signifikanzniveau von 0.05 und grösser als der Mittelwert der Höhe der Gurken in der BH20 ( $p= 4.252e-08$ ). Auch die Höhe der Gurken in der BH1 ist signifikant grösser als die Höhe der Gurken in der BH20 ( $p= 0.004828$ ). In der Abbildung 8 kann die stetige Zunahme der Gurkenhöhe über die Kulturdauer betrachtet werden. Bei der Betrachtung der Tabelle 8 fällt auf, dass sich lediglich die Anzahl Nodien und die Anzahl der Fruchtstände zwischen den BioHu und dem Neubauerkompost signifikant unterscheiden. Die Befallsstärke der Gurken hat über die Kulturdauer signifikant zugenommen. So ist der Mittelwert am Kulturtag 97 mit 5.26 signifikant grösser als der Mittelwert der Befallsstärke am Kulturtag 65 von 3.96 (p-Wert von 0.0001566).

Tabelle 7 Mittelwerte und Standardabweichungen der Anzahl Blätter, Nodien und Fruchtstände sowie der Blattflächen der Gurken unterschieden nach den Substraten.

Substrat	BH1	BH20	NB	p-Wert
Anzahl Blätter	8.1 <sup>a</sup> ± 0.745	8.05 <sup>a</sup> ± 0.275	9.35 <sup>a</sup> ±0.918	ns
Anzahl Nodien	19.1 <sup>a</sup> ± 1.44	17.8 <sup>a</sup> ± 0.865	23.2 <sup>b</sup> ± 0.731	<u>BH1-NB:</u> p<0.001*** <u>BH20-NB:</u> p<0.0001****
Blattfläche [cm <sup>2</sup> ]	138 <sup>a</sup> ± 5.44	132 <sup>a</sup> ± 2.78	133 <sup>a</sup> ± 3.48	ns
Anzahl Fruchtstände	4.2 <sup>a</sup> ± 1.22	3.58 <sup>a</sup> ± 0.446	5.78 <sup>b</sup> ± 0.793	<u>BH1-NB:</u> p<0.05* <u>BH20-NB:</u> p<0.001***

Unterschiedliche Buchstaben zwischen den Verfahren innerhalb einer Zeile deuten auf einen statistisch signifikanten Unterschied. nicht signifikant (ns), signifikant (\*), sehr signifikant (\*\*), hoch signifikant (\*\*\*), höchst signifikant (\*\*\*\*)

Die Boniturdaten der Ernte: Gurkengewicht, Gurkenlänge und Formveränderung zeigen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Substraten (siehe Abbildung 7 und 8).

# Resultate

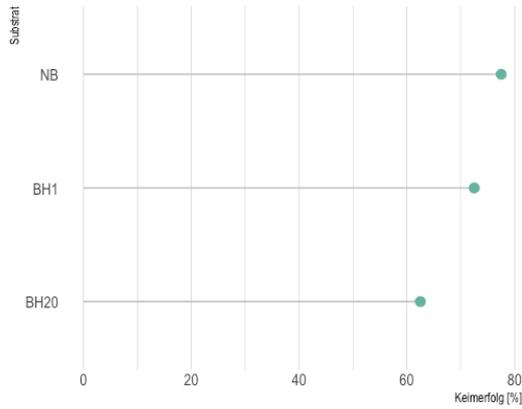


Abbildung 6 Keimerfolg der Gurkensamen in den verschiedenen Substraten. Gekeimte Samen im Verhältnis zur Anzahl gesäter Samen

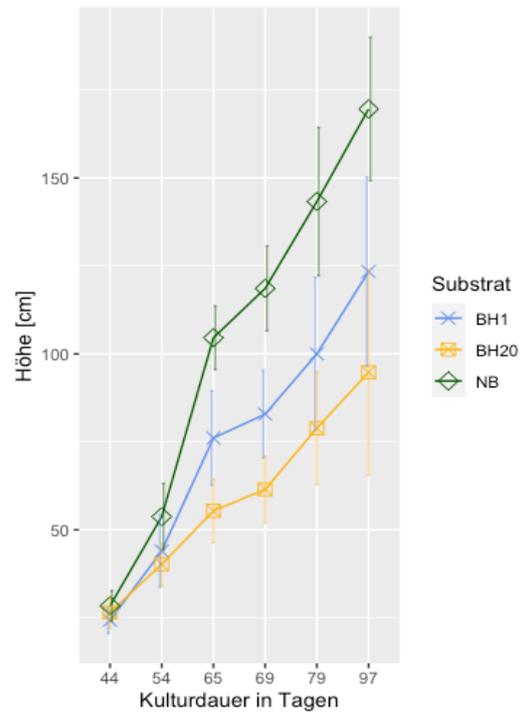


Abbildung 8 Liniendiagramm der bonitierten Höhe der Gurken nach Substrat mit Whiskers vom 16.06.2023 bis zum 08.08.2023

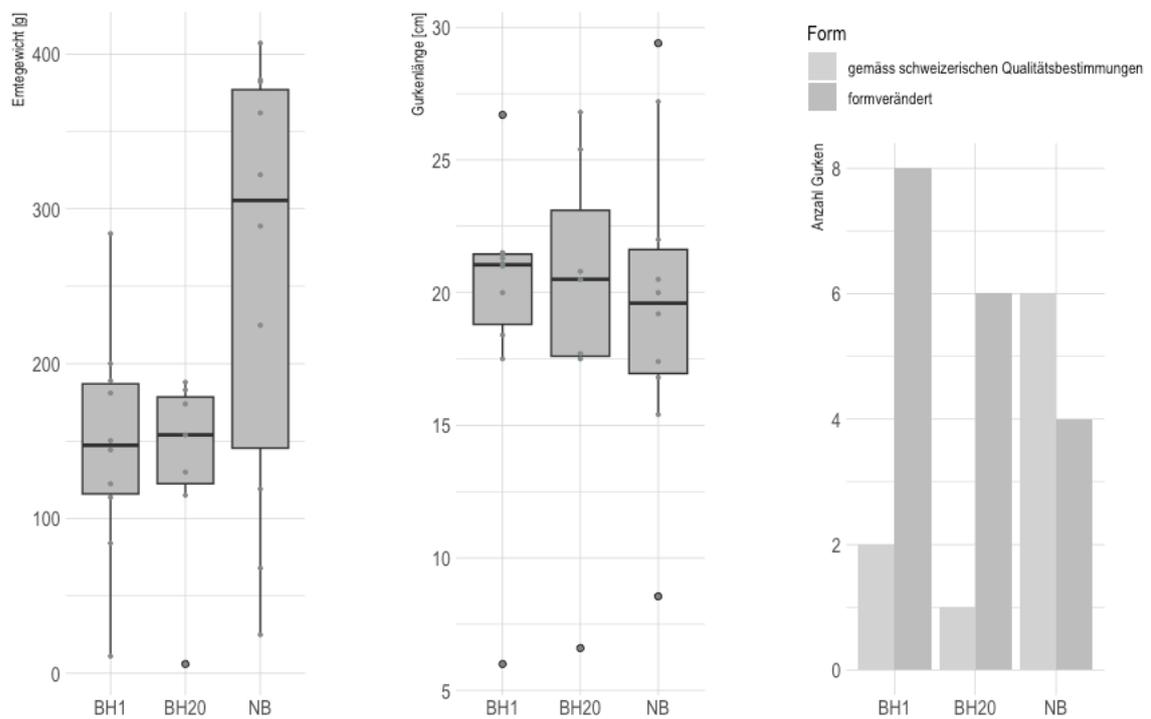


Abbildung 7 Diagramme zur Gurkenernte. Boxplot zum Erntegewicht und der Gurkenlänge und Barplot zur Form Gemäss den schweizerischen Qualitätsbestimmungen für Nostranogurken



Abbildung 8 Gurkenernte vom 09.08.2023; oberste Reihe NB, mittlere Reihe BH1 und unterste Reihe BH20 (Foto: S.Renaud-dit-Louis)

## Resultate

### 4.5.3 Salat

Der Keimerfolg des Salates ist bei der BH1 am höchsten mit 93.3%, danach folgt der Neubauerkompost mit 90% und schliesslich die BH20 mit 70% (siehe Abbildung 9). In der Entwicklung der Höhe über die Kulturdauer können signifikante Zunahmen verzeichnet werden ( $p < 0.001$ ). Unterschiede in der Salthöhe zwischen den Substraten können im Mittelwert zur BH1 festgestellt werden. So ist der Unterschied des Mittelwertes einerseits zur BH20 signifikant ( $p = 9.82 \times 10^{-13}$  \*\*\*\*) und zum NB-Kompost ( $p = 7.55 \times 10^{-13}$  \*\*\*\*) (siehe Abbildung 10). Im Neubauersubstrat wurde kein Beikraut bonitiert (siehe Abbildung 11). Der Beikrautdruck in der BH1 ist signifikant am stärksten ( $p < 0.05$ ). Dafür war der Krankheits-/Schädlingsdruck im Substrat der BH1 im Vergleich zum NB-Kompost signifikant kleiner ( $p < 0.05$ ) (Abbildung 12). Wenn die Grünfärbung der Salate betrachtet wird, kann eine Tendenz zwischen den Substraten ausgemacht werden, jedoch ist diese nicht signifikant. Genauso weist die Blattkräuselung kein signifikanter Unterschied in der Bonitur auf ( $p > 0.05$ ).

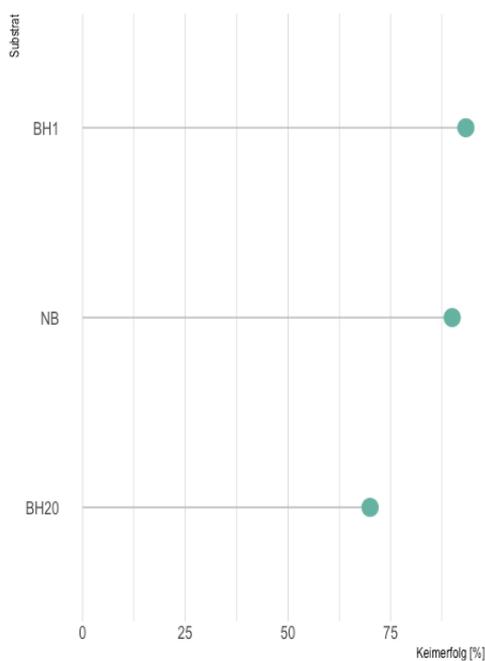


Abbildung 9 Keimerfolg der Salatsamen in den verschiedenen Substraten. Gekeimte Samen im Verhältnis zur Anzahl gesäter Samen

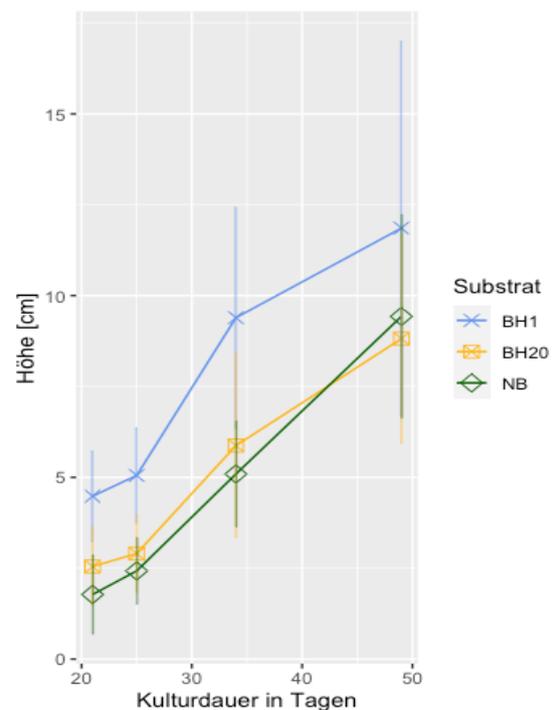


Abbildung 10 Liniendiagramm der bonitierten Höhe des Salates nach Substrat mit Whiskers vom 07.07.2023 bis zum 04.08.2023

# Resultate

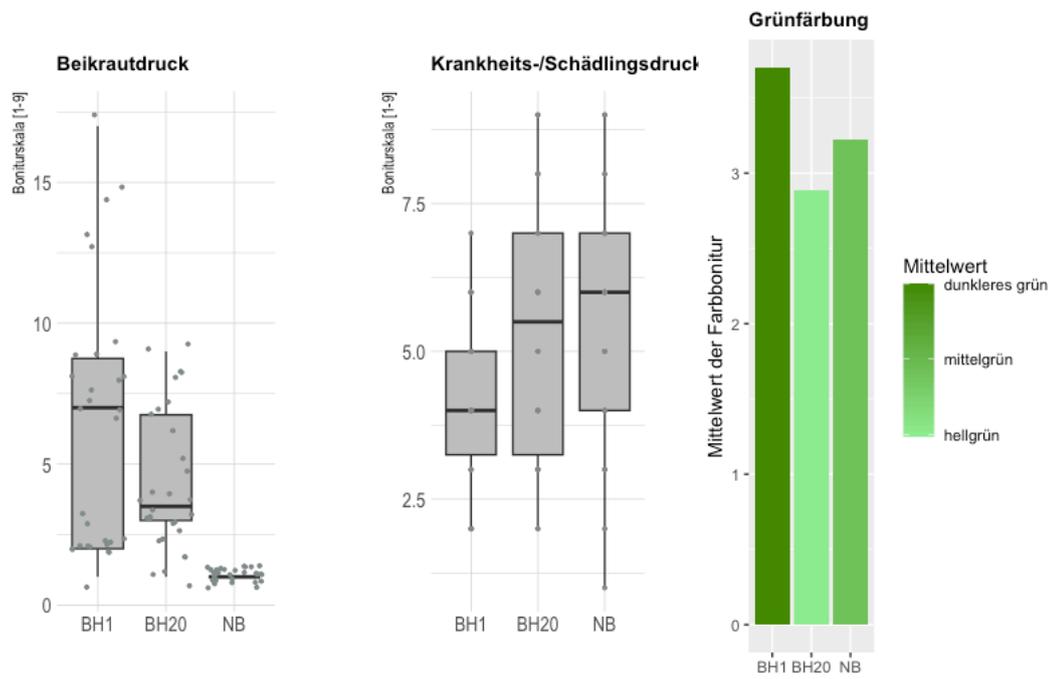


Abbildung 11 Diagramme zur Salatbonitur. Boxplot des Beikrauts- sowie des Krankheits- und Schädlingsdruck. Boniturskala reicht von 1 = fehlend bis 9 = sehr stark. Barplot der Mittelwerte der Färbung des Salats. Boniturskala von 1-9 (1=sehr hellgrün, 9= sehr stark dunkelgrün)



## Resultate



Abbildung 12 Salat vor der Ernte; in der linken Spalte sind BH1 Salate, in der mittleren Spalte BH20 Salate und in der rechten Spalte NB Salate (Fotos: S. Renaud-dit-Louis, 04.08.2023)

## Resultate

### 4.5.4 Trockenmasse Gurke, Salat, Gerste

Aus Tabelle 9 geht hervor, dass am meisten Trockenmasse in den Gerstenähren im Substrat NB erzielt wurde. Die Trockenmassenanteile zwischen den Kulturen unterscheiden sich signifikant ( $p < 0.05$ ). Zwischen den Substraten gibt es allerdings kaum Unterschiede. In der BH20 konnte beim Gerstenstroh am wenigsten Trockenmasse erzielt werden und in dem NB am meisten.

*Tabelle 8 Angabe der Mittelwerte und Standardabweichungen der Trockenmasse der unterschiedlichen Kulturen unterteilt nach den Substraten.*

		Gurke	Gerstenstroh	Gerstenähren	Salat
Trockensubstanz [%]	BH1	46.6 <sup>a</sup> ± 32.8	17.9 <sup>a</sup> ± 6.36	88.2 <sup>a</sup> ± 1.67	7.31 <sup>a</sup> ± 0.639
	BH20	40.9 <sup>a</sup> ± 7.12	8.47 <sup>b</sup> ± 2.98	87.1 <sup>a</sup> ± 0.887	7.37 <sup>a</sup> ± 2.97
	NB	24.9 <sup>a</sup> ± 2.08	49.3 <sup>c</sup> ± 10.5	87.6 <sup>a</sup> ± 1.92	6.289 <sup>a</sup> ± 2.57
p-Wert	BH1-BH20	ns	2.05e-2 *	ns	ns
	BH20-NB	ns	2.81e-12 ****	ns	ns
	NB-BH1	ns	9.2 e-10 ****	ns	ns

Unterschiedliche Buchstaben in einer Spalte deuten auf einen signifikanten Unterschied hin. nicht signifikant (ns), signifikant (\*), sehr signifikant (\*\*), hoch signifikant (\*\*\*), höchst signifikant (\*\*\*\*)

## Resultate

### 4.5.5 Krankheiten

Der Befall mit *Pythium* spp. (Abbildung 13) ist im BH1 Substrat signifikant höher als im Neubauersubstrat (siehe Tabelle 14). Die BioHu sind häufiger mit Thrips (Abbildung 14) befallen als NB. Die Befallshäufigkeit aller Neubauergurkenblätter ist am niedrigsten, dafür ist die Befallsstärke der Blätter stärker als bei den Gurkenblättern der BH20.

*Tabelle 9 Mittelwert, Standardabweichung und p-Wert der Schadbilder (Thrips und Pythium spp.) der Gurke gruppiert nach Substraten.*

		Thrips		Pythium spp.	
		Befallshäufigkeit [%]	Befallsstärke [%]	Befallshäufigkeit [%]	Befallsstärke [%]
Gurke	BH1	90.7 <sup>a</sup> ± 8.76	30 <sup>ab</sup> ± 11.5	33.0 <sup>a</sup> ± 36.4	42.0 <sup>a</sup> ± 43.1
	BH20	91.5 <sup>a</sup> ± 7.64	25.5 <sup>a</sup> ± 6.85	16.7 <sup>ab</sup> ± 27.8	19.7 <sup>ab</sup> ± 31.7
	NB	80.7 <sup>b</sup> ± 9.01	40.4 <sup>b</sup> ± 9.5	0 <sup>b</sup>	0 <sup>b</sup>
p-Wert	BH1-BH20	ns	ns	ns	ns
	BH20-NB	0.0226 *	0.00441 **	ns	ns
	NB-BH1	0.037 *	ns	0.025 *	0.014 *

Unterschiedliche Buchstaben in einer Spalte deuten auf einen signifikanten Unterschied. nicht signifikant (ns), signifikant (\*), sehr signifikant (\*\*)

Anhand der Beurteilung des Schadbildes wird ersichtlich, dass die Gersten in allen Substraten betroffen waren. Insgesamt konnten 3 Schadbilder differenziert werden. Lediglich bei dem Schadbild der Blattläuse und dem Frassschaden der Raupen zeigt sich ein signifikanter Unterschied. So hat der Neubauerkompost einen signifikant geringeren Blattlausbefallsdruck als die BH1. Im Gegensatz dazu ist der Frassschaden durch die Raupen im Neubauer substrat signifikant höher als in der BH20.

*Tabelle 10 Mittelwert, Standardabweichung und p-Wert der Schadbilder (Blattläuse, Frassschaden durch Raupen und Krankheit.) der Gerste gruppiert nach Substraten.*

		Blattläuse	Frassschaden	Krankheit	
		Befallsdruck [%]	Befallsdruck [%]	Befallshäufigkeit [Anzahl Pflanzen/ Topf]	Befallsstärke [%]
Gerste	BH1	11 <sup>a</sup> ± 3.09	2.9 <sup>ab</sup> ± 1.79	10	52.5 <sup>a</sup> ± 11.6
	BH20	7.6 <sup>ab</sup> ± 4.67	1.5 <sup>a</sup> ± 2.55	10	54.5 <sup>a</sup> ± 10.1
	NB	5.2 <sup>b</sup> ± 2.66	8.7 <sup>b</sup> ± 8.54	10	59.5 <sup>a</sup> ± 8.32
p-Wert	BH1-BH20	ns	ns	ns	ns
	BH20-NB	ns	0.0131 *	ns	ns
	NB-BH1	0.0033 **	ns	ns	ns

Unterschiedliche Buchstaben in einer Spalte deuten auf einen signifikanten Unterschied. nicht signifikant (ns), signifikant (\*), sehr signifikant (\*\*)

## Resultate

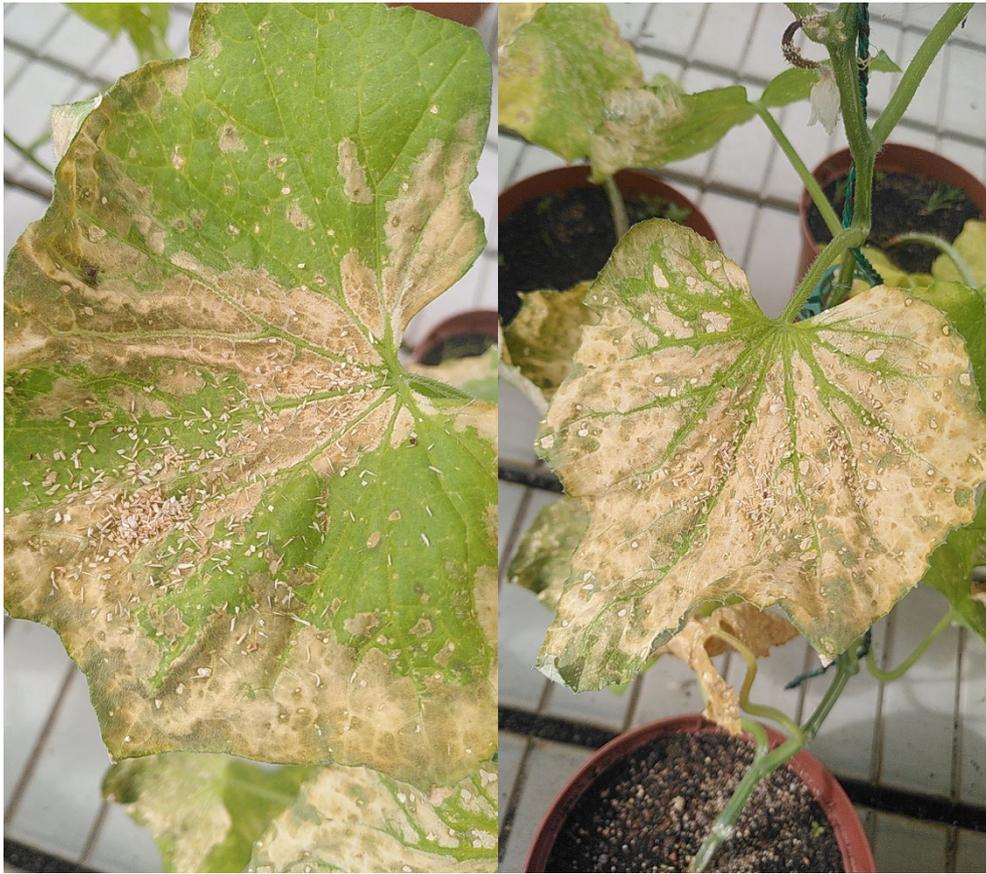


Abbildung 13 Schadbild *Pythium* spp. (Fotos: S. Renaud-dit-Louis, 04.08.2023)



Abbildung 14 Schadbild *Thrips* (Fotos: S. Renaud-dit-Louis, 30.06.2023)

### 4.5.6 Chlorophyllindex

Nur bei den beiden Kulturen Gurken und Gersten lässt sich ein Unterschied ausmachen zwischen den Verfahren (Abbildung 15). Der Mittelwert des Chlorophyllindex der BH1 Gurken (0.266) ist signifikant grösser als der Chlorophyllmittelwert der BH20 ( $p= 7.28e-3$  \*\*) und als beim Neubauerkompost ( $p= 6.74e-6$  \*\*\*\*). Zudem ist ein signifikanter Unterschied feststellbar zwischen dem mittleren Chlorophyllindex der Gerste in Neubauersubstrat zu der Gerste in den BioHu ( $p<0.0001$ ). Mit einem Mittelwert von  $0.732 + 0.146$  ist der Chlorophyllindex in den Neubauergersten am höchsten.

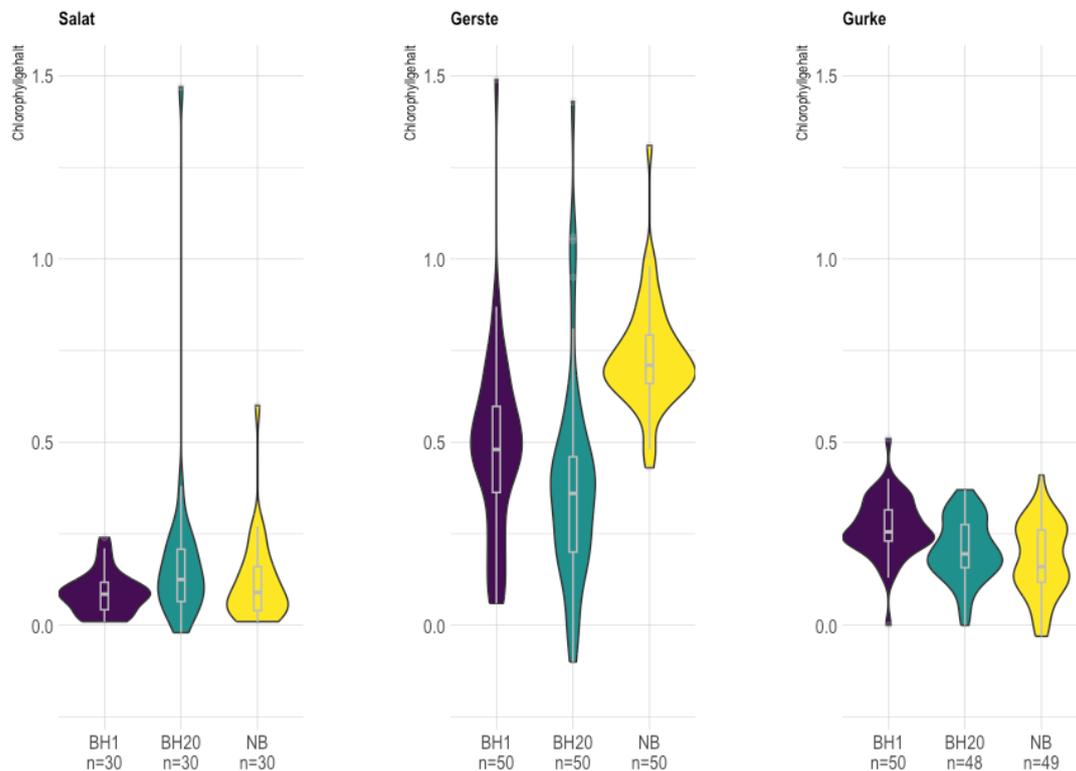


Abbildung 15 Violinendiagramm der Chlorophyllindex gruppiert nach den Substraten mit Anzahl an Messungen pro Substrat und Kultur.

### 4.5.7 Wurzelbonitur

In der Tabelle 9 ist ersichtlich, dass sich die Durchwurzelung im Substrat BH20 signifikant unterscheidet von der BH1 und dem Neubauerkompost ( $p<0.001$ ). Die bonitierte Durchwurzelung ist in der BH20 signifikant geringer als in der BH1 und dem Neubauerkompost (Abbildung 16). Auch der Median von 4 bei der BH1 und NB im Vergleich von 2 bei der BH20 zeigt diesen Unterschied zwischen den Substraten auf.

Tabelle 11 Mittelwerte und Standardabweichung der Durchwurzelung der Substrate.

Substrat	BH1	BH20	NB
Durchwurzelung [1-8]	$4^b \pm 2$	$2.4^a \pm 1.4$	$4.47^b \pm 2.4$

BH1 = junge Biozyklische Humuserde; BH20 = alte Biozyklische Humuserde, NB = Neubauer Kompost. Unterschiedliche Variablen zeigen, dass sich die Durchwurzelung signifikant unterscheidet.

## Resultate



*Abbildung 16 Wurzelbild des Salats. Pro Substrat sind 3 Wurzelbilder dargestellt. Reihen von oben nach unten: BH1, BH20, NB (Fotos: S. Renaud-dit-Louis, 10.08.2023)*

#### 4.6 Analyse CO<sub>2</sub>-Produktion des Abbauersuchs

NB wies gegenüber den beiden BioHu eine signifikant höhere CO<sub>2</sub>-Produktion auf (Abbildung 13). Die BH1 zeigt einen moderaten Anstieg der CO<sub>2</sub>-Produktion. Die geringste CO<sub>2</sub>-Produktion wird von der BH20 verzeichnet ( $p < 0.0001$ ). Zu Beginn war die CO<sub>2</sub>-Produktion bei allen Substraten innerhalb der Wiederholungen ähnlich. Mit der Dauer des Experiments zeigen die Messungen bei NB und BH1 Unterschiede, während die CO<sub>2</sub>-Produktion bei der BH20 bei allen Wiederholungen relativ einheitlich niedrig bleibt. Eine Messung der BH1 erstreckt sich nicht über den gesamten Zeitraum. Es scheint, dass das Plateau, bei dem der biologische Abbau abgeschlossen ist, noch nicht erreicht wurde. Trotzdem zeigt die CO<sub>2</sub>-Produktion einen abnehmenden Zuwachs mit fortschreitender Zeit. Insgesamt wurden nach 146 Tagen Inkubation durchschnittlich 1920.42 mg CO<sub>2</sub>/ kg TS von NB, 1324.14 mg CO<sub>2</sub>/ kg TS von BH1 und von 497.62 mg CO<sub>2</sub>/ kg TS von BH20 produziert. Dies entspricht einer durchschnittlichen stündlichen CO<sub>2</sub>-Produktion von 0.55 mg CO<sub>2</sub>/ kg TS (NB), 0.38 mg CO<sub>2</sub>/ kg TS (BH1) und 0.14 mg CO<sub>2</sub>/ kg TS (BH20).

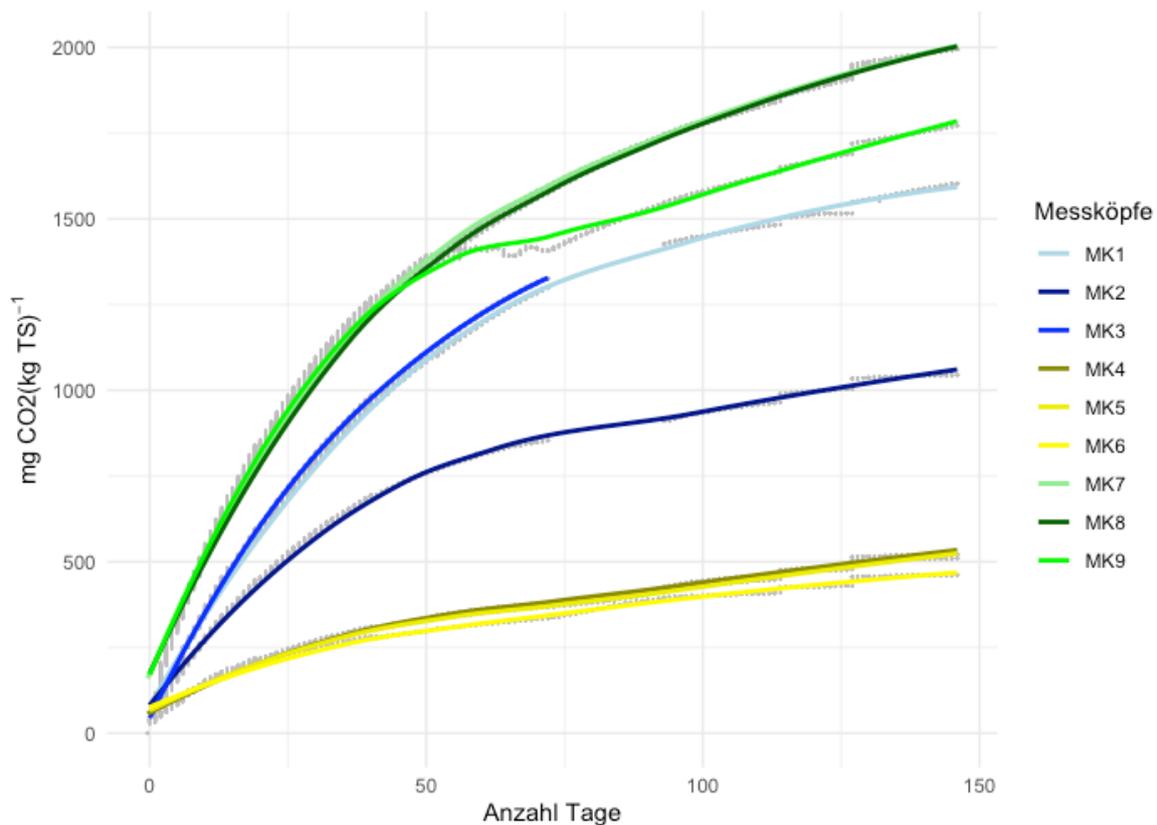


Abbildung 17 Liniendiagramm der CO<sub>2</sub>-Produktion des Abbauersuchs unterteilt nach Verfahren. MK1-MK3 = BH1; MK4-MK6 = BH20 und MK7-MK9 = NB. Die grauen Punkte stellen die tatsächlichen Messungen dar, über welche die geglätteten Kurven gelegt wurden.

## 5. Diskussion

### 5.1 Vergleich von BioHu zu Substratkompost (Literaturarbeit)

Die Eigenschaften von Komposten werden durch ihr Ausgangsmaterial, den Kompostierungsprozess und dessen Dauer beeinflusst (Kupper & Fuchs, 2007). Im Vergleich zwischen BioHu und Kompostsubstraten zeigen sich Unterschiede in allen drei Faktoren. Die Differenz in den Eigenschaften könnte sich aus Unterschieden in diesen Produktionsfaktoren ergeben. Daneben können die Messverfahren einen entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse haben wie beispielsweise beim pH-Wert, der in der Suspension oder dem Filtrat gemessen werden kann und das Extraktionsverhältnis je nach Verfahren andersartig ist (Kupper & Fuchs, 2007). Die unterschiedlichen Resultate aufgrund verschiedener Methoden werden auch von Baier et al. (2022) diskutiert.

Es wird angenommen, dass das spezifische Gewicht der BioHu aufgrund ihres höheren Alters höher ist als das der Kompostsubstrate (Kupper & Fuchs, 2007). Der Salzgehalt des Kompostes ist eine Eigenschaft, die vom Produktionsfaktor Ausgangsmaterial beeinflusst wird. Laut Kupper & Fuchs (2007) führen Blätter und Holz zu weniger Salz im Kompost. Rasen und Grünabfälle hingegen verursachen einen höheren Salzgehalt im Kompost. Wird dies angewendet auf den bestehenden Vergleich, hängt die geringere elektrische Leitfähigkeit der BioHu zusammen mit den Ausgangsmaterialien. Die von den Quellen zur BioHu (J. Eisenbach, 2022; L. Eisenbach et al., 2019; Kakabouki et al., 2021) aufgeführten Ausgangsmaterialien: Oliventrester, Traubentrester und Olivenblättern entsprechen der Aussage. Im Gegensatz dazu haben Kompostsubstrate höhere EC-Wert, was zu einem niedrigeren Ertragspotenzial führen kann, da ein höherer EC-Wert das Wasserpotenzial verringert und das Pflanzenwachstum hemmt (Liu et al., 2014).

Ob die Wasserhaltekapazität volumetrisch oder gravimetrisch berechnet wurde, hat einen bedeutenden Einfluss auf das Resultat. Da die Bestimmungsmethode der Wasserhaltekapazität nicht deklariert wird in den Quellen (Baier et al., 2022; J. Eisenbach, 2022; Kupper & Fuchs, 2007), ist hier nicht auszuschliessen, dass der Unterschied zwischen den Substraten auf die unterschiedliche Methodik zurückzuführen ist. Weitere Einflussfaktoren auf die Wasserhaltekapazität sind die Porosität, die Aggregatsstabilität und der Huminsäuregehalt. Huminstoffe verbessern die Bodenporosität und die Bildung von Aggregaten. Eine hohe Porosität wie auch eine hohe Aggregatstabilität bewirken ein verbessertes Wasserhaltevermögen (Ho et al., 2022). Die Wasserhaltekapazität der BioHu scheint hoch zu sein gemäss den Literaturwerten (Siehe Tabelle 3), wenn dies auf eine hohe Porosität zurückzuführen ist, würde dies auch die Nährstoffspeicherungsfähigkeit der BioHu erklären.

Eisenbach (2022) spricht von einem ungewöhnlich hohen Stickstoffgehalt (2.5-3%) in der BioHu im Vergleich zu Kompost (>1.2%). Der Stickstoff in Komposten kann während der Kompostierung über die Temperatur, die Feuchtigkeit, den Sauerstoff und den pH reguliert werden. In der Schweiz geltende fachliche und rechtliche Grundlagen zur Herstellung der Komposte. Ausserdem besteht das Anliegen der Verantwortlichen von Kompostieranlagen möglichst qualitative hochwertige Produkte abzugeben. Die strukturierte Regelung der Kompostierung deutet darauf hin, dass der hohe Stickstoffgehalt der

BioHu womöglich erst bei der Nachreifebehandlung entsteht. Die Dauer der Kompostierung ist laut Zhao et al. (2020) ein Hauptverlustfaktor von Stickstoff. Ihre Metanalyse hat ergeben, dass der totale Stickstoffverlust steigt mit zunehmender Kompostierungsdauer, weil sich die Stoffwechselprozesse verlangsamen während der Abkühlungs- und Reifephase, was zu den Verlusten führt. Dies spricht gegen eine längere Kompostierungsdauer. Die Kompostierung der BioHu dauert bis zu fünf Jahren, wobei auch ältere BioHu-Produkte existieren. Diese Diskrepanz zwischen der Kompostierungsdauer und dem ungewöhnlich hohen Stickstoffgehalt könnte durch die Bepflanzung der Mieten während der Nachreifebehandlung erklärt werden. Die biologische Stickstofffixierung von freilebenden Mikroorganismen und Organismen in Symbiose mit Pflanzen können den atmosphärischen Stickstoff während der Nachreifebehandlung binden (McNeill & Unkovich, 2007). Dieser Erklärungsansatz entspricht dem Erklärungsmodell für die Auswirkungen der BioHu von Eisenbach und Eisenbach et al (2022; 2018). Hauert (2012) schreibt, dass im Humus langsam verfügbarer Stickstoff gespeichert werden kann. Somit könnte ein höherer Stickstoffgehalt auf einen höheren Humusgehalt in der BioHu hinweisen. Als Alternative zu diesem Erklärungsansatz für den Stickstoffgehalt der BioHu wird von Zhao et al. (2020) das C:N Verhältnis als weiterer Hauptverlustfaktor von Stickstoff aufgeführt. Optimal für die Kompostierung ist ein C:N Verhältnis von 25 bis 35. Ausserhalb dieses Spektrums kommt es zu Stickstoffverlusten. Um dieses optimale Verhältnis zu erreichen, ist eine Mischung von organischen Materialien erforderlich. Ho et al. (2022) geben an, dass das C:N Verhältnis während der Kompostierung um etwa das Dreifache des Ausgangswertes sinkt. Demnach bewegt sich das C:N Verhältnis des Ausgangsmaterials der BioHu um ein Spektrum zwischen 24 und 36. Anhand dieser Hochrechnung scheint das C:N Verhältnis des Ausgangsmaterial im optimalen Bereich zu liegen. Ein hoher Stickstoffgehalt in der BioHu lässt sich dadurch schlussfolgern. Da dies jedoch nur eine Hochrechnung ist, müssten die C:N Verhältnisse der Ausgangsmaterialien noch gemessen werden.

## 5.2 Nitratauswaschung

Die Resultate haben ergeben, dass sich die Auswaschung von Nitrat zwischen der BioHu und dem konventionellen Kompost unterscheiden. Die Auswaschung aus dem konventionellen Kompost war signifikant höher als die Nitratauswaschung aus der BioHu. Vorangestellt ist zu erwähnen, dass obwohl nicht deionisiertes Wasser bei dem Auswaschungsversuch verwendet wurde, dies keine Auswirkung auf die Nitratmessungen hatte. Dies ist damit zu begründen, dass sogar nach der Perkolatation durch Substrate in dem Drainwasser teilweise Werte unter dem messbaren Bereich verzeichnet wurden.

### Substrateinflüsse

Bei der Humuszahl, Corg und TIC wurde kein Unterschied festgestellt zwischen den Substraten. Daher wird davon ausgegangen, dass diese Eigenschaften der Substrate vermutlich keinen Einfluss auf die signifikant höhere Nitratauswaschung aus dem Neubauerkompost genommen haben. Allerdings liegt die Abweichung innerhalb der Replikate der CHN- und Corg-Messungen teilweise über dem akzeptablen Wert. Möglicherweise können diese Abweichungen einem mangelhaften Mahlverfahren zugeordnet werden. Üblicherweise wird die Mahlung mit Kugelmühlen durchgeführt. Die Mahlung mittels der Kaffeemühle, die in dieser Arbeit verwendet wurde, führte nicht zu der erforderlichen Homogenisierung der Proben. Um Corg und TIC abschliessend als Faktoren für die Nitratauswaschung auszuschliessen, müsste eine Mahlung mittels Kugelmühlen durchgeführt werden. Dass sich die Humuszahl zwischen den Substraten nicht unterscheidet, war nicht zu erwarten. Die BH20 ist deutlich länger gereift als die BH1 und der Neubauerkompost, was auf eine tiefere Humuszahl deuten kann gemäss Kupper & Fuchs (2007). Eine höhere Anzahl an Wiederholungen hätte unter Umständen zu einer besseren statistischen Aussagekraft und Verlässlichkeit geführt und zudem die Identifikation von Ausreissern ermöglicht. Unter den bestehenden Versuchsbedingungen ist die Stickstoffrückhaltung der BioHu nicht auf die Huminstoffe zurückzuführen, die in diesem Rahmen von der Humuszahl und dem Corg charakterisiert werden können (Ho et al., 2022; Zavarzina et al., 2021). Jedoch unterscheiden sich weder die Humuszahl noch der Corg der BioHu und dem Neubauerkompost signifikant.

Bei der Betrachtung der C:N-Verhältnisse der Substrate fällt auf, dass alle ein kleineres Verhältnis als 25 aufweisen, wobei das C:N-Verhältnis von 19 vom Neubauerkompost signifikant höher ist als die Verhältnisse der BioHu. C:N-Verhältnisse von unter 25 führen gemäss Hauert (2012) zur Stickstoffmineralisierung. Zudem sind die Mikroorganismen bei einem solchen Verhältnis mit Stickstoff gesättigt (Ho et al., 2022). Diese Sättigung der Mikroorganismen in Kombination mit einer Mineralisierung von Stickstoff kann unter anderem die Stickstoffverluste aus den Substraten erklären. Jedoch liefert dies keinen Erklärungsansatz für die Unterschiede der Nitratauswaschung zwischen den Substraten.

Die Betrachtung des pH-Wertes könnte einen Erklärungsansatz liefern für die unterschiedliche Nitratauswaschung zwischen den BioHu und dem Neubauerkompost. Beispielsweise haben Wang et al. (2019) eine höhere Nitratauswaschung gemessen, wenn der pH-Wert  $< 7$  war. Der Neubauerkompost ist der einzige Kompost, bei welchem der pH-Wert unter 7 liegt. Zhao et al. (2020) haben den Bereichen von 5,5-7,0 die geringste Stickstoffauswaschung zugeordnet, weil die mikrobielle Masse in diesem Bereich am aktivsten war und als Stickstoff-Senke fungierte. Wenn die These der Stickstoffsättigung der Mikroorganismen von Ho et al. (2022) zutrifft, könnte dies erklären, weshalb trotz des für die

mikrobielle Biomasse optimalen pH-Wertes die Stickstoffauswaschung nicht reduziert war im Neubauerkompost.

Auffallend ist, dass kein Unterschied zwischen dem totalen Stickstoffgehalt in den Substraten vor und nach dem Anbauversuch gemessen werden konnte. Obwohl Nitrat ausgewaschen wurde und die Pflanzen Stickstoff aus dem Substrat aufgenommen haben. Eine Volatilisation des Stickstoffs wird ausgeschlossen, da der pH der Substrate unter 8 liegt. Unter diesem Wert kann Ammoniak zu Ammonium umgewandelt werden. Die Denitrifikation als ein weiterer Stickstoffverlustfluss kann nicht ausgeschlossen werden. Die Denitrifikation findet statt unter anaeroben Bedingungen, welche vermutlich teilweise vorhanden waren aufgrund des Bewässerungsmanagements siehe Anhang 4 gravimetrische WHK der Töpfe (Nevins et al., 2020). Eine vollständige Darstellung der Stickstoffflüsse ist in dieser Arbeit nicht möglich, da lediglich die Nitratauswaschung und der totale Stickstoffgehalt quantifiziert wurden, wobei auch diese beiden Faktoren nicht ganzheitlich untersucht wurden. Beispielweise wurden die Verluste von gelöstem organischem Stickstoff und von Ammonium nicht berücksichtigt. Hartz et al. (2000) schreiben, dass von Komposten aus Pflanzenrückständen während 16 Wochen weniger als 1% des organischen Stickstoffes mineralisiert wurden. Diese langsame Netto-Mineralisierung der Komposte ist womöglich ein Mitgrund, dass kein Unterschied im totalen Stickstoffgehalt ausgemacht werden konnte. Und schliesslich muss auch hier auf die geringe Stichprobenanzahl und die ungenügende Homogenisierung der Proben verwiesen werden. Auch wäre es wichtig zu wissen, wie die molekulare Komposition der organischen Masse ist. Laut Xu et al. (2020) wird die Stickstofftransformation im Substrat durch die molekulare Komposition beeinflusst. Das Erklärungsmodell von Eisenbach und Eisenbach et al. (2022; 2019) könnte durch eine solche Analyse nachgewiesen werden.

### **Weitere Agronomische Einflüsse**

Der minimale Wassergehalt der BH1 lag bei 75% der maximalen gravimetrischen Wasserhaltekapazität. Bei der BH20 war der minimale Wassergehalt 69% und beim Neubauerkompost 49% der maximalen gravimetrischen Wasserhaltekapazität. Zudem wurden für die Auswaschungsversuche zusätzliche Wasserzugaben verabreicht, die an der Wassermenge von Starkniederschlägen orientiert war.

Die Bewässerung wurde von anderen Studien geplant durchgeführt. In diesem Versuchsaufbau fand die Bewässerung händisch statt. So haben Liu et al. (2014) den Wassergehalt auf eine Wasserhaltekapazität von 50-70% der Substrate eingestellt. In der Untersuchung von Bruin et al. (2010) wurde die Bewässerung gestoppt, wenn der Boden eine Feldkapazität von  $0,18\text{m}^3/\text{m}^3$  erreichte und Borchard et al. (2012) hielten den Wassergehalt bei 60% der maximalen Wasserhaltekapazität mit täglicher Wasserzugabe und gravimetrischen Messung. Dieser Vergleich zeigt, dass die Bewässerung in diesem Experiment suboptimal war, wodurch die Nitratauswaschung begünstigt wurde. An den Tagen der Auswaschungsversuche wurde den Kulturen das 40- bis 60-fache des täglichen Wasserbedarfs verabreicht. Es wird angenommen, dass aufgrund der morgendlichen und abendlichen Wassergabe auch an den sonstigen Tagen der Wasserbedarf der Gurken von maximal 10 ml pro Topf und Salat von maximal 7 ml pro Topf sowie den Wasserbedarf der Gerste weitaus überschritten wurde. Diese übermässige Zugabe für den tatsächlichen Bedarf hat die Nitratauswaschung weiter befördert (J. Xu et al., 2020).

Die Gurken haben im Vergleich mit den anderen angebauten Kulturen den höchsten Stickstoffbedarf, was sich in der Nitratauswaschung widerspiegelte. Die Kulturen Gurke und Gerste veranschaulichen

die negative Beziehung zwischen der Stickstoffaufnahme und der Auswaschung, die von Xu et al. (2020) erwähnt wurde. Demgegenüber steht die Nitratauswaschung aus den Substraten, in denen Salat angepflanzt war. Im Drainwasser des Salats zeigte sich die höchste Nitratauswaschung während der Stickstoffbedarf von Salat den Stickstoffbedarf der Gerste übersteigt. Aufgrund der Wurzelbonitur des Salates ist anzunehmen, dass ein relevanter Faktor für die hohe Nitratauswaschung eine geringe Stickstoffaufnahme war. Nebst diesem Faktor sprechen abiotische Faktoren wie die extremen Temperaturen im Gewächshaus für eine beeinträchtigte Stickstoffaufnahme der Kulturen (Sajjad et al., 2021).

### **Umwelteinflüsse**

Die gemessenen Temperaturen von bis zu 43°C (Ø 23.19°C) im Gewächshaus haben möglicherweise den Wachstumsverlauf der Kulturen gehemmt. Eine geringere Nitratauswaschung wie bei Bruin et al. (2010) kann deshalb nicht vorausgesetzt werden. Wahrscheinlicher ist, dass die hohen Temperaturen die Mineralisation beschleunigten, was die Nitratauswaschung erhöhte (Jabloun et al., 2015).

Lv et al. (2019) setze die ausgewaschene Menge an Nitrat in Kontext zu den Grenzwerten der WHO und der US-EPA (Environmental Protection Agency) für Nitratgehalt im Trinkwasser, die 50 mg NO<sub>3</sub>- / L respektive 10 mg NO<sub>3</sub>- / L betragen. Ausser unter der Gurke überschritten die Nitratmessungen die Grenzwerte. Die hohen Temperaturen in Kombination mit dem engen C:N-Verhältnis haben die Mineralisation gefördert, was eine Nitratauswaschung begünstigen konnte. Zudem war die Bewässerung suboptimal, was die Auswaschung weiter gefördert hat. Die hohen Temperaturen haben vermutlich zu Wachstumsstress bei den Pflanzen geführt. Auch die hohen Feuchtigkeitsgehalte der Substrate haben womöglich die Aufnahme von Stickstoff beeinträchtigt, indem sich beispielsweise Pilze entwickeln konnten. Ein weiterer Grund für die hohen Überschreitungen der Grenzwerte kann die N-Gabe sein. Schubert (2023) hat berechnet, dass in einem Topf der BioHu etwa 40g N vorhanden sind, was den Bedarf aller Kulturen um ein Vielfaches übersteigt (siehe Anhang 5). Die mangelnde Synchronisation der Stickstoffdüngung und dem Bedarf, die von einigen Autor:innen (Lv et al., 2019; Reimer et al., 2023) erwähnt wurde, scheint in diesem Versuch ebenfalls eine Hauptursache für die Nitratauswaschung zu sein.

### **Fazit Nitratauswaschung**

Abschliessend scheinen in dieser Analyse die Kulturen einen höheren Einfluss auf die Nitratauswaschung gehabt zu haben als die Substrate, wenn die Spannweite der gemessenen Nitratgehalte betrachtet wird. Dennoch schneiden die BioHu trotz begünstigter Faktoren für die Nitratauswaschung bezüglich der Nitratauswaschung besser ab als der Neubauerkompost. Dies deutet darauf hin, dass die Auswaschungsgefährdung von Nitrat aus der BioHu geringer ist im Vergleich mit dem Kompostsubstrat aus der Schweiz. Ob diese Ergebnisse mit der Nährstoffspeicherfähigkeit der BioHu aufgrund ihrer angenommenen Gitterstruktur Zusammenhängen kann in diesem Rahmen nicht beantwortet werden.

## 5.3 Unterschiede im Pflanzenwachstum

### Gerste

Bezüglich der Keimfähigkeit gab es keine Unterschiede zwischen den Substraten. Sie lag bei allen Substraten im Bereich der Mindestkeimfähigkeit. Im Wachstum wie in der Entwicklung haben sich Unterschiede ergeben zwischen den BioHu und dem NB. So wuchsen die Gersten in der BH20 am wenigsten hoch. Die Pflanzenmasseerträge in der BH20 waren auch am kleinsten. Dies widerspricht, der Annahme von Eisenbach (2019), dass die Pflanzenmasseerträge mit fortschreitendem Nachreifeprozess steigen. Entweder könnte dies darauf zurückzuführen sein, dass zu wenige vorkristallinen Gitterstrukturen vorhanden waren, oder könnte auch auf eine Absenz von *Azotobacter* deuten. Allerdings schnitt die BH20 mit einem höheren Tausendkorngewicht ab als die BH1. Folglich kann der geringe Trockensubstanzgehalt der BH20 ebenso damit begründet werden, dass die Gersten im BH20 am weitesten ausgereift waren. Das durchschnittliche BBCH Stadium vor der Ernte war bei der BH20 am höchsten ( $\bar{\text{BBCH}}$ : 74.7). Diese Begründung beruht darauf, dass ab dem BBCH Stadium 73 die Trockensubstanzgehalte der Gesamtpflanze sinken. Der Trockensubstanz-Gehalt der Gerste im NB-Substrat war zum Termin der Ernte noch nicht richtlinienkonform mit den durchschnittlichen 49.3% (Bundessortenamt, 2016). Die Kulturdauer der Sommergerste dauert etwa 124-131 Tage (Amelung et al., 2018), um die Entwicklung der Neubauergerste abschliessend zu beurteilen, hätte sie vermutlich noch länger stehengelassen werden müssen, beziehungsweise zum richtigen Zeitpunkt zwischen Mitte März bis Anfang April ausgesät werden. Von Morozov et al. (2022) wurden TKG im Bereich von 35 bis 50 Gramm gemessen. Die Sorten, die 50 Gramm erreichten in ihrer Studie, besaßen hohe Stressresistenzen und waren auf das Anbaugbiet angepasst. Das TKG in den Substraten BH20 und NB lag in diesem Bereich, wobei eine nicht-signifikante Tendenz besteht, dass die BH20-Gerste besser abgeschlossen hat als die NB-Gerste. Das mittlere TKG der BH1 lag unter 35 Gramm ( $\bar{\text{TKG}}$ :  $33.7 \pm 4.16$ ) was möglicherweise an dem hohen Beikraut- und Blattlausdruck in der BH1 liegen kann, der den Ernteertrag beeinträchtigt hat (Prashant et al., 2023; „Weeds of Farm Crops“, 2023). Generell war in den BioHu Beikraut vorzufinden und im NB-Substrat kaum. Dass die hohe Beikrautpräsenz mit einer mangelnden Hygienisierung der BioHu während dem Kompostierungsprozess zu tun hat, wird bezweifelt. Wahrscheinlicher ist, dass während dem Veredelungsprozess der BioHu Samen in das Substrat gelangten. Abschliessend sind der Ertrag und die Entwicklung der Gerste in den BioHu offenbar auf höherem Niveau als im Neubauerkompost. Denkbar ist, dass die Ressourcen im Neubauerkompost hauptsächlich für das Höhenwachstum investiert wurden. Auch zu erwähnen ist der Befallsdruck durch Frassschaden von Raupen, der bei dem NB-Verfahren höher war als bei der BH20. Die durchschnittliche Wuchshöhe aller Verfahren von 57.7 - 63.6 Centimeter könnte darauf hindeuten, dass das Zusammenspiel zwischen den Ansprüchen der Gerste und den Umwelt- beziehungsweise agronomischen Faktoren suboptimal war (Atwell et al., 1999). Womöglich hängt die allgemein geringe Wuchshöhe in diesem Versuch mit dem eingeschränkten Wurzelbereich zusammen (Kawaletz et al., 2014; Poorter et al., 2012). Ein anderer Grund dafür wäre der Befall von Schädlingen und einer Krankheit. In diesem Experiment wurden keine weiteren Schritte unternommen, um das vorliegende Krankheitssymptom zu klassifizieren. Die Klassifizierung der Gerstenkrankheit hätte gegebenenfalls zusätzliche Erkenntnisse über die Unterschiede zwischen den Substraten ermöglicht.

## Diskussion

Anzuführen ist die Entwicklung der BBCH-Stadien nach dem 23.08.23. Bei den wenigsten entwickelten Gerstenstadien sinkt scheinbar das Entwicklungsstadium. Dies resultiert aus dem Zwiewuchs, der Neigung nach Abschluss der eigentlichen Bestockung noch neue Seitentriebe auszubilden (Bundessortenamt, 2016).

### Gurken

Der Keimerfolg der Gurken der BH20 liegt etwas unter dem zu erwartenden Bereich. Gemäss Brenni-cke und Schopfer (2010) werden Samen an der Keimung gehindert wegen fehlendem Wasser, Sauerstoff oder ungünstigen Temperaturen. Es wird davon ausgegangen, dass die Temperaturbedingungen für alle Verfahren gleich waren. Einerseits kann die WHK der BH20 eine Rolle spielen, die im Vergleich zu den anderen Substraten am geringsten ist. Womöglich fehlte gewissen Samen Wasser. Jedoch war die Wasserhaltekapazität jeweils hoch, sodass die Gurken von *Phytophthora* spp. befallen wurden, deshalb kommt eine andere These auch in Frage. Die These lautet, dass aufgrund des geringen WHK und der geringen Porosität der BH20 im Vergleich mit den anderen beiden Substraten teilweise zu wenig Sauerstoff vorhanden war für die Keimung.

Die totale Trockenmasse und die Wachstumshöhe im Substrat NB waren am höchsten. Demnach war der Pflanzenmasseertrag in der NB-Wiederholung am höchsten. Laut Yang et al. (2023) steigen die Gurkenerträge bei einem höheren Anteil an pflanzenverfügbaren Nährstoffen sowie bei einer gesteigerten Mineralisierungsrate. Im Neubauersubstrat ist am meisten Nitrat ausgewaschen worden, was auch auf einen höheren Anteil an pflanzenverfügbarem Anteil an Stickstoff deuten kann. Ausserdem konnten Yang et al. (2023) bei besseren Wasserrückhaltefähigkeiten signifikant höhere Erträge messen. Das Neubauersubstrat hat die höchste Wasserhaltekapazität. Schubert (2023) hat vermutet, dass Immobilisierung des Stickstoffes in der BioHu aufgrund der molekularen Komposition beziehungsweise Abbaubarkeit von Kohlenstoff und Stickstoff beruht. Allerdings wurden bei Schubert (2023) wie in diesem Versuch keine Analyse der Kohlenstoff und Stickstoffbindungsstrukturen durchgeführt. Als weiterer Grund für eine fehlende Nährstoffversorgung in der BioHu führt Schubert (2023) an, dass die symbiontischen Mechanismen nicht greifen konnten. Aufgrund der Lagerung des Substrats in Plastiksäcken, wurde die Stickstoffbereitstellung über die Bakterien oder Mykorrhizen inaktiviert. Ein weiterer Faktor, der die Mykorrhizierung beeinflussen könnte, ist der Anbau in Töpfen, der angeblich die Mykorrhizakolonisierung beeinträchtigt (Poorter et al., 2012).

In diesem Versuch wurde die BioHu als reines Bodensubstrat verwendet und trotz hohem Düngungs-niveau schnitt der Pflanzenmasseertrag der Gurke schlechter ab als der Pflanzenmasseertrag des Neubau-erkompost. Dies steht im Gegensatz zu den Ergebnissen von Schubert und Eisenbach et al. (2023; 2018 und 2019), bei welchen die BioHu als reines Bodensubstrat verwendet wurde. Jedoch sind die geringeren Pflanzenmasseerträge in Übereinstimmung mit den Ergebnissen von Schubert (2023) als die BioHu zum Zweck der Düngung eingesetzt wurde.

### Salat

Trotz der hohen Temperaturen von bis zu 43°C wurde die Keimung des Salats nicht massgeblich be-einträchtigt. Jedoch war auch hier die Keimungsrate der BH20 am geringsten, möglicherweise aufgrund der Wasserhaltekapazität, der geringen Porosität oder der hohen Dichte des Substrates im Vergleich mit

den anderen beiden Substraten oder einer Wechselwirkung dieser Faktoren (Alves & Cardoso, 2023; Campbell et al., 2022; Yan & Chen, 2020). Die BH1 produzierte am meisten absolute Trockenmasse. Dies könnte auf eine hohe Stickstoffmenge im Substrat hindeuten (N. Wang et al., 2021) und stimmt überein mit der im Vergleich zu den anderen Substraten hohen Stickstoffmenge, die sich in der Substratanalyse aus der CHN-Messung ergeben hat. Allerdings wurde bei der Nitratmessung vor dem Anbauversuch in der BH1 am wenigsten Nitrat gemessen. Dies könnte mit einer Mineralisierung des Stickstoffes während der Kulturdauer geklärt werden. Wenn lediglich die Trockenmasse und das Längenwachstum betrachtet werden, scheint die BH1 die höchste Effizienz zu besitzen als Dünger (Szulc et al., 2021). Wenn hingegen der biotische Faktor der Schädlinge hinzugezogen wird, ergeben sich andere Interpretationsmöglichkeiten. Die geringen Biomasseerträge der BH20 und NB könnten durch deren Nähe zum Gewächshausfenster begünstigt worden sein, weil dies womöglich die Eintrittspforte für Schädlinge war. Das NB-Substrat weist einen hohen EC-Gehalt auf, was ein zusätzlicher Faktor ist, der die Biomasseerträge mindern kann. Eine Umrechnung nach der Methode von Baier et al. (2022) zeigt, dass der EC-Gehalt des NB-Substrates nach der Substratmethode (3.38 mS/cm) die obere Grenze der Salzverträglichkeit von Salaten (1.2 mS/cm) überschreitet. Trotz des um Nährstoffe konkurrierenden Beikrauts in der BH1, schnitt die BH1 insgesamt am besten ab. Der beträchtliche Schädlingsdruck verlangt nach einem weiteren Vergleich der BioHu mit Kompost.

### **Pflanzengesundheit**

Die Schadbilder traten unabhängig vom Substrat in allen Verfahren auf. Aufgrund der starken agronomischen Einflüsse, insbesondere der suboptimalen Bewässerung und den späten Aussaatpunkten, sind keine klaren Aussagen möglich. Gemäss Freyer (2016) besteht ein Zusammenhang zwischen steigenden phytopathologischen Problemen mit steigender Stickstoffverfügbarkeit. Schubert (2023) schreibt, dass in der BioHu hohe Stickstoffmengen vorhanden sind. Ungeachtet dessen hat die visuelle Bonitur eher einen Stickstoffmangel vermuten lassen in den BioHu. Eine Möglichkeit für den *Phytium* spp. Befall der BioHu besteht in der im Vergleich zum Kompost tieferen Wasserhaltekapazität und geringeren Porosität. Es wird angenommen, dass in der BioHu bei gleicher Wassergabe wie bei NB der Porenraum bereits gesättigt ist. Diese höhere Sättigung mit Wasser begünstigt das Klima für einen Pilz.

### **Stickstoffversorgung**

Der Chlorophyllindex in Salat und die Färbung des Salates sprechen nicht dafür, dass ein Unterschied in der Stickstoffversorgung vorhanden ist. Der Biomasseertrag von BH1 ist ein Indiz für eine höhere Stickstoffversorgung (Szulc et al., 2021; N. Wang et al., 2021), wobei dies relativiert werden muss mit dem ertragsbildenden Schaden in den anderen Substraten. Der Chlorophyllindex der Gerste zeigt ein Bild, bei welchem NB die höchste Stickstoffversorgung gewährleistet. Da jedoch die Reifeentwicklung der Gersten unterschiedlich fortgeschritten war zum Zeitpunkt der Messung, muss auch dies relativiert werden. Schliesslich ergibt der Chlorophyllindex der Gurken, dass in der BH1 am meisten Stickstoff für die Pflanzen zur Verfügung steht (Saleh et al., 2019; Wani et al., 2022; Zhang et al., 2022). Insgesamt war die Wuchshöhe aller Kulturen eher niedrig, und der Ertrag der Gurken entsprach nur selten den schweizerischen Qualitätsstandards für Nostranogurken, was wiederum als allgemeines Mangelsymptom von Stickstoff interpretiert werden kann.

### **Wurzelbonitur und Topfversuch**

Eine gute Stickstoffversorgung fördert ein starkes Wurzelwachstum, was Voraussetzung für die Aufnahme anderer Nährstoffe und das Wachstum und die Entwicklung der gesamten Pflanze ist (Freyer, 2016). Bei Bodentemperaturen über dem Optimum kann das Wurzelwachstum deutlich verringert werden (Amelung et al., 2018; Kawaletz et al., 2014). Dass das Wurzelwachstum aufgrund der Bodentemperatur eingeschränkt war, deckt sich jedoch nicht mit dem hohen Keimungserfolg der Salatsamen. Diese deutet darauf, dass die Temperatur unter 28°C lag, sonst wäre die Samenkeimung gehemmt gewesen. Hitzeschäden an den oberirdischen Pflanzenteilen treten laut Amelung et al. (2018) in Europa bei Temperaturen über 40-45°C auf. Die BH20 zeigt die geringste Durchwurzelung, möglicherweise aufgrund der Substratdichte und der Porengrösse. Eine hohe Substratdichte kann die Durchwurzelung stören. Die Feststoffdichte der BH20 liegt im oberen Bereich der Lagerungsdichte von Sandböden, welche die höchste Lagerungsdichte unter den Böden haben. Nichtsdestotrotz haben sie höhere Durchwurzelungen als Lehm und Schluffböden. Ein weiterer Faktor, der die Durchwurzelung beeinflusst, ist die Porengrösse. Da der BioHu kein Ton zugesetzt wird gemäss der Lübke-Hildebrandt Methode, wodurch die Durchwurzelung erschwert wird, ist der Unterschied in der Durchwurzelung weniger wahrscheinlich auf die Feststoffdichte zurückzuführen (Amelung et al., 2018)

### **Fazit Pflanzenmasse**

Zwischen den verschiedenen Kulturen haben unterschiedliche Substrate die höchsten Pflanzenmasseerträge erreicht. Dies kann auf die Schadbilder, den Beikrautdruck, die Bewässerung, die Ansprüche der Kulturen und auch möglicherweise auf die Substrateigenschaften zurückgeführt werden. So war das TKG bei der Gerste im NB und der BH20 am höchsten, am meisten Trockensubstanz wurde von den Gurken im NB erzielt und der Salat aus BH1 wies die höchste Trockensubstanz auf. In der BH1 wurde der höchste Stickstoffgehalt mit der CHN-Analyse gemessen. Allerdings war der Nitratgehalt vor dem Anbau in der BH1 am kleinsten. Der Salatertrag spricht dafür, dass der Stickstoff mineralisiert werden konnte. Dass die BH1 mit den anderen beiden Kulturen ein geringeres Ertragsniveau erzielte, ist mit dem Befall von *Phytium* spp., dem Beikraut und den Befall durch Blattläuse zu erklären. Verantwortliche Substrateigenschaften können die Wasserhaltekapazität und die Porosität sein. Die BH20 hat bezüglich des Keimerfolgs beim Salat sowie auch bei der Gurke weniger gut abgeschnitten als die anderen beiden Substrate. Dies wurde mit der Porosität, der Dichte, der WHK und deren Zusammenspiel begründet. Trotz des ungünstigen EC-Wertes des NB für Salat und Gurken, hat der Kompost in zwei Kulturen den höchsten Biomasseertrag erreicht. Es wird vermutet, dass die Bewässerung äusserst unpassend für die BioHu war. Der Einfluss der substratexternen abiotischen wie biotischen Faktoren prägen die Ergebnisse zum Pflanzenwachstum deutlich. Der Ertrag in der BioHu scheint unter Wasserstress beeinträchtigt zu werden.

Die aufgeworfene Frage von Schubert (2023) bezüglich der Abbaubarkeit der Kohlenstoff und Stickstofffraktionen und deren Zusammenhang mit der Pflanzenversorgung bleibt offen und erfordert noch Untersuchungen, um abschliessend die Gitterstruktur sowie die Stickstoffbereitstellung aus dem Substrat zu klären.

## 5.4 CO<sub>2</sub>-Produktion während dem Abbauersuch

Die Tatsache, dass das Plateau des vollständigen biologischen Abbaus noch nicht erreicht wurde, hängt wahrscheinlich mit der Versuchsdauer zusammen. Die Prüfdauer für die aerobe Bioabbaubarkeit endet mit dem Erreichen des Plateaus des biologischen Abbaus. Bei Kompost wird das Plateau spätestens nach 12 Monaten bei einer Temperatur von 25°C erreicht. In diesem Versuch herrschte eine Temperatur von 22°C und die Versuchsdauer betrug nur 4 Monate. Damit der Kompost für den Abbauersuch geeignet ist, sollte der pH-Wert zwischen 7.0 und 9.0 liegen. Der Neubauerkompost hat einen pH-Wert von 6.88, was außerhalb dieses Bereichs liegt. Die Ergebnisse von NB entsprechen aufgrund des pH-Wertes nicht den Anforderungen für die Validierung (Fachstelle Umweltbiotechnologie, 2022).

Werden die Schottflaschen nicht ausreichend lange temperiert, so wird bereits beim Versuchsbeginn einer neuen Messperiode eine Druckdifferenz gemessen, was in Abbildung 17 durch die von der geglätteten Kurve abweichenden grauen Punkte ersichtlich ist. Hinsichtlich des totalen Kohlenstoffgehalts (C) wies die BH20 einen geringeren Wert auf als die BH1 und NB. Als weitere Einschränkung ist zu berücksichtigen, dass das Wasserrückhaltevermögen mit der Faustprobe eingestellt wurde.

Trotz der Vorgaben der Fachstelle Umweltbiotechnologie (2022) wird davon ausgegangen, dass die Ergebnisse aufgrund der Ergebnisse von Reth et al. (2005) valide sind. In ihrer Studie stellten sie eine positive Korrelation zwischen pH-Wert und CO<sub>2</sub>-Emissionen fest. Im Bereich von pH 3 bis pH 8 wurde ein linearer Anstieg der CO<sub>2</sub>-Emissionen festgestellt. Da der pH-Wert von NB am niedrigsten ist und gleichzeitig in NB die höchsten CO<sub>2</sub>-Emissionen gemessen wurden, kann davon ausgegangen werden, dass bei einem pH-Wert von NB im angegebenen Bereich die CO<sub>2</sub>-Produktion noch höher gewesen wäre. Dies würde die bestehenden Ergebnisse bestätigen.

Die aerobe biologische Abbaubarkeit von BH20 scheint im Vergleich zu BH1 und NB am niedrigsten zu sein, so dass es sich wahrscheinlich um das stabilste Kompostsubstrat handelt. BH20 hat daher den geringsten Anteil an leicht verfügbarem organischem Kohlenstoff. NB hatte den höchsten Sauerstoffbedarf und damit die signifikant höchste CO<sub>2</sub>-Produktion. NB war möglicherweise auch das Substrat mit der geringsten Stabilität der organischen Substanz (Mahapatra et al. 2022). Die Bindung der organischen Substanz an Mineralien kann nicht als Erklärungsmechanismus herangezogen werden, da bei BioHu keine mineralischen Komponenten zugesetzt werden. Ein Erklärungsmodell könnte POM (partikuläre organische Masse) sein. POM ist nicht durch mineralische Verbindungen vor dem Abbau durch Mikroorganismen geschützt, aber der Kohlenstoff in BioHu kann durch andere Mechanismen für den Abbau durch Mikroorganismen unzugänglich sein. Diese Erklärungsmöglichkeiten umfassen die räumliche Unzugänglichkeit und die energetische Unzugänglichkeit. Um die energetische Zugänglichkeit der BioHu zu testen, wird hier empfohlen, eine kalorimetrische Messung durchzuführen, um weitere Indizien für das Erklärungsmodell des Gittermodells der BioHu zu sammeln, das vermutlich der POM-Theorie entspricht (Derrien et al., 2023). Kakabouki et al. (2021) beobachteten, dass bei der Zugabe von Düngern der Dünger mit dem höchsten Gehalt an organischer Substanz die höchste mikrobielle Aktivität aufwies. Die organische Substanz ist ein Milieu für die mikrobielle Aktivität. Die statistische Auswertung der Substratanalyse in diesem Versuchsrahmen ergab, dass sich der Gehalt an organischem Kohlenstoff zwischen den Substraten BH1, BH20 und NB nicht unterscheidet, so dass eine unterschiedliche mikrobielle Aktivität nicht zu erwarten gewesen wäre. In diesem Rahmen wurde jedoch nur die

mikrobielle Atmung des Düngemittels untersucht, ohne dass es dem Boden zugegeben wurde. Außerdem war die Streuung der Messungen relativ hoch. Die Verbrennungsanalysen des Kohlenstoffs können jedoch nicht zwischen leicht zersetzbarem und persistentem Kohlenstoff unterscheiden. Hier muss auch die Persistenz der organischen Substanz und damit der Reifegrad des Kompostes berücksichtigt werden. So nimmt nach Kupper und Fuchs (2007) die quantitative biologische Aktivität mit fortschreitender Kompostierung ab, was auch in diesem Rahmen beobachtet werden konnte.

Es wäre interessant gewesen, den Kohlenstoffgehalt der Kompostsubstrate vor und nach dem Versuch zu messen, um eine Kohlenstoffbilanz zu erstellen und eventuelle Kohlenstoffverluste aus dem System zu beobachten. Dies hätte möglicherweise Rückschlüsse auf die Persistenz des Kohlenstoffs erlaubt.

Darüber hinaus wird eine Analyse der mikrobiellen Gemeinschaft vorgeschlagen, um festzustellen, ob die für einen Abbauprozess notwendigen Bakterien bzw. Abbaugene im Substrat vorhanden und ggf. induziert sind.

Im Allgemeinen wurde in dieser Arbeit nicht auf die einzelnen mikrobiellen Gemeinschaften eingegangen, so dass z.B. eine erhöhte mikrobielle Aktivität gleichzeitig die Nitratauswaschung fördern und minimieren kann. Es liegt auf der Hand, dass dies in den meisten Fällen mit anderen Mechanismen zusammenhängt, aber es wird davon ausgegangen, dass durch eine eingehendere Analyse der mikrobiellen Gemeinschaften, die für die Nitratauswaschung und die Kohlenstoffbindung verantwortlich sind, spezifischere Erkenntnisse gewonnen werden können.

### **Fazit CO<sub>2</sub>-Produktion**

Die Untersuchung des Abbauverhaltens von BioHu im Vergleich zu NB deutet darauf hin, dass BH20 das stabilere Kompostsubstrat sein könnte, da es im Vergleich zu BH1 und NB die niedrigste aerobe biologische Abbaubarkeit aufweist. Dies wird durch die geringere CO<sub>2</sub>-Produktion von BH20 und die Tatsache, dass BH20 bekanntermaßen einen längeren Reifungsprozess hat, unterstützt. Ob die unterschiedliche CO<sub>2</sub>-Produktion von BH1 und NB mit einer unterschiedlichen Stabilität des Kohlenstoffs oder mit einer unterschiedlichen Dauer des Reifeprozesses zusammenhängt, kann nicht beantwortet werden, da die genaue Dauer der Kompostierung und Reifezeit unbekannt ist. Eine mögliche Erklärung für die unterschiedliche Stabilität der Substrate könnte in der räumlichen und energetischen Unzugänglichkeit der organischen Substanz, insbesondere der partikulären organischen Masse (POM), liegen. Weitere Untersuchungen, wie z.B. kalorimetrische Messungen und eine Analyse der mikrobiellen Gemeinschaft, könnten dazu beitragen, diese Erklärung zu validieren.

## 6. Schlussfolgerung

BioHu kann Teil einer umweltverträglichen landwirtschaftlichen Praxis sein. Aufgrund ihrer potenziell hohen Ertragsleistung und der in diesem Versuch beobachteten vergleichsweise geringen Nitrat- und CO<sub>2</sub>-Emissionen kann die BioHu dazu beitragen, dass eine Landwirtschaft mit BioHu multifunktionale Leistungen erbringen kann. Darüber hinaus zeigt BH20 in Bezug auf die Kohlenstoffstabilität, dass es das stabilste Kompostsubstrat ist.

Hinsichtlich der Nitratauswaschung scheint eine an die Kultur angepasste Düngung einen größeren Einfluss auf die Verminderung der Nitratauswaschung zu haben als das Kompostsubstrat. Die Persistenz organischer Substanz variiert unter verschiedenen bodenklimatischen Bedingungen. Daher kann die Akkumulation organischer Substanz lokal unterschiedlich sein. Wenn das Konzept der Produktion von BioHu in anderen Regionen durchgeführt wird, kann es sein, dass die Produktion von BioHu nicht zu der gleichen organischen Masse führt. Die Kohlenstoffstabilität kann auch von den lokalen mikrobiellen Gemeinschaften abhängen.

Aufgrund der Unsicherheiten bezüglich der Mechanismen der Nährstoffbereitstellung für Pflanzen aus BioHu wird empfohlen, BioHu als reines Bodensubstrat zu verwenden und aufgrund der Untersuchungen von Schubert wird davon abgeraten, BioHu als Düngemittel mit geringen Düngemittelzusätzen zu verwenden. Auch aufgrund der Symbiosemechanismen, die für die Versorgung der Pflanze mit Nährstoffen essentiell sind, muss nach der Theorie von Eisenbach der gesamte Wurzelraum einer Pflanze Zugang zum Substrat haben. BioHu sollte nach Lagerung und Transport in Säcken wahrscheinlich vor der Verwendung reaktiviert werden oder nur in Kombination mit Kompost verwendet werden. Aufgrund der hohen Feststoffdichte im Vergleich zu Kompost ist der Einsatz von BioHu im Gartenbau nur in Töpfen sinnvoll, die nicht so häufig transportiert werden müssen. Außerdem ist insbesondere bei der Bewässerung darauf zu achten, dass diese auf BioHu abgestimmt ist. BioHu hat ein geringeres Wasserhaltevermögen als konventionell-biologischer Kompost aus der Schweiz. Wie die Erträge von BioHu auf Trockenstress reagieren, muss noch untersucht werden, insbesondere im Hinblick auf den Klimawandel.

Zusätzliche Untersuchungen, einschließlich kalorimetrischer Messungen und einer Analyse der mikrobiellen Gemeinschaft, werden empfohlen, um die genauen Mechanismen der Nährstoffbereitstellung und der Kohlenstoffstabilität zu klären.

## 7. Literaturverzeichnis

Abächerli, F., Baier, U., Berner, F., Bosshard, C., Fuchs, J., Galli, U., Gfeller, H., Leuenberger, R., Mayer, J., Pfaffen, P., Schleiss, K., Trachsel, K., & Wellinger, A. (2010). *Schweizerische Qualitätsrichtlinie 2010 der Branche für Kompost und Gärgut* (S. 40). Inspektoratskommission der Grüngut verarbeitenden Branche der Schweiz.

Albrecht, S., & International Assessment of Agricultural Knowledge, Science and Technology for Development (Hrsg.). (2009). *Weltagrarbericht: Synthesebericht*. Hamburg Univ. Press, Verl. der Staats- und Univ.-Bibliothek Hamburg Carl von Ossietzky.

Alves, A. U., & Cardoso, E. D. A. (2023). Influence of different conventional and alternative substrates on sombro seed germination. In *DEVELOPMENT AND ITS APPLICATIONS IN SCIENTIFIC KNOWLEDGE* (1. Aufl.). Seven Editora. <https://doi.org/10.56238/devopinterscie-123>

Amelung, W., Blume, H.-P., Fleige, H., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretzschmar, R., Stahr, K., & Wilke, B.-M. (2018). *Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55871-3>

*Anwendung von Nitratschnelltests mit Reflektometermessung* (Neue Düngeverordnung, S. 4). (2018). Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen.

ART, & ACW. (2008). *Methode pH-C* (Band 2 E2.056.d; Schweizerische Referenzmethoden der Forschungsanstalten Agroscope).

Atwell, B. J., Kriedemann, P. E., & Turnbull, C. G. N. (1999). *Plants in action: Adaptation in nature, performance in cultivation*. Macmillan Education Australia.

Averill, C., & Waring, B. (2018). Nitrogen limitation of decomposition and decay: How can it occur? *Global Change Biology*, 24(4), 1417–1427. <https://doi.org/10.1111/gcb.13980>

Ayilara, M., Olanrewaju, O., Babalola, O., & Odeyemi, O. (2020). Waste Management through Composting: Challenges and Potentials. *Sustainability*, 12(11), 4456. <https://doi.org/10.3390/su12114456>

Baier, U., Fuchs, J., Galli, U., Schleiss, K., Abächerli, F., Brogli, C., Flacher, A., Gisler, S., Herzog, C., Höggebe, M., Hürlimann, B., Poffet, J., & Wellinger, A. (2022). *PRODUKTE AUS VERGÄRUNG + KOMPOSTIERUNG - Branchenrichtlinien 2022—Update von Qualitätsrichtlinie 2010* (S. 32). Inspektoratskommission c/o Geschäftsstelle Verein Inspektorat der Kompostier- und Vergäranlagen der Schweiz.

Bakhshandeh, E., Abdellaoui, R., & Boughalleb, F. (2021). Modeling the effects of salt stress and temperature on seed germination of cucumber using halothermal time concept. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, 33(1), 79–93. <https://doi.org/10.1007/s40626-021-00196-z>

Barbieri, P., Pellerin, S., Seufert, V., Smith, L., Ramankutty, N., & Nesme, T. (2021). Global option space for organic agriculture is delimited by nitrogen availability. *Nature Food*, 2(5), 363–372. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00276-y>

*BIOCYCLIC PARK / Kalamata*. (o. J.). PANHELLENIC BIOCYCLIC VEGAN NETWORK. Abgerufen 21. November 2023, von <https://www.biocyclic-network.net/biocyclic-park--kalamata.html>

Bonzheim, A. (2014). *Die bio-vegane Landwirtschaft in Deutschland: Definition, Motive und Berautungsbedarf* [Bachelorarbeit]. Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde. [https://biozyklisch-vegan.de/wp-content/uploads/2017/11/Bonzheim\\_Bachelorarbeit\\_Bio-veganeLandwirtschaft.pdf](https://biozyklisch-vegan.de/wp-content/uploads/2017/11/Bonzheim_Bachelorarbeit_Bio-veganeLandwirtschaft.pdf)

- Borchard, N., Wolf, A., Laabs, V., Aeckersberg, R., Scherer, H. W., Moeller, A., & Amelung, W. (2012). Physical activation of biochar and its meaning for soil fertility and nutrient leaching – a greenhouse experiment. *Soil Use and Management*, 28(2), 177–184. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2012.00407.x>
- Brennicke, A., & Schopfer, P. (2010). *Pflanzenphysiologie*. Spektrum Akademischer Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-8274-2352-8>
- Bruin, A. J., Ball Coelho, B. R., Beyaert, R. P., Reeleder, R. D., Roy, R. C., & Capell, B. (2010). High value crops in coarse-textured soil and nitrate leaching—How risky is it? *Canadian Journal of Plant Science*, 90(4), 515–528. <https://doi.org/10.4141/CJPS10007>
- Brunner, P., & Ernst Frey, J. (o. J.). Thripse: Kleine Insekten – grosse Probleme. *Schweiz. z. Obst-Weinbau*, Nr. 24/02, 635–638.
- Bundesgesetz über die Landwirtschaft (Landwirtschaftsgesetz, LwG), SR 910.1 74 (1998).
- Bundesgütegemeinschaft & Kompost e.V. (Hrsg.). (2010). *Merkblatt Prüfzeugnisse—Erläuterung der RAL-Prüfzeugnisse und hinterlegter Qualitäts-/Prüfkriterien Kompost RAL-GZ 251*.
- Bundessortenamt. (2016). *Richtlinien für die Durchführung von landwirtschaftlichen Wertprüfungen und Sortenversuchen* (Geändertes Kapitel 4.1 Getreide (außer Mais und Sorghumhirse) der, S. 14). [https://www.bundessortenamt.de/bsa/media/Files/RILI\\_4\\_1\\_Getreide\\_201602.pdf](https://www.bundessortenamt.de/bsa/media/Files/RILI_4_1_Getreide_201602.pdf)
- Bürge, D. (2020a). *Bestimmung der Leitfähigkeit und des Salzgehalts im Wasserextrakt (1:10)* (Version 1.1; Schweizerische Referenzmethoden der Forschungsanstalten Agroscope, S. 3). Agroscope.
- Bürge, D. (2020b). *Bestimmung der Trockensubstanz und des Wassergehaltes in Düngerproben* (Version 1.3; Schweizerische Referenzmethoden der Forschungsanstalten Agroscope, S. 3). Agroscope.
- Bürge, D. (2020c). *Bestimmung des Volumengewichts von Düngern* (Schweizerische Referenzmethoden der Forschungsanstalten Agroscope Version 1.2; S. 3). Agroscope.
- Bürge, D. (2020d). *Probenahme von Kompost* (Version 1.2; Schweizerische Referenzmethoden der Forschungsanstalten Agroscope, S. 5). Agroscope.
- Bürge, D. (2020e). *Wasserextraktion (1:10) zur Bestimmung des Salzgehalts und der Farbtintensität* (Version 1.1; Schweizerische Referenzmethoden der Forschungsanstalten Agroscope, S. 3). Agroscope.
- Campbell, S. M., Pearson, B. J., & Marble, S. C. (2022). *Substrate Temperature and Seed Scarification on Germination Parameters of Butterfly Pea ( Clitoria ternatea )* [Preprint]. *Plant Biology*. <https://doi.org/10.1101/2022.02.17.480912>
- ChatGPT - OpenAI. (GPT-3.5). (2023). [Software]. <https://chat.openai.com/>
- DeepL Write: Ihr KI-Schreibassistent. (2023). <https://www.DeepL.com/write>
- Derrien, D., Barré, P., Basile-Doelsch, I., Cécillon, L., Chabbi, A., Crème, A., Fontaine, S., Henneron, L., Janot, N., Lashermes, G., Quénéa, K., Rees, F., & Dignac, M.-F. (2023). Current controversies on mechanisms controlling soil carbon storage: Implications for interactions with practitioners and policy-makers. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 43(1), 21. <https://doi.org/10.1007/s13593-023-00876-x>
- Dorgbetor, I. K., Ondrasek, G., Kutnjak, H., & Mikuš, O. (2022). What If the World Went Vegan? A Review of the Impact on Natural Resources, Climate Change, and Economies. *Agriculture*, 12(10), 1518. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101518>
- Eisenbach, J. (2022). *What is Biocyclic Humus Soil and its importance for the transition to a Biocyclic Vegan Food Production System* (S. 13). Förderkreis biozyklisch-veganer Anbau.

<https://wikifarmer.com/what-is-biocyclic-humus-soil-and-its-importance-for-the-transition-to-a-biocyclic-vegan-food-production-system/>

Eisenbach, L., Folina, A., Zisi, C., Roussis, I., Tabaxi, E., Papastylianou, P., Kakabouki, I., Efthimiadou, A., & Bilalis, D. (2018). *Effect of Biocyclic Humus Soil on Yield and Quality Parameters of Sweet Potato (Ipomoea batatas L.)*. LXI, 210–217.

Eisenbach, L., Folina, A., Zisi, C., Roussis, I., Tabaxi, E., Papastylianou, P., Kakabouki, I., Efthimiadou, A., & Bilalis, D. (2019). *Effect of Biocyclic Humus Soil on Yield and Quality Parameters of Processing Tomato (Lycopersicon esculentum Mill.)*. 76, 47–52. <https://doi.org/10.15835/buasvmcn-hort:2019.0001>

Engelhardt, H., Brüdern, M., & Deppe, L. (2020). *Nischeninnovationen in Europa zur Transformation des Ernährungssystems—NEuropa*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit.

Fachstelle Umweltbiotechnologie. (2022). *Bestimmung des aeroben biologischen Abbaus von Feststoffen in Boden oder Kompost* (Methodenbeschreibung Version 1.0.2; S. 27). ZHAW.

Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., Mueller, N. D., O’Connell, C., Ray, D. K., West, P. C., Balzer, C., Bennett, E. M., Carpenter, S. R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., ... Zaks, D. P. M. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478(7369), 337–342. <https://doi.org/10.1038/nature10452>

Förderkreis Biozyklisch-Veganer Anbau e.V. (o. J.). Biozyklische Humuserde. *Förderkreis Biozyklisch-Veganer Anbau e.V. - vegan und ökologisch ab Feld*. Abgerufen 18. November 2023, von <https://biozyklisch-vegan.org/biozyklische-humuserde/>

Forschungsbereich Biologische Landwirtschaft, Hutter, M., & Keller, H. (2022). *BESTIMMUNG FRISCH- UND TROCKENSUBSTANZ VON PFLANZEN* (Version 3; S. 1). ZHAW.

Forschungsgruppe Hortikultur, Mathis, A., & Hutter, M. (o. J.). *Schüttdichte, Porosität, Wasserkapazität—Bestimmung bei Substrateen (Mischungen oder Einzelkomponenten)* (S. 2) [Vorgehensprotokoll]. ZHAW.

Freyer, B. (Hrsg.). (2016). *Ökologischer Landbau: Grundlagen, Wissensstand und Herausforderungen* (1. Aufl.). utb GmbH. <https://doi.org/10.36198/9783838546391>

Fröhlich, M., Mayerl, J., Pieter, A., & Kemmler, W. (2020). *Einführung in die Methoden, Methodologie und Statistik im Sport*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-61039-8>

Fuchs, J., Galli, U., & Schleiss, K. (2010). *Aufbaukurs „Qualität der Endprodukten“* (4. überarbeitete Auflage; Ausbildung für die Mitarbeiter von Kompostier- und Vergärungsanlagen). educompost, Ausbildungsinstitut zur Verwertung organischer Stoffe.

*Gemeinschaftsarbeit der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft (BBA), des Bundesortenamtes (BSA) und des Industrieverbandes Agrar (IVA) unter Mitwirkung anderer Institutionen*. (2001). <https://llh.hessen.de/pflanze/pflanzenschutz/entwicklungsstadien-von-getreide/>

Goucher, L., Bruce, R., Cameron, D. D., Lenny Koh, S. C., & Horton, P. (2017). The environmental impact of fertilizer embodied in a wheat-to-bread supply chain. *Nature Plants*, 3(3), 17012. <https://doi.org/10.1038/nplants.2017.12>

Große-Brauckmann, E. (1973). Einfluß einer Standraumverengung auf das Wachstum von Hafer in Gefäßversuchen. *Zeitschrift Für Pflanzenernährung Und Bodenkunde*, 136(2), 97–103. <https://doi.org/10.1002/jpln.19731360202>

- Hartz, T. K., Mitchell, J. P., & Giannini, C. (2000). Nitrogen and Carbon Mineralization Dynamics of Manures and Composts. *HortScience*, 35(2), 209–212. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.35.2.209>
- Hauert, P. (2012). *Hauert—Das Wichtigste zur Düngung*. BIORGA.
- Hildebrandt, U. (2010). *VERFAHRENSBESCHREIBUNG der gelenkten KOMPOSTIERUNG nach Lübke*. Landmanagement United Research for Soil. [https://www.bioland.de/fileadmin/user\\_upload/Erzeuger/Fachinfos/Serviceseite/2010\\_05\\_Kompostierung\\_nach\\_Luebcke.pdf](https://www.bioland.de/fileadmin/user_upload/Erzeuger/Fachinfos/Serviceseite/2010_05_Kompostierung_nach_Luebcke.pdf)
- Ho, T. T. K., Tra, V. T., Le, T. H., Nguyen, N.-K.-Q., Tran, C.-S., Nguyen, P.-T., Vo, T.-D.-H., Thai, V.-N., & Bui, X.-T. (2022). Compost to improve sustainable soil cultivation and crop productivity. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 6, 100211. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100211>
- Holthausen, N., Locher, P., Basler, L., Pütz, M., & Bründl, M. (2013). *Risiken und Chancen des Klimawandels im Kanton Aargau* (S. 81).
- Holtz, Y. (2018). *The R Graph Gallery – Help and inspiration for R charts*. The R Graph Gallery. <https://r-graph-gallery.com/index.html>
- Houlton, B. Z., Almaraz, M., Aneja, V., Austin, A. T., Bai, E., Cassman, K. G., Compton, J. E., Davidson, E. A., Erisman, J. W., Galloway, J. N., Gu, B., Yao, G., Martinelli, L. A., Scow, K., Schlesinger, W. H., Tomich, T. P., Wang, C., & Zhang, X. (2019). A World of Cobenefits: Solving the Global Nitrogen Challenge. *Earth's Future*, 7(8), 865–872. <https://doi.org/10.1029/2019EF001222>
- Jabloun, M., Schelde, K., Tao, F., & Olesen, J. E. (2015). Effect of temperature and precipitation on nitrate leaching from organic cereal cropping systems in Denmark. *European Journal of Agronomy*, 62, 55–64. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.09.007>
- Jakobsen, S. T. (1996). Leaching of nutrients from pots with and without applied compost. *Resources, Conservation and Recycling*, 17(1), 1–11. [https://doi.org/10.1016/0921-3449\(96\)01069-5](https://doi.org/10.1016/0921-3449(96)01069-5)
- Kakabouki, I., Folina, A., Efthimiadou, A., Karydogianni, S., Zisi, C., Kouneli, V., Kapsalis, N., Katsenios, N., & Travlos, I. (2021). Evaluation of Processing Tomato Pomace after Composting on Soil Properties, Yield, and Quality of Processing Tomato in Greece. *Agronomy*, 11, 88. <https://doi.org/10.3390/agronomy111010088>
- Kawaletz, H., Mölder, I., Annighöfer, P., Terwei, A., Zerbe, S., & Ammer, C. (2014). Pot experiments with woody species – a review. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 87(4), 482–491. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpu017>
- Keerthi, M. M., Sharmili, K. S., Arun, A., & Govindhasamy, R. (2023). Emerging Weed Problems under Changing Climatic Condition: A Review. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(7), 559–574. <https://doi.org/10.9734/ijec/2023/v13i71908>
- Kramer, S. B., Reganold, J. P., Glover, J. D., Bohannon, B. J. M., & Mooney, H. A. (2006). Reduced nitrate leaching and enhanced denitrifier activity and efficiency in organically fertilized soils. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(12), 4522–4527. <https://doi.org/10.1073/pnas.0600359103>
- Krayer, P. (2021). *Modeling Environmental and Nutritional Impacts of Vegan Agriculture*. [Masterarbeit]. Zurich University of Applied Sciences (ZHAW).
- Kupper, T., & Fuchs, J. (2007). *Kompost und Gärgut in der Schweiz*. (0743; Umwelt-Wissen, S. 124). Bundesamt für Umwelt BAFU Bundesamt für Energie BFE Bundesamt für Landwirtschaft BLW Bau- direktion Zürich, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft AWEL.

- Liu, C.-W., Sung, Y., Chen, B.-C., & Lai, H.-Y. (2014). Effects of Nitrogen Fertilizers on the Growth and Nitrate Content of Lettuce (*Lactuca sativa* L.). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11(4), 4427–4440. <https://doi.org/10.3390/ijerph110404427>
- Location – Vegan-Farming.org. (2023). <http://www.vegan-farming.org/>
- Lustenberger, J., & Wanner, R. (2020). *TruSpec Makro Analyzer* (Version 2.0.0; Betrieb und Sicherheit). ZHAW.
- Lv, H., Lin, S., Wang, Y., Lian, X., Zhao, Y., Li, Y., Du, J., Wang, Z., Wang, J., & Butterbach-Bahl, K. (2019). Drip fertigation significantly reduces nitrogen leaching in solar greenhouse vegetable production system. *Environmental Pollution*, 245, 694–701. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.11.042>
- Mahapatra, S., Ali, Md. H., & Samal, K. (2022). Assessment of compost maturity-stability indices and recent development of composting bin. *Energy Nexus*, 6, 100062. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100062>
- Mann, S. (2020). Could We Stop Killing?—Exploring a Post-Lethal Vegan or Vegetarian Agriculture. *World*, 1(2), 124–134. <https://doi.org/10.3390/world1020010>
- Martínez-Blanco, J., Lazcano, C., Boldrin, A., Muñoz, P., Rieradevall, J., Møller, J., Antón, A., & Christensen, T. H. (2013). Assessing the Environmental Benefits of Compost Use-on-Land through an LCA Perspective. In E. Lichtfouse (Hrsg.), *Sustainable Agriculture Reviews* (Bd. 12, S. 255–318). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-5961-9\\_9](https://doi.org/10.1007/978-94-007-5961-9_9)
- McNeill, A., & Unkovich, M. (2007). The Nitrogen Cycle in Terrestrial Ecosystems. In P. Marschner & Z. Rengel (Hrsg.), *Nutrient Cycling in Terrestrial Ecosystems* (Bd. 10, S. 37–64). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-68027-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-540-68027-7_2)
- Morozov, N. A., Samsonov, I. V., & Pankratova, N. A. (2022). Estimation of spring barley adaptability to the aridity of the Stavropol Territory according to the trait ‘1000-grain weight’. *Grain Economy of Russia*, 4, 16–21. <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2022-82-4-16-21>
- Neuweiler, R. (2011). *Düngungsrichtlinien für den Gemüsebau* (S. 29). Forschungsanstalt Agroscope Changins-Wädenswil ACW.
- Nevins, C. J., Strauss, S. L., & Inglett, P. (2020). An Overview of Key Soil Nitrogen Cycling Transformations. *EDIS*, 2020(3). <https://doi.org/10.32473/edis-ss684-2020>
- Nitrat in Gemüse Reflektometrische Bestimmung nach Reduktion zu Nitrit und Umsetzung mit Griess-Reagenz* (S. 3). (2012). Merck KGaA.
- O’sullivan, O. S., Heskell, M. A., Reich, P. B., Tjoelker, M. G., Weerasinghe, L. K., Penillard, A., Zhu, L., Egerton, J. J. G., Bloomfield, K. J., Creek, D., Bahar, N. H. A., Griffin, K. L., Hurry, V., Meir, P., Turnbull, M. H., & Atkin, O. K. (2017). Thermal limits of leaf metabolism across biomes. *Global Change Biology*, 23(1), 209–223. <https://doi.org/10.1111/gcb.13477>
- Platen, H., & Wirtz, A. (2010). *Applikationsbericht Atmungsaktivität von Böden Standardprüfansatz* (Standardprüfansatz Nr. 2; Bestimmung der Atmungsaktivität von Böden und Feststoffen mit dem Messsystem OxiTop Control, S. 7). Fachhochschule Giessen Friedberg.
- Poore, J., & Nemecek, T. (2018). Reducing food’s environmental impacts through producers and consumers. *Science*, 360(6392), 987–992. <https://doi.org/10.1126/science.aaq0216>
- Poorter, H., Bühler, J., Dusschoten, D. van, Climent, J., & Postma, J. A. (2012). Pot size matters: A meta-analysis of the effects of rooting volume on plant growth. *Functional Plant Biology*, 39(11), 839–850. <https://doi.org/10.1071/FP12049>

- Posit team. (2023). *RStudio: Integrated Development Environment for R* (2023.9.1.494) [Software]. Posit Software, PBC. <http://www.posit.co/>
- Prashant, M., Waseem, M. A., Managanvi, K., Erayya, & Rai, V. L. (2023). Emerging Insect-Pests of Vegetables Due to Changing Climate. In S. S. Solankey & M. Kumari (Hrsg.), *Advances in Research on Vegetable Production Under a Changing Climate Vol. 2* (S. 299–322). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-20840-9\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-031-20840-9_14)
- Pythium spp.* (2020, August 3). Syngenta Seedcare. <https://www.syngentaseedcare.com/de/far-more/vegetables/diseases/pythium>
- Rastogi, M., Singh, S., & Pathak, H. (2002). Emissions of carbon dioxide from soil. *Current Science*, 82, 510–517.
- Reimer, M., Kopp, C., Hartmann, T., Zimmermann, H., Ruser, R., Schulz, R., Müller, T., & Möller, K. (2023). Assessing long term effects of compost fertilization on soil fertility and nitrogen mineralization rate. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 186(2), 217–233. <https://doi.org/10.1002/jpln.202200270>
- Reth, S., Reichstein, M., & Falge, E. (2005). The effect of soil water content, soil temperature, soil pH-value and the root mass on soil CO<sub>2</sub> efflux – A modified model. *Plant and Soil*, 268(1), 21–33. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-0175-5>
- Reutimann, J., Ehrler, A., & Schächli, B. (2022). *Aktualisierung Stoffflussanalyse Stickstoff für das Jahr 2018* (Stoffflussanalyse Stickstoff, S. 154). infras.
- Richner, W., & Sinaj, S. (2017). *Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz*. In: *Agrarforschung Schweiz* 8 (6). Agroscope. [www.grud.ch](http://www.grud.ch)
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., De Wit, C. A., Hughes, T., Van Der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., ... Foley, J. A. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461(7263), 472–475. <https://doi.org/10.1038/461472a>
- Roussis, I., Kakabouki, I., Folina, A., Konstantas, A., Travlos, I., & Bilalis, D. (2019). *Effects of Tomato Pomace Composts on Yield and Quality of Processing Tomato (Lycopersicon esculentum Mill.)*. 76, 250–257. <https://doi.org/10.15835/buasvmcn-hort:2019.0019>
- Sajjad, N., Bhat, E. A., Shah, D., Manzoor, I., Noor, W., Shah, S., Hassan, S., & Ali, R. (2021). 12—Nitrogen uptake, assimilation, and mobilization in plants under abiotic stress. In A. Roychoudhury, D. K. Tripathi, & R. Deshmukh (Hrsg.), *Transporters and Plant Osmotic Stress* (S. 215–233). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817958-1.00015-3>
- Saleh, H. A.-R., El-Nashar, Y. I., Serag-El-Din, M. F., & Dewir, Y. H. (2019). Plant growth, yield and bioactive compounds of two culinary herbs as affected by substrate type. *Scientia Horticulturae*, 243, 464–471. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.08.047>
- Santi, R. (2022). *BIOZYKLISCH-VEGANE RICHTLINIEN* (1.05; S. 72). BNS Biocyclic Network Services Ltd.
- Santikari, V. P., Witmer, M., Murdoch, L. C., Kaplan, D. I., & Powell, B. A. (2022). Leaching and transport of technetium from reducing cementitious waste forms in field lysimeters. *Science of The Total Environment*, 841, 156596. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156596>
- Schafer, G., & Lerner, B. L. (2022). Physical and chemical characteristics and analysis of plant substrate. *Ornamental Horticulture*, 28(2), 181–192. <https://doi.org/10.1590/2447-536x.v28i2.2496>

- Schmidt, M. E., Sauer, C., & Städler, E. (2008). *Unterscheidung und Bekämpfung von Blattläusen im gedeckten schweizerischen Gemüsebau* (Blattläuse, S. 2). Agroscope.
- Schmutz, U., & Foresi, L. (2017). Vegan organic horticulture – standards, challenges, socio-economics and impact on global food security. *Acta Horticulturae*, 1164, 475–484. <https://doi.org/10.17660/Acta-Hortic.2017.1164.62>
- Schönenberger, T., & Wanner, R. (2023a). *Soil TOC cube* (1.0.0; Betrieb und Sicherheit, S. 5). ZHAW.
- Schönenberger, T., & Wanner, R. (2023b). *vario EL cube—CHN Analyse* (1.0.0; Betrieb und Sicherheit, S. 5). ZHAW.
- Schubert, A. C. E. D. (2023). *Stickstoffdüngewirkung veganer organischer Reststoffe durch einen Gefäßversuch mit Deutschem Weidelgras (Lolium perenne L.)* [Masterarbeit]. HUMBOLDT-UNIVERSITÄT ZU BERLIN.
- Seymour, M., & Utter, A. (2021). Veganic farming in the United States: Farmer perceptions, motivations, and experiences. *Agriculture and Human Values*, 38(4), 1139–1159. <https://doi.org/10.1007/s10460-021-10225-x>
- Šimon, T., & Czako, A. (2014). Influence of long-term application of organic and inorganic fertilizers on soil properties. *Plant, Soil and Environment*, 60(7), 314–319. <https://doi.org/10.17221/264/2014-PSE>
- Starkniederschläge—MeteoSchweiz*. (o. J.). Abgerufen 23. Dezember 2023, von <https://www.meteoschweiz.admin.ch/klima/klima-der-schweiz/rekorde-und-extreme/starkniederschlaege.html>
- Statistiken zu vegetarisch und vegan lebenden Menschen in der Schweiz 2022* (S. 8). (2022). swissveg. swisscofel, & Verband Schweizer Gemüseproduzenten. (2023). *Schweizerische Qualitätsbestimmungen für Gemüse—Notranogurke (amerikanische Slicergurke) Cucumis sativus* (S. 1).
- Szulc, P., Ambroży-Deręgowska, K., Waligóra, H., Mejza, I., Grześ, S., Zielewicz, W., & Wróbel, B. (2021). Dry Matter Yield of Maize (*Zea mays* L.) as an Indicator of Mineral Fertilizer Efficiency. *Plants*, 10(3), 535. <https://doi.org/10.3390/plants10030535>
- Tamagno, S., Eagle, A. J., McLellan, E. L., van Kessel, C., Linnquist, B. A., Ladha, J. K., & Pittelkow, C. M. (2022). Quantifying N leaching losses as a function of N balance: A path to sustainable food supply chains. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 324, 107714. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107714>
- Umwelt Schweiz 2018* (S. 203). (2018). [Bericht des Bundesrates]. Bundesamt für Umwelt (BAFU).
- Utter, A., & Seymour, M. (2021). Veganic Agriculture in the United States: Opportunities for Research, Outreach, and Education. *The Journal of Extension*, 59, 8.
- Vegane Lebensmittel: Umsatz weltweit 2021*. (2021). Statista. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1287700/umfrage/umsatz-vegane-lebensmittel-weltweit/>
- Verein für biologisch-dynamische Landwirtschaft und Schweizerischer Demeter-Verband (Hrsg.). (2023). *RICHTLINIEN 2023 Erzeugung und Verarbeitung Schweizer Richtlinie für die Zertifizierung von «Demeter», «Biodynamisch» und damit in Verbindung stehenden Marken*. [https://demeter.ch/wp-content/uploads/2022/12/Demeter-Richtlinien\\_CH\\_2023\\_.pdf](https://demeter.ch/wp-content/uploads/2022/12/Demeter-Richtlinien_CH_2023_.pdf)
- Visak, T. (2007). Vegan agriculture: Animal-friendly and sustainable. In *Sustainable food production and ethics* (S. 193–197). Wageningen: Wageningen Academic Publishers.
- Wang, N., Fu, F., Wang, H., Wang, P., He, S., Shao, H., Ni, Z., & Zhang, X. (2021). Effects of irrigation and nitrogen on chlorophyll content, dry matter and nitrogen accumulation in sugar beet (*Beta vulgaris*

- L.). *Scientific Reports*, 11(1), 16651. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95792-z>
- Wang, Y., Ying, H., Yin, Y., Zheng, H., & Cui, Z. (2019). Estimating soil nitrate leaching of nitrogen fertilizer from global meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 657, 96–102. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.029>
- Wani, B. A., Rashid, S., Rashid, K., Javid, H., Magray, J. A., Qadir, R., & Islam, T. (2022). *Nitrogen Deficiency in Plants*. 28–37. <https://doi.org/10.1201/9781003248361-3>
- Wasserbedarf im Pflanzenbau*. (2018). Yara Deutschland. <https://www.yara.de/pflanzenernaehrung/pure-nutrient/info12-wassernutzungs-effizienz/wasserbedarf-im-pflanzenbau/>
- Weeds of farm crops. (2023). In *Lockhart and Wiseman's Crop Husbandry Including Grassland* (S. 115–141). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85702-4.00010-8>
- Wei, Z., Hoffland, E., Zhuang, M., Hellegers, P., & Cui, Z. (2021). Organic inputs to reduce nitrogen export via leaching and runoff: A global meta-analysis. *Environmental Pollution*, 291, 118176. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118176>
- Willett, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., Lang, T., Vermeulen, S., Garnett, T., Tilman, D., DeClerck, F., Wood, A., Jonell, M., Clark, M., Gordon, L. J., Fanzo, J., Hawkes, C., Zurayk, R., Rivera, J. A., De Vries, W., Majele Sibanda, L., ... Murray, C. J. L. (2019). Food in the Anthropocene: The EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet*, 393(10170), 447–492. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)31788-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4)
- Xu, J., Cai, H., Wang, X., Ma, C., Lu, Y., Ding, Y., Wang, X., Chen, H., Wang, Y., & Saddique, Q. (2020). Exploring optimal irrigation and nitrogen fertilization in a winter wheat-summer maize rotation system for improving crop yield and reducing water and nitrogen leaching. *Agricultural Water Management*, 228, 105904. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105904>
- Xu, Y., Ma, Y., Cayuela, M. L., Sánchez-Monedero, M. A., & Wang, Q. (2020). Compost biochemical quality mediates nitrogen leaching loss in a greenhouse soil under vegetable cultivation. *Geoderma*, 358, 113984. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113984>
- Yan, A., & Chen, Z. (2020). The Control of Seed Dormancy and Germination by Temperature, Light and Nitrate. *The Botanical Review*, 86(1), 39–75. <https://doi.org/10.1007/s12229-020-09220-4>
- Yang, T., Altland, J. E., & Samarakoon, U. C. (2023). Evaluation of substrates for cucumber production in the Dutch bucket hydroponic system. *Scientia Horticulturae*, 308, 111578. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111578>
- Zavarzina, A. G., Danchenko, N. N., Demin, V. V., Artemyeva, Z. S., & Kogut, B. M. (2021). Humic Substances: Hypotheses and Reality (a Review). *Eurasian Soil Science*, 54(12), 1826–1854. <https://doi.org/10.1134/S1064229321120164>
- Zhang, Y., Yu, S. E., Chang, T. T., Xu, Q. C., & Xu, H. L. (2022). Effects of excessive nitrogen fertilizer and soil moisture deficiency on antioxidant enzyme system and osmotic adjustment in tomato seedlings. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 15(2), 127–134. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20221502.5555>
- Zhao, S., Schmidt, S., Qin, W., Li, J., Li, G., & Zhang, W. (2020). Towards the circular nitrogen economy – A global meta-analysis of composting technologies reveals much potential for mitigating nitrogen losses. *Science of The Total Environment*, 704, 135401. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135401>

## Anhang

### **Im Dokument**

- Anhang 1: Eigenschaften von Kompostsubstraten
- Anhang 2: Selbstständigkeitserklärung

### **Elektronischer Anhang**

- Anhang 3: CHN Analyseergebnisse
- Anhang 4: Anteilsmässige Wasserhaltekapazität der maximalen gravimetrischen Wasserhaltekapazität
- Anhang 5: Berechnungen des Wasser- und Stickstoffbedarf pro Topf
- Anhang 6a/6b: Summary Report der iButtonlogger
- Anhang 7: Gurkenbonitur
- Anhang 8: Gerstenbonitur
- Anhang 9: Salatbonitur
- Anhang 10: Wurzelbonitur
- Anhang 11: ausgewaschene Wurzeln
- Anhang 12: Schadensbonitur
- Anhang 13: Chlorophyllmessungen
- Anhang 14: Kulturabschluss; Trockensubstanz der Pflanzen
- Anhang 15: Nitratbestimmung in der Gurke
- Anhang 16: Nitratauswaschung
- Anhang 17: Abbauversuch
- Anhang 18: R Skripte
- Anhang 19: Nitratgehalt Substrate vor Anbauversuch
- Anhang 20: Substratanalysen

## Anhang 1

**Eigenschaften von Kompostsubstraten**

*Tabelle 12 Eigenschaften von Kompostsubstrat und deren Ausprägungen (Hauert, 2012; Ho et al., 2022; Kupper & Fuchs, 2007; Baier et al., 2022)*

<b>Eigenschaften</b>	<b>Ausprägung Kompostsubstrat</b>
Spezifisches Gewicht	< 620 g/l
elektrische Leitfähigkeit	< 1000 µS/cm
Salzgehalt	< 10 gKCLEq/ kg TS
pH	<7.8
Wasserhaltekapazität	58.5% (3 - 4.1 g Wasser / g TS)
Stickstoffgehalt	> 12 g/kg TS (>1.2%)
C:N-Verhältnis	< 20
TS	> 55%
Pflanzengesundheit	Krankheitsunterdrückungstests werden empfohlen anzugeben, jedoch bestehen keine empfohlene Werte
Pflanzenwachstum	Zufuhr von Makro- und Mikronährstoffen für eine ausgewogene Pflanzenernährung
Wurzelfreundlichkeit	Geringer Salzgehalt und gute Pflanzenverträglichkeit, Puffereigenschaften
Ertrag	Steigern Ertrag und Qualität

## Anhang 2

### **Erklärung betreffend das selbstständige Verfassen einer Bachelorarbeit im Departement Life Sciences und Facility Management**

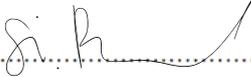
Mit der Abgabe dieser Bachelorarbeit versichert der/die Studierende, dass er/sie die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst hat.

Der/die unterzeichnende Studierende erklärt, dass alle verwendeten Quellen (auch Internetseiten) im Text oder Anhang korrekt ausgewiesen sind, d.h. dass die Bachelorarbeit keine Plagiate enthält, also keine Teile, die teilweise oder vollständig aus einem fremden Text oder einer fremden Arbeit unter Vorgabe der eigenen Urheberschaft bzw. ohne Quellenangabe übernommen worden sind.

Bei Verfehlungen aller Art kann ein Disziplinarverfahren gemäss den §§ 39 und 40 der Rahmenprüfungsordnung für die Bachelor- und Masterstudiengänge an der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften vom 29. Januar 2008 i.V.m. der Verordnung zum Fachhochschulgesetz des Kantons Zürich eröffnet werden.

..... Richterswil, 11.01.2024

(Ort, Datum)

..... 

(Unterschrift)