

# Terra preta – fruchtbare Böden dank schwarzer Erde

Die Einflüsse von Pflanzenkohle und Kompost auf das Wachstum und die Entwicklung von gewöhnlichem Feldsalat

Kantonsschule Rychenberg, Winterthur  
Dezember 2021, Lisa Hohl, 6dG

Betreuungsperson:  
Matthias Beck  
Zweitbeurteilung:  
Fabian Gabathuler



---

## Abstract

Im Amazonas wurden besonders fruchtbare und nährstoffreiche Böden entdeckt, die vermutlich auf eine Bewirtschaftung mit Kohle und organischem Material zurückgehen. Um die Wirkung von Pflanzenkohle und Kompost auf Böden zu untersuchen, wurde in einem Topfversuch mit verschiedenen Versuchsgruppen deren Einfluss auf das Wachstum von gewöhnlichem Feldsalat und weitere Bodeneigenschaften betrachtet.

Die Auswertung der Versuche ergibt, dass durch den Einsatz einer optimalen Menge an Kompost und Pflanzenkohle der Ertrag verdoppelt wird, aber auch andere Bodeneigenschaften wie die Wasserkapazität und der pH-Wert des Bodens erhöht werden. Auf den Anteil organischer Masse hat die Pflanzenkohle keinen eindeutigen Einfluss und die Schüttdichte kann nicht längerfristig beeinflusst werden. Für die Fähigkeit eines pflanzenkohlehaltigen Substrates, Stickstoff zurückzuhalten, wurde jedoch ein Optimum entdeckt, das noch weiter untersucht werden müsste. Insgesamt zeigt sich, dass die Terra preta-Technik ein Potenzial bietet, um landwirtschaftliche Flächen zu verbessern.

---

## Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	5
1.1.	Probleme der heutigen Landwirtschaft .....	5
1.2.	Terra Preta im Amazonas .....	5
1.3.	Pflanzkohle .....	6
1.3.1.	Pyrolyse .....	6
1.3.2.	Rechtlicher Umgang mit Pflanzkohle .....	7
1.4.	Kompost.....	7
1.5.	Wirkung der Kohle auf verschiedene Bodeneigenschaften .....	8
1.5.1.	Physikalische Bodeneigenschaften.....	8
1.5.2.	Chemische Bodeneigenschaften .....	10
1.5.3.	Biologische Bodeneigenschaften.....	13
2.	Fragestellungen.....	14
3.	Experimente .....	15
3.1.	Topfversuch .....	15
3.2.	Material und Methoden.....	16
3.2.1.	Herstellung der Substrate.....	16
3.2.2.	Setzlinge, Töpfe und Standort .....	17
3.3.	Datenerhebungen und Messungen .....	17
3.3.1.	Pflanzenwachstum .....	18
3.3.2.	Schüttdichte .....	18
3.3.3.	Wasserkapazität.....	19
3.3.4.	pH-Wert.....	20
3.3.5.	Gesamtstickstoff .....	21
3.3.6.	Humusgehalt .....	22
4.	Resultate.....	23
4.1.	Pflanzenwachstum .....	23

---

---

4.1.1.	Bilderserie .....	23
4.1.2.	Biomasse: Blätter .....	25
4.2.	Schüttdichte.....	27
4.3.	Wasserkapazität .....	28
4.4.	pH-Werte .....	29
4.5.	Gesamtstickstoff.....	30
4.6.	Anteil organischer Masse .....	32
5.	Diskussion.....	33
5.1.	Pflanzenwachstum .....	33
5.2.	Schüttdichte.....	34
5.3.	Wasserkapazität .....	35
5.4.	pH-Wert .....	36
5.5.	Gesamtstickstoff.....	37
5.6.	Anteil organischer Masse .....	38
5.7.	Weitere Forschungsmöglichkeiten .....	39
6.	Schlussfolgerungen .....	40
Anhang I: Danksagung.....		41
Anhang II: Erster Versuchsaufbau.....		42
Anhang III: Literaturverzeichnis .....		43
Anhang IV: Abbildungsverzeichnis .....		47
Anhang V: Tabellenverzeichnis .....		49
Anhang VI: Rohdaten .....		50
I.	Biomasse: Blätter .....	50
II.	Schüttdichte und Wasserkapazität .....	51
III.	pH-Werte .....	52
IV.	CHN-Analyse.....	53
VI.	Anteil an organischer Masse.....	54

---

---

## Einleitung

### 1.1. Probleme der heutigen Landwirtschaft

Die heutige Landwirtschaft steht vor immer grösser werdenden Herausforderungen. Ein gravierendes Problem ist beispielsweise die zunehmende Degradierung von landwirtschaftlichen Böden. Degradierung bezeichnet eine Verminderung der Bodenfruchtbarkeit und Biodiversität und ein daraus resultierender Verlust von nutzbaren Flächen (Brusseau *et al.*, 2019). Ursache dafür ist etwa die Verschmutzung durch die Landwirtschaft selbst, die durch Überweidung und nicht nachhaltige Praktiken dazu beiträgt (Brusseau *et al.*, 2019). Aber auch langfristige, vom Klimawandel ausgelöste Veränderungen spielen eine Rolle (Waters *et al.*, 2011). Laut einem Bericht der Vereinten Nationen ist in den letzten vier Jahrzehnten fast ein Drittel aller Ackerflächen der Welt verloren gegangen und nicht mehr nutzbar (Brusseau *et al.*, 2019). Um die immer grösser werdende Weltbevölkerung aber weiterhin mit Nahrungsmitteln zu versorgen (Koerber *et al.*, 2009) und den Verlust weiterer Flächen zu verhindern, müssen neue Ansätze und Methoden gefunden werden, wie Ackerflächen nachhaltig genutzt werden können.

### 1.2. Terra Preta im Amazonas

Ein möglicher Ansatz wurde im zwanzigsten Jahrhundert wiederentdeckt. Im Amazonasgebiet stiess man auf die sogenannte *terra preta de indios* (Abbildung 1). Dabei handelt es sich um Schwarzerden, die vor tausenden von Jahren von der indigenen Bevölkerung im Amazonasgebiet aufgebaut wurden (Bates, 2021; S. 41). Anders als vergleichbare Urwaldböden in derselben Region,



Abbildung 1: Typische Profile einer Terra Preta (a) und eines verwitterten Urwaldbodens (b) (Glaser *et al.*, 2001)

sind diese Erden äusserst fruchtbar, besitzen bemerkenswert hohe Anteile an Humus und Nährstoffen (Glaser *et al.*, 2012) und müssen daher von den Landwirten nicht gedüngt werden (Bates, 2021; S. 113). Heute nimmt man an, dass diese Erden gezielt mit Kohle, Knochen und Fäkalien bewirtschaftet wurden und so ihre ungewöhnlich günstigen Eigenschaften erhielten (Brockamp *et al.*, 2021).

---

Seit dieser Wiederentdeckung wird versucht, durch diese Techniken Böden mit ähnlichen Eigenschaften herzustellen und die Effekte von Kohle auf Böden werden seither intensiver erforscht. Es wurde festgestellt, dass Kohle das Potenzial besitzt die Bodengesundheit und das Pflanzenwachstum zu verändern, indem sie diverse bodenrelevante Faktoren wie die Nährstoffverfügbarkeit, sowie die mikrobielle Aktivität erhöht (Brockamp *et al.*, 2021), aber auch als langfristiger Kohlenstoffspeicher fungiert und so grosse Mengen an CO<sub>2</sub> nachhaltig im Boden binden kann (Bates *et al.*, 2021; S. 53 - 54).

### **1.3. Pflanzenkohle**

Das zentrale Element zur Herstellung von Terra preta ist Pflanzenkohle (Fischer *et al.*, 2012). Diese kann mittels verschiedener Herstellungsverfahren aus einer Vielzahl von diversen Ausgangsstoffen wie beispielsweise Maisstroh oder Haselnusschalen sowie Mist produziert werden (Ippolito *et al.*, 2015). Im Wesentlichen existieren zwei verschiedene Grundprozesse: Herstellung durch Pyrolyse oder Herstellung durch hydrothermale Carbonisierung (HTC). Bei letzterer handelt es sich um ein neueres Verfahren, das erst seit einigen Jahren angewendet wird, und noch nicht umfassend erforscht ist (Haubold-Rosar *et al.*, 2016). Bereits heute weiss man jedoch, dass die unterschiedlich hergestellten Kohlen grundlegend andere Eigenschaften besitzen (Haubold-Rosar *et al.*, 2016). In dieser Arbeit wird der Fokus nur auf durch Pyrolyseverfahren hergestellte Pflanzenkohle gerichtet, da HTC-Kohlen fast ausschliesslich als erneuerbare Energieträger verwendet werden. Ausserdem lassen bisherige Untersuchungen ihrer bodenrelevanten Eigenschaften darauf schliessen, dass sie für eine Anwendung als Bodenverbesserungsmittel weniger geeignet sind als Pyrolysekohlen (Haubold-Rosar *et al.*, 2016).

#### **1.3.1. Pyrolyse**

Als Pyrolyse wird das Erhitzen von kohlenstoffhaltigen Feststoffen nur durch Wärme und ohne Zufuhr von Sauerstoff bezeichnet (Brown *et al.*, 2015). Im Gegensatz zur vollständigen Verbrennung von Biomasse, wobei durch Oxidation der Stoffe nur Asche und Gase verbleiben, können so kohlenstoffreiche Substanzen hergestellt werden (Boateng *et al.*, 2015). Durch die Pyrolysereaktion werden die langkettigen organischen Verbindungen der Biomasse irreversibel in kurzkettige Moleküle aufgespalten. Dadurch entstehen im Wesentlichen vier Endprodukte: Gase, Flüssigkeiten wie Bio-Öle und feste Stoffe wie Holzkohle sowie Wasser (Kaltschmitt *et al.*, 2009; S. 684 - 685). Je nachdem, ob Gase, Öle oder Kohle als Endprodukt gewünscht wird, kann die Ausbeute dieses Produktes durch verschiedene Prozessfaktoren wie die Dauer, den Druck und die Temperatur des Pyrolyseprozesses oder durch die Wahl der Biomasse, die verbrannt wird, verbessert werden (Bates, 2021; S. 114 - 115). Generell gilt dabei, dass langsame Pyrolyseverfahren mit einer tiefen Aufheizrate und einer langen Verweilzeit höhere Erträge an Pflanzenkohle liefern, wohingegen höhere Aufheizraten und kürzere

---

Verweildauern eher für die Produktion von Bio-Ölen geeignet sind (Boateng *et al.*, 2015). Hergestellt wird Pflanzenkohle in speziellen Reaktoren, die eine Kontrolle all dieser Parameter ermöglichen (Brown *et al.*, 2015).

### **1.3.2. Rechtlicher Umgang mit Pflanzenkohle**

Seit 2013 ist die Verwendung von Pflanzenkohle in der Schweiz als Bodenverbesserungsmittel erlaubt. Wer Pflanzenkohle verkaufen und kommerziell herstellen will, braucht allerdings eine Bewilligung des Ithaka-Institutes (Schmidt, 2013). Dieses wiederum verlangt eine Zertifizierung der Pflanzenkohle nach den Qualitätsvorgaben des European Biochar Certificates (EBC) (Bassler, 2017), welches diverse Anforderungen an die Herstellungsverfahren und Ausgangsstoffe, die Eigenschaften der Kohle selbst und die Ausbringungstechniken stellt. Zudem sieht dieses Zertifikat Grenzwerte für potenziell enthaltene Schadstoffe vor (EBF, 2016). Im Moment ist für die Herstellung und Anwendung von Pflanzenkohle nur naturbelassenes Holz als Ausgangsstoff zugelassen (Schmidt *et al.*, 2021), doch eine Prüfung und Zulassung anderer Ausgangsstoffe steht noch aus (Schmidt, 2013).

## **1.4. Kompost**

Wenn versucht wird, Böden mit Terra preta-ähnlichen Eigenschaften aufzubauen, wird oft mit Kompost anstelle der im Amazonas verwendeten Essensabfälle und Fäkalien gearbeitet. Kompost wird durch die Umwandlung von abgestorbener Biomasse durch Mikroorganismen gebildet (Mandpe *et al.*, 2020; S. 39 – 60). Idealerweise wird die Biomasse unter aeroben Bedingungen in die Endprodukte CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O umgewandelt. Nebenbei entstehen verschiedene mineralische Bestandteile wie Ammonium und Nitrat, die für Pflanzen als Nährstoffe verfügbar sind. Der Kompostierungsprozess kann in verschiedene Phasen unterteilt werden, wobei in jeder Phase andere Mikroorganismen aktiv sind und verschiedene Abbaureaktionen stattfinden (Wagner *et al.*, 2004). Kompost ist darum eine gute Möglichkeit, dem Boden Nährstoffe und organische Masse zuzuführen und so Terra preta-ähnliche Eigenschaften zu erhalten.

---

## 1.5. Wirkung der Kohle auf verschiedene Bodeneigenschaften

Da es sich bei Böden um hochkomplexe Systeme handelt, die von einer Vielzahl von verschiedenen Faktoren beeinflusst werden (Chia *et al.*, 2015), kann die Einbringung von Pflanzenkohle diverse physikalische, chemische und biologische Bodeneigenschaften auf verschiedenen Ebenen beeinflussen (Waters *et al.*, 2011). Diese Veränderungen wirken sich anschliessend auch auf das Pflanzenwachstum und die Ernteerträge aus (Chia *et al.*, 2015). Grund dafür sind einerseits die Eigenschaften der Kohle selbst, aber auch die Interaktionen mit Pflanzen und Mikroorganismen (Waters *et al.*, 2011). Diese Mechanismen sollen in den folgenden Unterkapiteln genauer betrachtet werden.

### 1.5.1. Physikalische Bodeneigenschaften

#### 1.5.1.1. Porosität und Bodendichte

Obwohl mit Böden oft nur deren festen Anteile in Verbindung gebracht werden, sind die Poren und Räume zwischen den Bodenpartikeln mindestens genauso wichtig, denn ein Grossteil aller ausschlaggebenden Reaktionen findet in den Zwischenräumen des Bodens statt (Shaxson *et al.*, 2003).

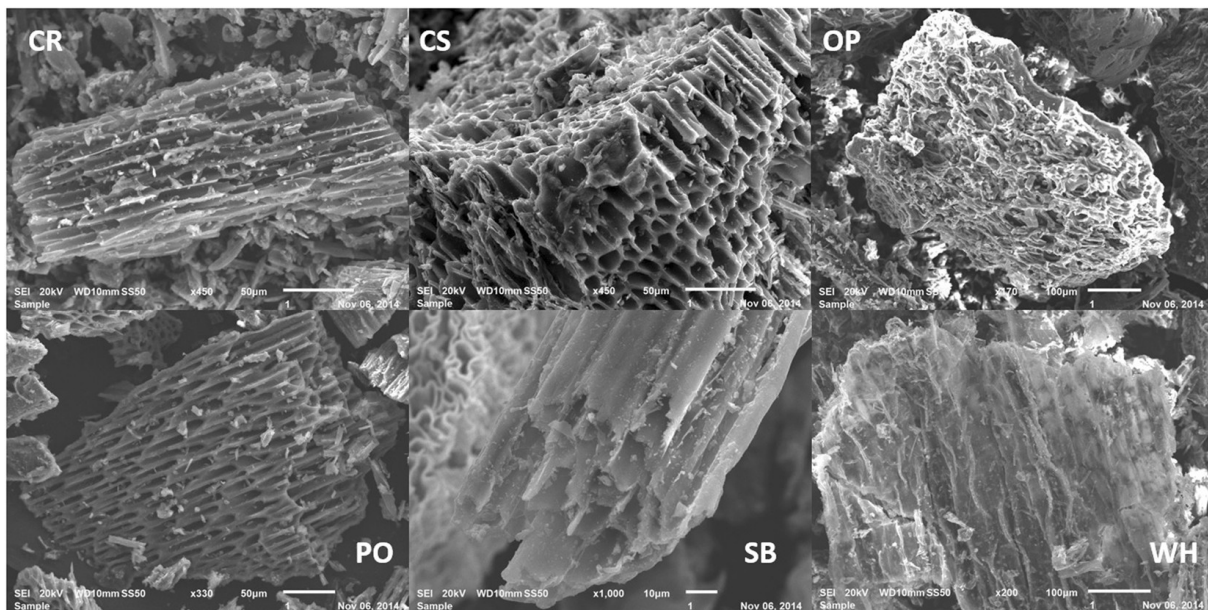


Abbildung 2: Elektronenmikroskopische Aufnahme von Pflanzenkohlensampeln bei verschiedenen Vergrößerungen. (CR=Holzkohle; CS=Kokosnussschalen; OP=Orangenschale; PO=Palmöl; SB=Zuckerrohr-Bagasse; WH=Wasserhyazinthe)

Pflanzenkohle hat eine sehr grosse Oberfläche (*Abbildung 2*), welche auf die grosse Anzahl verschiedenartiger Poren in der Kohle zurückzuführen ist (Chia *et al.*, 2015). Diese entstehen während des Pyrolyseprozesses, da Gase und flüchtige Stoffe aus den Zellen der Biomasse über die Zellporen ausgetrieben werden und so nur die Zellwände und ein hohler Innenraum verbleiben (Quicker *et al.*, 2016; S. 202). Die Grösse der entstehenden Poren wird ebenfalls durch verschiedene Prozessparameter beeinflusst, wie zum Beispiel die Aufheizrate oder die höchste erreichte Temperatur. Bei Höchsttemperaturen von 750°C entstehen Pflanzenkohlen mit den grössten



---

Oberflächen (Chia *et al.*, 2015). Bei noch höheren Temperaturen zerfällt die Struktur der Pflanzenkohle, was zu einer Reduktion der Poren und somit der Oberfläche führt (Chia *et al.*, 2015). Optimal hergestellte Pflanzenkohle bewirkt nach der Zugabe eine Vergrößerung des Gesamtporenanteils im Boden (Haubold-Rosar *et al.*, 2016).

Weiterführend hat Pflanzenkohle ein sehr geringes Gewicht und kann dadurch die Gesamtbodendichte verringern. Eine geringere Bodendichte erleichtert die Bodenbearbeitung und ermöglicht zudem eine bessere Durchwurzelung durch Pflanzen (Bassler, 2017).

#### **1.5.1.2. Wasserhaushalt**

Die Porosität und die Dichte eines Bodens stehen in direktem Zusammenhang mit dessen Wasserhaushalt (Chia *et al.*, 2015). Das Wasser in Böden stammt überwiegend aus Niederschlägen aus der Atmosphäre (Blum, 2012; S. 41) und gelangt durch die körnige Struktur und die Poren des Bodens in den Wurzelraum der Pflanze, wo es anschliessend aufgenommen wird (Blum, 2012; S. 147).

Pflanzenkohle besteht hauptsächlich aus kondensierten Aromaten, was auf eher hydrophobe Eigenschaften schliessen lässt. Dennoch wurde in diversen Studien eine bessere Wasserhaltefähigkeit (Glaser, 2015) oder Veränderungen in den Bewegungen des Bodenwassers nach einer Pflanzenkohlezugabe beobachtet (Masiello *et al.*, 2015). Pflanzenkohlepartikel können die physikalischen Gegebenheiten des Bodens durch ihre eigene poröse Struktur, aber auch durch das Verändern der Räume zwischen den Bodenpartikeln beeinflussen (Chia *et al.*, 2015). Nach einer Pflanzenkohlezugabe füllen sich die Räume zwischen den Partikeln und die Poren der Kohle selbst mit Wasser, wodurch dieses gespeichert wird (Chia *et al.*, 2015). Versuche haben gezeigt, dass Pflanzenkohle bis zum 11-fachen ihres Eigengewichts an Wasser aufnehmen kann (Bassler, 2017) und darum besteht besonders in Trockengebieten ein grosses Potenzial, mit Pflanzenkohle das Wassermanagement zu verbessern und so die Effekte von Trockenheit auf Pflanzen zu minimieren (Chia *et al.*, 2015).

Allerdings ist nicht alles Wasser, welches sich in Bodenporen befindet, auch wirklich für Pflanzen verfügbar. Um dies zu beschreiben, wird eine Einteilung der Bodenporen in Grob-, Mittel- und Feinporen vorgenommen (Scheffer *et al.*, 2018; S. 495). Die meisten Kulturpflanzen können nur Wasser aus engen Grob- und Mittelporen aufnehmen. Wenn Bodenporen eine gewisse Grösse überschreiten, versickert das Wasser zu schnell, wohingegen in Feinporen das Wasser durch kapillare Kräfte (Masiello *et al.*, 2015) zu stark gebunden ist und durch die osmotischen Kräfte der Pflanze nicht gelöst werden kann (Scheffer *et al.*, 2018; S. 495). Je nach Pflanzenkohle enthält diese Poren, die sich positiv oder auch negativ auf den Wasserhaushalt und das pflanzenverfügbare Wasser auswirken.

---

## 1.5.2. Chemische Bodeneigenschaften

### 1.5.2.1. pH-Werte von Böden

Der pH-Wert ist eine wichtige Bodeneigenschaft, die viel über die Qualität und die weiteren chemischen Eigenschaften eines Bodens aussagt. Durch den pH-Wert können Aussagen zum Verhalten von Nähr- und Schadstoffen, dem Lebensraum für Bodenorganismen und so der Eignung eines Bodens als Pflanzenstandort gemacht werden (Scheffer *et al.*, 2018; S. 188).

Der Boden-pH steht auch in direktem Zusammenhang mit der Fähigkeit eines Bodens, positiv oder negativ geladene Ionen und Moleküle zu speichern und anschliessend an Pflanzen wieder abzugeben (Kulli, persönliche Mitteilung). Grund für diesen Zusammenhang sind  $\text{OH}^-$ -Gruppen, die als funktionelle Gruppen an organischen Molekülen sitzen. Wenn ein saures Milieu im Boden herrscht, werden die vorhandenen  $\text{H}^+$ -Ionen von den Gruppen aufgenommen und die Ladung im Boden wird positiver. Nun können Anionen wie Nitrat und Phosphat zwar besser aufgenommen werden, aber die Fähigkeit Kationen wie Calcium aufzunehmen nimmt ab. Im basischen Milieu ist genau das Gegenteil der Fall: Hier werden  $\text{H}^+$ -Ionen abgegeben, die Ladung wird negativer und die Fähigkeit Kationen aufzunehmen nimmt zu, doch die Fähigkeit Anionen aufzunehmen nimmt ab (Kulli, persönliche Mitteilung).

Der pH-Wert von Pflanzenkohlen ist je nach Ausgangsmaterial und Art, sowie Dauer des Pyrolyseprozesses sehr unterschiedlich (Quicker *et al.*, 2016; S. 209 – 210). Biomassen wie reine Zellulose oder Lignin, die keine anorganischen Komponenten enthalten, werden zu Kohlen mit eher hohem Säuregehalt. Wenn Materialien wie beispielsweise Kiefernholz pyrolysiert werden, entstehen eher basische Produkte (Quicker *et al.*, 2016; S. 209). Aber nicht nur das Ausgangsmaterial ist wichtig. Pflanzenkohlen aus derselben Biomasse können je nach Prozessparametern pH-Werte von 4 bis 12 aufweisen (Lehmann *et al.*, 2015). Grundsätzlich gilt, dass bei höheren Temperaturen und zunehmender Verweildauer der pH-Wert ansteigt, da saure Gruppen entfernt werden (Ippolito *et al.*, 2015) und mehr basische Asche produziert wird (Quicker *et al.*, 2016, S. 209), welche zusätzlich mit den verbleibenden sauren Gruppen der Kohle reagiert und den pH-Wert der Kohle so zusätzlich erhöht (Bates, 2021; S. 117).

Besonders Pflanzenkohlen mit basischen Eigenschaften sind mit Blick auf die Bodenversauerung interessant. Die Versauerung von Böden ist ein natürlicher Prozess, der eintritt, wenn die Carbonate aus dem Boden allmählich aufgelöst und ausgewaschen werden (Scheffer *et al.*, 2018; S. 188 – 189). Um dem entgegenzuwirken, werden landwirtschaftlich genutzte Böden regelmässig gekalkt (Scheffer *et al.*, 2018; S. 188 – 189). In solchen Böden könnte basische Pflanzenkohle verwendet werden, um den pH-Wert zu erhöhen (Bates, 2021). Dies würde einerseits durch den pH-Wert der Kohle selbst,

---

aber auch die erhöhte Fähigkeit des Bodens, Kationen zurückzuhalten, erreicht werden (Ding *et al.*, 2017). Allerdings wäre der Effekt der Kohle, genau wie beim Kalken, nur vorübergehend, da ihre Wirkung mit der Zeit abnimmt (Bassler, 2017).

#### **1.5.2.2. Auswirkungen auf den Nährstoffhaushalt**

Pflanzkohle besteht vor allem aus aromatischem Kohlenstoff (Kleber *et al.*, 2015). Bei tieferen Pyrolysetemperaturen sind diese Ringe in der Regel ungeordnet vorzufinden, doch mit steigenden Temperaturen werden sie immer mehr zu kristallähnlichen Strukturen umgebaut (Chia *et al.* 2015). Ein Grossteil der insgesamt vorhandenen Nährstoffe der Kohle ist in deren Asche zu finden (Bassler, 2017). Da Stoffe wie Magnesium, Calcium und Mangan erst bei Temperaturen von über 1000°C gasförmig werden, und solche Temperaturen bei der Pyrolyse nicht erreicht werden, sind diese Nährstoffe im Ascheanteil der Pflanzkohle noch enthalten (DeLuca *et al.*, 2015).

Zusätzlich zu diesen Nährstoffen würden die Biomassen, die für die Herstellung von Pflanzkohle verwendet werden, auch viele funktionelle Gruppen besitzen, die Stickstoff und Sauerstoff enthalten. Während des Pyrolyseprozesses gehen viele dieser Gruppen allerdings verloren (Kleber *et al.*, 2015), was einen Verlust des ursprünglich enthaltenen Stickstoffes zur Folge hat. Auch enthält Pflanzkohle nur sehr wenig Phosphor (Bassler 2017). Da diese Makronährelemente für Pflanzen jedoch unentbehrlich sind und in relativ grossen Mengen gebraucht werden (Scheffer *et al.*, 2018; S. 518, S. 536), ist Pflanzkohle als Dünger weiterstehend uninteressant (Bassler, 2017). Ihre Fähigkeit, diese essentiellen Nährstoffe aufzunehmen, ist darum von grösserer Bedeutung (Glaser, 2015).

Pflanzkohle kann Nährstoffe über verschiedene Mechanismen wie elektrostatische Adsorption und Ionenaustauschreaktionen, aber auch durch weitere chemische Prozesse (Ippolito *et al.*, 2015) wie beispielsweise Ligandenaustauschreaktionen zurückhalten (Laird *et al.*, 2015) (*Abbildung 3*). Die elektrostatische Adsorption wird oft auf die funktionellen Gruppen zurückgeführt, die nach dem Kontakt der Pflanzkohle mit Wasser und Sauerstoff entstehen (Ippolito *et al.*, 2015). Zusätzlich können in Wasser gelöste Stoffe auch von den Poren der Pflanzkohlepartikel aufgenommen, und so zurückgehalten werden (Chia *et al.*, 2015).

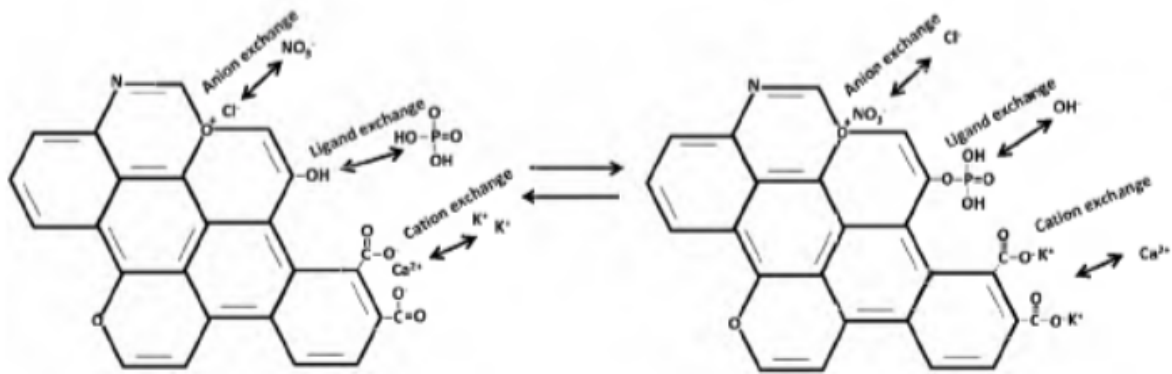


Abbildung 3: Beteiligte Mechanismen an der Bindung von Nährstoffen an Pflanzenkohlepartikel (Laird *et al.*, 2015)

Aufgrund dieser Fähigkeit, Nährstoffe aufzunehmen, sollte die Zugabe von unbehandelter Pflanzenkohle in Böden vermieden werden (Glaser, 2015). Wenn diese direkt der Erde zugegeben wird, beginnt die Kohle die Nährstoffe aus der umliegenden Erde aufzunehmen, was auf Kosten der Kulturpflanzen geschieht und deren Wachstum hemmt (Bates, 2021; S. 105). Wenn Pflanzenkohle vor der Zugabe in den Boden mit einer nährstoffreichen Substanz wie Kompost oder auch Düngemitteln gemischt wird, beginnt der Adsorptionsprozess bereits vorher, und die Kohle gelangt mit Nährstoffen «aufgeladen» in den Boden, wo sie diese wieder an Pflanzen abgeben kann. Eine besonders günstige Möglichkeit, um diesen Prozess zu ermöglichen wäre beispielsweise eine Mitkompostierung von Pflanzenkohle (Glaser, 2015).

Die Besonderheit der Pflanzenkohle ist, dass sie diese gespeicherten Nährstoffe nur langsam abgibt, was sie besonders als Langzeitdünger interessant macht (Hagemann *et al.*, 2017) und eine Verhinderung von Nährstoffauswaschung vermuten lässt (Laird *et al.* 2015).

---

### 1.5.3. Biologische Bodeneigenschaften

#### 1.5.3.1. Einfluss auf Bodenorganismen

Alle diese physikalischen und chemischen Veränderungen, die durch die Pflanzenkohle verursacht werden, haben auch einen direkten Einfluss auf die Bodenmikroorganismen. Dieser Wandel des Lebensraumes durch Pflanzenkohlezugabe hat Einflüsse auf die Zusammensetzung der Arten und auch deren Verhalten (Thies *et al.*, 2015).

Pflanzenkohle könnte dank ihrer stark porösen Struktur eine gute physikalische Umgebung für Mikroorganismen bieten. Man vermutet, dass Bakterien und Pilze in den Poren der Pflanzenkohle besser vor Fressfeinden und Konkurrenten geschützt sind (Ding *et al.*, 2016). Aber auch das Wasserspeichervermögen und die Gase, die im Wasser gelöst sind, tragen zu einem guten Milieu für Mikroorganismen bei (Radloff, 2016; S. 30). Die Poren können bei Trockenheit einen guten Unterschlupf bieten, da sie Feuchtigkeit oft besser speichern als die umliegende Erde (Thies *et al.*, 2015). Zusätzlich sorgen die Veränderungen anderer abiotischer Bodenfaktoren (Thies *et al.*, 2015), wie beispielsweise des pH-Wertes dafür (Ding *et al.*, 2016), dass bestimmte Arten einen Vorteil gegenüber anderen Populationen erlangen. Als Resultat kann vielfach eine Veränderung der Artenzusammensetzung nach der Zugabe von Pflanzenkohle in Böden beobachtet werden (Thies *et al.*, 2015).

#### 1.5.3.2. Organische Bodensubstanz und Kohlenstoffsequestrierung

Ein wichtiger Bodenbestandteil für die Bodenfauna ist die organische Bodensubstanz. Diese macht oft nur einen kleinen Teil des gesamten Bodens aus, hat aber einen grossen Einfluss auf viele Bodenfunktionen. Sie stellt eine Energiequelle für viele Mikroorganismen dar, aber ist wegen ihrer grossen Oberfläche auch ein wichtiger Sorbent für Nährstoffe (Scheffer *et al.*, 2018; S. 64). Ein grosser Bestandteil der organischen Masse ist Kohlenstoff. Böden sind darum wichtige Kohlenstoffspeicher und tragen dazu bei, CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre zu binden (Scheffer *et al.*, 2018; S. 64).

Durch die Zugabe von Pflanzenkohle werden dem Boden sehr stabile Kohlenstoffverbindungen zugeführt (Haubold-Rosar *et al.*, 2016). Pflanzenkohlen haben eine sehr geringe Abbaurate, bleiben dadurch lange im Boden bestehen (Quicker *et al.*, 2016; S. 289 - 290) und tragen zur Erweiterung der Kohlenstoffspeicherkapazität bei (Haubold-Rosar *et al.*, 2016). Ausserdem konnte in vielen Feldversuchen nach der Einbringung von Pflanzenkohle ein schnellerer Aufbau von organischer Masse durch Pflanzen beobachtet werden. Dies könnte durch die Sorption von labilem Kohlenstoff, aber auch durch ein besseres Wachstum der Pflanzenwurzeln erklärt werden (Quicker *et al.*, 2016; S. 292 - 293). So könnte Pflanzenkohle ein wichtiges Mittel zur Förderung des Aufbaus von organischer Masse sein.

---

## 2. Fragestellungen

Um die Einflüsse von Kompost und Pflanzenkohle auf Böden zu untersuchen, wurden folgende Forschungsfragen formuliert:

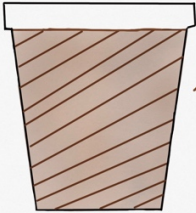
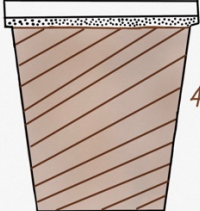
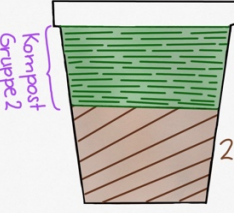
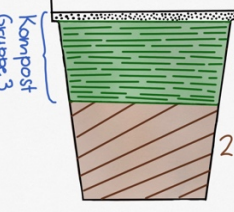
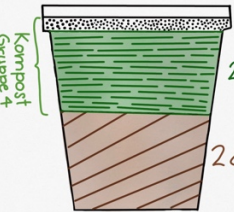
1. Wie werden das Wachstum und die Entwicklung von gewöhnlichem Feldsalat durch die Zugabe von Kompost und Pflanzenkohle beeinflusst?
2. Welchen Einfluss hat die Zugabe von Pflanzenkohle und Kompost auf verschiedene Bodeneigenschaften wie die Schüttdichte, die Wasseraufnahmekapazität, den pH-Wert und den Anteil organischer Masse?
3. Sind allfällige Veränderungen des Pflanzenwachstums durch die Nährstoffverfügbarkeit des Nährstoffs Stickstoff zu erklären?

### 3. Experimente

#### 3.1. Topfversuch

Um die Effekte der Kohle auf das Pflanzenwachstum und die Bodeneigenschaften zu untersuchen, wurden Substrate mit verschiedenen Kompost- und Kohleanteilen in einem Wachstumsversuch mit gewöhnlichem Feldsalat gegenübergestellt. Der Versuch umfasste fünf Versuchsgruppen, welche die in der Tabelle 1 aufgeführten Substrate enthielten. Pro Versuchsgruppe wurden jeweils drei Pflanzen in einzelnen Töpfen gepflanzt, um die Aussagekraft des Versuches zu erhöhen.

Tabelle 1: Versuchsgruppen des Topfversuchs (Hohl, 2021)

Gruppe	Farbe	Substrate	Genauere Zusammensetzung
0	Rot	Erde	 4dl Erde
1	Schwarz	Erde + Pflanzenkohle	 0.2 dl Kohle 4dl Erde
2	Violett	Erde + Kompost	 2dl Kompost 2dl Erde
3	Blau	Erde + Kompost mit 10% Pflanzenkohlanteil	 0.27dl Kohle 2dl Kompost 2dl Erde
4	Grün	Erde + Kompost mit 30% Pflanzenkohleanteil	 0.9 dl Kohle 2dl Kompost 2dl Erde

---

## 3.2. Material und Methoden

### 3.2.1. Herstellung der Substrate

Als Grundsubstrat fungierte die Universalerde Bio Capito von Landi (Art. Nr. 44997), ein Gemisch aus Rindenkompost, Cocopeat und vegetativer Strukturfaser mit organischer Aufdüngung. Die Erde wurde vor dem Versuch nicht für andere Pflanzen verwendet und wurde ohne Zusatz von Dünger eingesetzt. Der verwendete Kompost war der Gartenkompost Bio Capito aus kommunalem Grüngut von Landi (Art. Nr. 45019).

Die Pflanzenkohle ist ein Produkt der Verora AG (Produktnummer AGS10162) und besteht aus Baum- und Strauchschnitthäckseln, die bei maximal 600°C in deren PYREG-Anlage hergestellt wird. Sie besitzt eine hochporöse Struktur von 200 – 350 m<sup>2</sup>/g, einen Gehalt von 80 – 90 % Kohlenstoff und entspricht den Richtlinien des European Biochar Certificate des Ithaka-Institutes.

Da für die Mitkompostierung der Substrate zu wenig Zeit vorhanden war, wurden die Kompost-Substrate für die Versuchsgruppen 2 ,3 und 4 20 Tage vor Beginn des eigentlichen Topfversuches mit dem bereits gebrauchsfertigen Kompost und der Pflanzenkohle hergestellt.

Für alle drei Mischungen wurden je 13.3 l Universalkompost abgemessen, in die vorgesehenen Lagergefäße gefüllt und mit 6 dl Wasser vermischt. Für die Gruppe 2 wurde 1.48 l Pflanzenkohle mit 3 dl Wasser befeuchtet und diese dem Kompost in zwei Portionen zugefügt. Nach jeder Zugabe erfolgte ein erneutes Durchmischen. Das gleiche Vorgehen wurde für die Gruppe 4 angewendet, nur dass hier 5.72 l Pflanzenkohle und 9 dl Wasser verwendet wurden und die Pflanzenkohle in sieben Portionen hinzugefügt wurde. Die zugegebenen Mengen an Pflanzenkohle entsprachen jeweils 10 %, beziehungsweise 30 % des anschließenden Gesamtvolumens der Mischungen.

Die Substrate lagerten anschliessend in drei Plastikeimern in einem Gartenhaus. Die Eimer waren lose mit einem Stück Karton abgedeckt und verblieben dort für 20 Tage. Im Verlauf dieser Zeit wurden sie insgesamt vier Mal durchmischt und befeuchtet. Alle Gruppen erhielten dabei immer die gleiche Menge an Wasser.



---

### 3.2.2. Setzlinge, Töpfe und Standort

Die gepflanzten Setzlinge stammten aus der Produktion der Hauenstein AG in Winterthur, wo sie in einem Gewächshaus aufgezogen worden waren. Bei den Pflanzen handelte es sich um *Valerianella locusta*, den gewöhnlichen Feldsalat, einer Art der Baldriangewächse (Baltisberger *et al.*, 2013; S. 290 – 291).

Für den Versuch wurden die Setzlinge jeweils einzeln in Plastiktöpfen mit einem Durchmesser von 10.5-12 cm und einer Höhe von 9 – 9.5 cm gepflanzt. Die Töpfe wurden randomisiert den einzelnen Versuchsgruppen zugeordnet.

Der Versuch wurde im Freien durchgeführt. Die Töpfe standen auf einem Vorplatz mit guten Sonnenverhältnissen, waren nicht abgedeckt und so dem Wetter ausgesetzt.

Um zu garantieren, dass alle Pflanzen gleich viel Sonnenlicht erhielten, wurden die Pflanzen alle drei Tage randomisiert und neu angeordnet. Jede Versuchsgruppe erhielt eine Farbe und jeder Topf eine Nummer von 1 bis 3, sodass die Töpfe für eine Bilderserie immer wieder in der richtigen Reihenfolge aufgestellt werden konnten. Die verwendeten Farben sind in der Tabelle unter 3.1 vermerkt.

### 3.3. Datenerhebungen und Messungen

Um die genauen Effekte der Kohle auf die Bodeneigenschaften und das Pflanzenwachstum zu quantifizieren, wurden verschiedene Messungen zum Pflanzenwachstum, der Schüttdichte, der Wasserkapazität, dem pH-Wert, dem Stickstoffgehalt und dem Anteil organischer Masse durchgeführt.

Für alle Messungen, die vor und nach dem Topfversuch durchgeführt wurden, waren die Proben zusätzlich zur Versuchsgruppe mit den Abkürzungen «v» für «vor dem Versuch» und «n» für «nach dem Versuch» beschriftet. Beim Ansetzen des Versuchs wurde ein Teil der fertigen Substrate für die anschließenden Messungen zurückbehalten. Die Messung der organischen Masse dieser Proben erfolgte eine Woche nach dem Ansetzen des Versuchs, die Messung aller anderen Bodeneigenschaften aus praktischen Gründen allerdings erst nach dem Abschluss des Topfversuchs. Die Proben wurden jedoch in verschlossenen Plastikgefäßen gelagert. Eine nennenswerte Veränderung durch diese Lagerungszeit oder Einflüsse von aussen können darum ausgeschlossen werden. Nach dem Versuch war gleich viel Masse an Substrat aus allen Töpfen der jeweiligen Versuchsgruppen als Probe entnommen worden, um einen Mittelwert der Töpfe zu erhalten.

Alle Daten, die durch die Messungen erfasst wurden, sind in Excel-Tabellen gesammelt und im gleichen Programm in Säulendiagrammen dargestellt worden. Zusätzlich wurde für alle Messungen, die Duplikate oder Triplikate enthielten, die Standardabweichung berechnet, um die Aussagekraft der Resultate zu beurteilen. Diese Werte wurden ebenfalls in den Diagrammen angegeben.

---

---

### 3.3.1. Pflanzenwachstum

Zwei verschiedene Untersuchungen sollten das Pflanzenwachstum und die Pflanzenentwicklung vergleichen:

#### 3.3.1.1. Erstellen einer Bilderserie

Jeden Tag wurde ein Foto aller Pflanzen aus immer gleichbleibender Perspektive erstellt. Dabei wurden jeweils alle Töpfe in einem Bild fotografiert, um die Pflanzen vergleichen zu können. Die Bilder wurden nach dem Abschluss des Versuchs zu einem Kurzfilm zusammengestellt.

#### 3.3.1.2. Messen der oberirdischen Biomasse

Am Ende der Vegetationsperiode erfolgte der Abschluss des Versuchs und die Ernte aller oberirdischen Biomasse. Diese Nassmasse wurden anschliessend mit einer Waage gewogen. Nachfolgend wurden die Pflanzen in einem herkömmlichen Backofen für fünf Stunden bei 110° C getrocknet und die Trockenmasse anschliessend erneut gewogen.

### 3.3.2. Schüttdichte

Ebenfalls wurde die Schüttdichte der Substrate vor und nach dem Topfversuch bestimmt. Diese beschreibt die Dichte eines Substrates, welches locker aufgeschüttet und nicht komprimiert wird (Kulli, persönliche Mitteilung).

Zur Vorbereitung wurden die Substratproben an der ZHAW Wädenswil in Alugefässen für 24 Stunden bei 60°C in einem Ofen getrocknet. Anschliessend wurden sie in Plastikbeutel umgefüllt und zerbröseln, sodass sie ohne eine Verdichtung in Plastikmassbecher geschüttet werden konnten. Notiert wurden das Gewicht sowie das Volumen des Substrates und die Dichte wurde gemäss Gleichung 1 ermittelt (Kulli, persönliche Mitteilung).

$$\rho_{\text{geschüttet}} \left( \frac{g}{cm^3} \right) = \frac{\text{Masse Substrat (g)}}{\text{Schüttvolumen (cm}^3\text{)}} \quad (1)$$

---

### 3.3.3. Wasserkapazität

Nachfolgend zur Schüttdichte erfolgte eine Bestimmung der maximalen Wasserkapazität der Proben. Damit wird die Menge an Wasser, die eine getrocknete Substratprobe innerhalb von 24 Stunden aufnehmen und speichern kann, bezeichnet (Kulli, persönliche Mitteilung).

Das Trocknen und das Vorbereiten der Proben waren identisch mit den Schritten zur Messung der Schüttdichte. Das getrocknete Substrat wurde in Massbecher gefüllt und das Gewicht des Massbechers inklusive der Probe erfasst. Die Proben wurden mit 500 ml Wasser ganz bedeckt. Schwimmende Komponenten wurden mit einer Plastikscheibe und Schrauben als Beschwerungsgewicht unter den Wasserpegel gedrückt, ohne jedoch das Substrat zu komprimieren.

Nach einer Wartezeit von 24 Stunden wurden die Beschwerungsgewichte entfernt und die Proben über einem Sieb abgegossen. Im gleichen Sieb tropften die Proben noch für weitere 3 Minuten ab. Für die Bestimmung der Menge an zurückgehaltenem Wasser wurden die Proben wieder in die Massbecher gefüllt und deren Gesamtgewicht gewogen. Die Wasserkapazität wurde mit der Gleichung 2 bestimmt (Kulli, persönliche Mitteilung).

$$\text{Wasserkapazität (Vol in \%)} = \frac{\text{Total zurückgehaltenes Wasser (g)}}{\text{Substratvolumen vor der Messung (cm}^3\text{)}} \quad (2)$$

---

### 3.3.4. pH-Wert

Zur Bestimmung des pH-Werts der Substrate diente die Referenzmethode der Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon. Gemessen wurde dieser Wert an der ZHAW Wädenswil mit einer 0.01 molaren  $\text{CaCl}_2$ -Lösung (Wanner, persönliche Mitteilung).

Als Vorbereitung wurden die Proben unter gleichen Umständen getrocknet, wie für die Versuche der Schüttdichte und der Wasserkapazität. Anschliessend wurden die Substrate mit einem Sieb, das eine Lochgrösse von 2 mm besass, gesiebt (*Abbildung 4*). Für die Messung wurden 12 g des gesiebten Substrates in Plastikröhren gefüllt und anschliessend mit 30 ml  $\text{CaCl}_2$ -Lösung übergossen.

Der pH-Wert wurden nach einer Wartezeit von 30 Minuten mit einem HQ40 Multimeter der Marke HACH gemessen (*Abbildung 5*). Pro Versuchsgruppe wurden jeweils zwei Proben und Messwerte erfasst, um eine bessere Aussagekraft zu ermöglichen.



Abbildung 4: Verwendetes 2 mm Sieb (Hohl, 2021)



Abbildung 5: Aufbau zur Messung der pH-Werte (Hohl, 2021)

---

### 3.3.5. Gesamtstickstoff

Der Gehalt des gesamthaft enthaltenen Stickstoffs wurde mit einer CHN-Analyse bestimmt. Dafür wurde ein TruSpec Makro Analyzer der ZHAW Wädenswil verwendet, der den Kohlenstoff-, Wasserstoff- und Stickstoffgehalt der Proben misst. Für die Analyse wird die Bodenprobe zunächst gereinigt (Wanner, persönliche Mitteilung) und nachfolgend erhitzt, so dass diese Stoffe gasförmig und von einem Infrarotdetektor erfasst werden können (LECO, 2021). Für die Auswertung waren allerdings nur die erhaltenen Stickstoffwerte von Bedeutung.

Auch hier wurden die Proben als Vorbereitung mit einem 2 mm-Sieb gesiebt. Während der Vorbereitung wurde festgestellt, dass viele der in den Gruppen 1, 3 und 4 enthaltenen Kohlestücke diese Grösse überschritten. Da diese Pflanzenkohlepartikel jedoch einen wichtigen Bestandteil der aufgestellten These darstellen, wurden für diese Gruppen zwei Fraktionen erstellt, wobei die eine Partikel enthielt, die kleiner als 2 mm waren, die andere die Partikel, die diese Grösse überschritten.

Nachfolgend wurden die Proben in einer Kugelmühle gemahlen (*Abbildung 6*) und für die Messung eingewogen (*Abbildung 7*). Dafür wurden 0.1 g der gemahlene Proben in Aluschiffchen gefüllt und diese anschliessend verschlossen (*Abbildung 8*). Die so verpackten Proben wurden daraufhin in die Maschine gegeben und von dieser ausgewertet. Für eine bessere Aussagekraft wurden alle Proben doppelt gemessen.

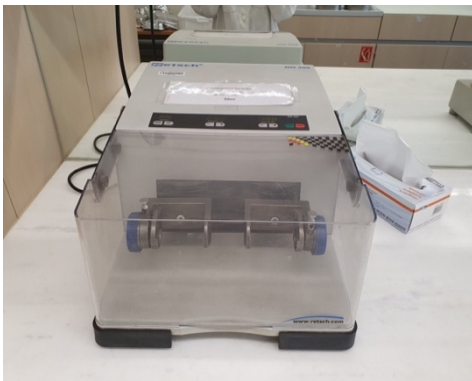


Abbildung 6: Kugelmühle (Hohl, 2021)

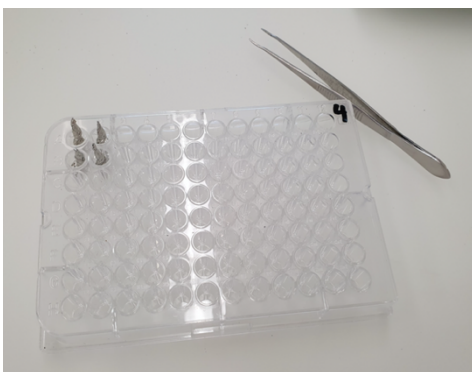


Abbildung 7: Vorbereitete Proben für die Stickstoffmessung (Hohl, 2021)

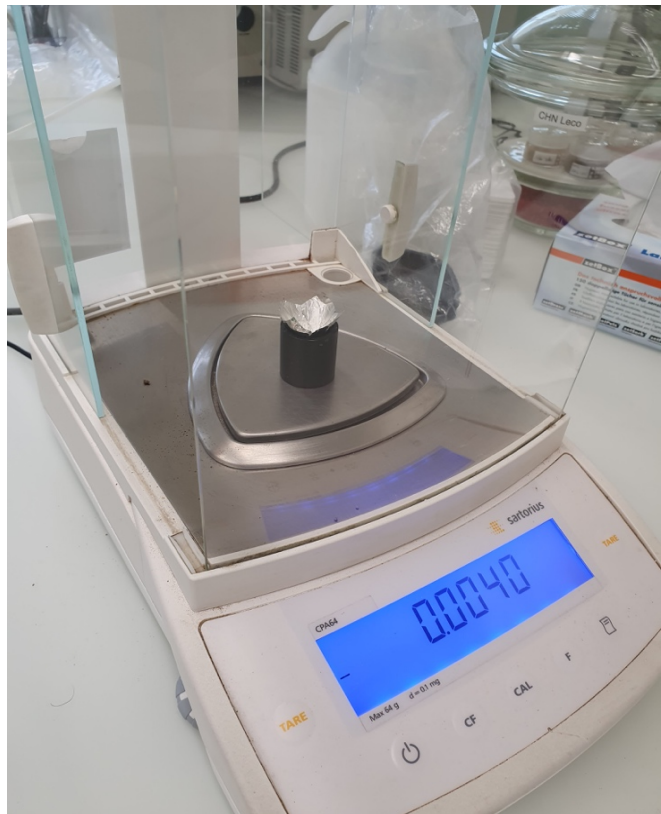


Abbildung 8: Einwägen der Proben in Aluschiffchen (Hohl, 2021)

---

### 3.3.6. Humusgehalt

Mit der Methode des Glühens wurde der Humusgehalt der verschiedenen Substrate bestimmt (Zum Unterrichten, 2021).

Vor dem Start des Topfversuches wurden von jeder Versuchsgruppe Proben der Masse 75 g der fertigen Substrate entnommen. Zur Vorbereitung wurden die Proben mit Salzsäure behandelt, um einen Fehler durch das enthaltene CO<sub>2</sub> zu verhindern. Dafür wurden die Proben in 400 ml Bechergläser gefüllt und mit 100 ml einer 0.1 molaren Salzsäurelösung übergossen. Nach einer Wartezeit von 40 Minuten wurden die Becher mit destilliertem Wasser aufgefüllt und die Flüssigkeit von Hand abgegossen. Die Proben wurden anschliessend für den Trocknungsprozess in hitzebeständige Keramikbehälter gefüllt und in einem herkömmlichen Backofen bei 110°C für fünf Stunden getrocknet.

Für das Glühen wurden die getrockneten Proben erneut gewogen und anschliessend in Abdampfschalen gefüllt. Diese wurden auf einem Dreibein mit dem Bunsenbrenner bis zur Rotglut erhitzt. Um ein gleichmässiges Verbrennen sicherzustellen, wurden die Proben immer wieder mit einem Glasstab durchmischt. Der Prozess lief solange, bis die Proben eine weisslich-graue bis rötliche Färbung angenommen hatten.

Für die Proben der Gruppen 0, 1 und 2, die vor dem Versuch entnommen worden waren, wurde genau dieses Verfahren angewendet, doch es wurde während des Versuchs festgestellt, dass die verwendeten Abdampfschalen der Hitze nicht standhielten und während des Versuches zersprangen. Die Proben wurden möglichst vollständig wieder aufgesammelt und ausgewertet. Als Alternative wurden die Proben der Gruppen 3 und 4 sowie alle Proben, die nach dem Versuch entnommen worden waren, anschliessend in grossen Konservendosen erhitzt, wo der Glühprozess schneller ablief als in den Abdampfschalen. Die ausgeglühten Proben wurden nach dem Abkühlen wieder in Abdampfschalen gefüllt und erneut gewogen. Der Glühverlust wurde mit der folgenden Formel berechnet und anschliessend dessen Prozentsatz im Vergleich zur anfänglichen Probe bestimmt:

$$\begin{aligned} & \text{Bodeneinwaage vor dem Glühen} - \text{Bodeneinwaage nach dem Glühen} & (3) \\ & = \text{Glühverlust in g} \end{aligned}$$

$$\text{Glühverlust in \%} = \frac{\text{Glühverlust} * 100}{\text{Bodeneinwaage vor dem Glühen}} \quad (4)$$

---

## 4. Resultate

### 4.1. Pflanzenwachstum

#### 4.1.1. Bilderserie



Abbildung 10: Feldsalat am 3.10.2021 (Hohl, 2021)



Abbildung 9: Feldsalat am 11.10.2021 (Hohl, 2021)



Abbildung 11: Feldsalat am 23.10.2021 (Hohl, 2021)



Abbildung 12: Feldsalat am 30.10.2021 (Hohl, 2021)



#### 4.1.2. Biomasse: Blätter

Zwischen den Durchschnittswerten der unbehandelten Biomassen der Versuchsgruppen waren klare Unterschiede sichtbar, die in der Tabelle 2 und der Abbildung 13 dargestellt sind.

Tabelle 2: Auswertung der unbehandelten Biomasse (Hohl, 2021)

Versuchsgruppe	0	1	2	3	4
Durchschnitt Biomasse unbehandelt [g]	1.82	1.34	3.54	3.65	3.08
Steigerung/Verringerung im Vergleich zur Kontrolle [%]	0	- 26.65	+ 94.14	+ 101.92	+ 69.27

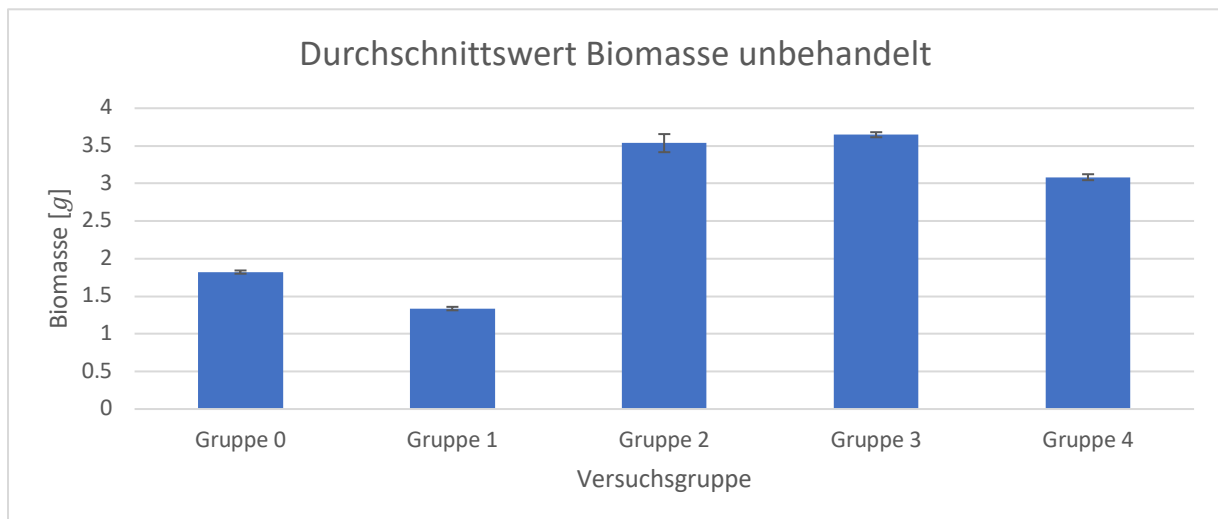


Abbildung 13: Durchschnittswerte der unbehandelten Biomasse nach dem Topfversuch (Hohl, 2021)

---

Die Pflanzen aller Versuchsgruppen hatten einen Wassergehalt von ungefähr 88%. Derselbe Trend wie bei der unbehandelten Biomasse war auch bei der Messung der getrockneten Biomasse bemerkbar, wie dies in der Abbildung 14 ersichtlich ist.

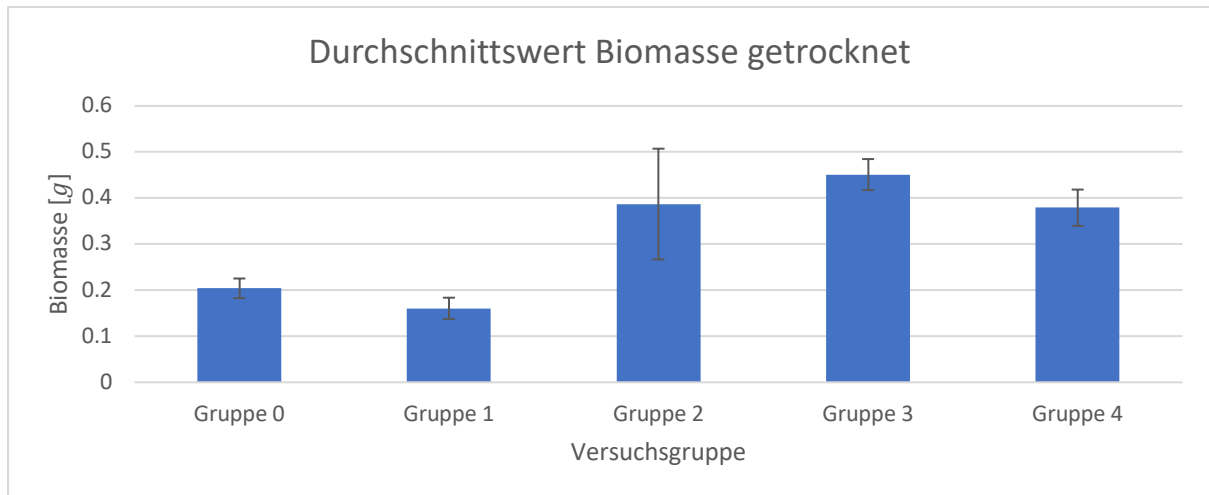


Abbildung 14: Durchschnittswerte der getrockneten Biomassen nach dem Topfversuch (Hohl, 2021)

## 4.2. Schüttdichte

Bei der Bestimmung der Schüttdichten wurden folgende Werte gemessen, die in der Tabelle 3 und der Abbildung 15 dargestellt sind.

Tabelle 3: Auswertung der Schüttdichte vor und nach dem Versuch (Hohl, 2021)

Versuchsgruppe	0	1	2	3	4
Schüttdichte vor dem Topfversuch $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	0.31	0.29	0.44	0.42	0.41
Schüttdichte nach dem Topfversuch $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	0.32	0.33	0.41	0.38	0.40
Steigerung/Verringerung der Schüttdichte über den Versuch [%]	+ 3.23	+ 14.12	- 6.82	- 9.31	- 2.44

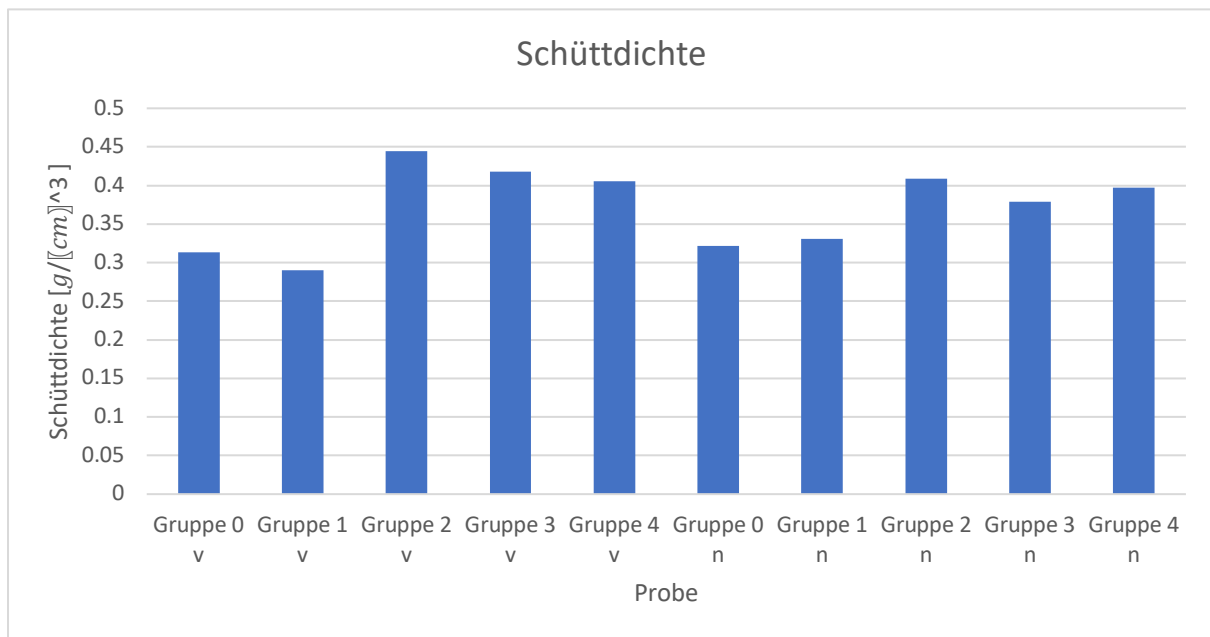


Abbildung 15: Schüttdichten der verschiedenen Versuchsgruppen vor und nach dem Topfversuch (Hohl, 2021)

### 4.3. Wasserkapazität

Auch die Messung der Wasserkapazität ergab unterschiedliche Werte. Diese sind in der Tabelle 4 und der Abbildung 16 dargestellt.

Tabelle 4: Auswertung der Wasserkapazität vor und nach dem Versuch (Hohl, 2021)

Versuchsgruppe	0	1	2	3	4
Wasserkapazität vor dem Topfversuch [%]	54	51	59	62	65
Wasserkapazität nach dem Topfversuch [%]	48	54	54	61	69
Steigerung/Verringerung der Wasserkapazität über den Versuch [%]	- 6	+ 3	- 5	- 1	+ 4

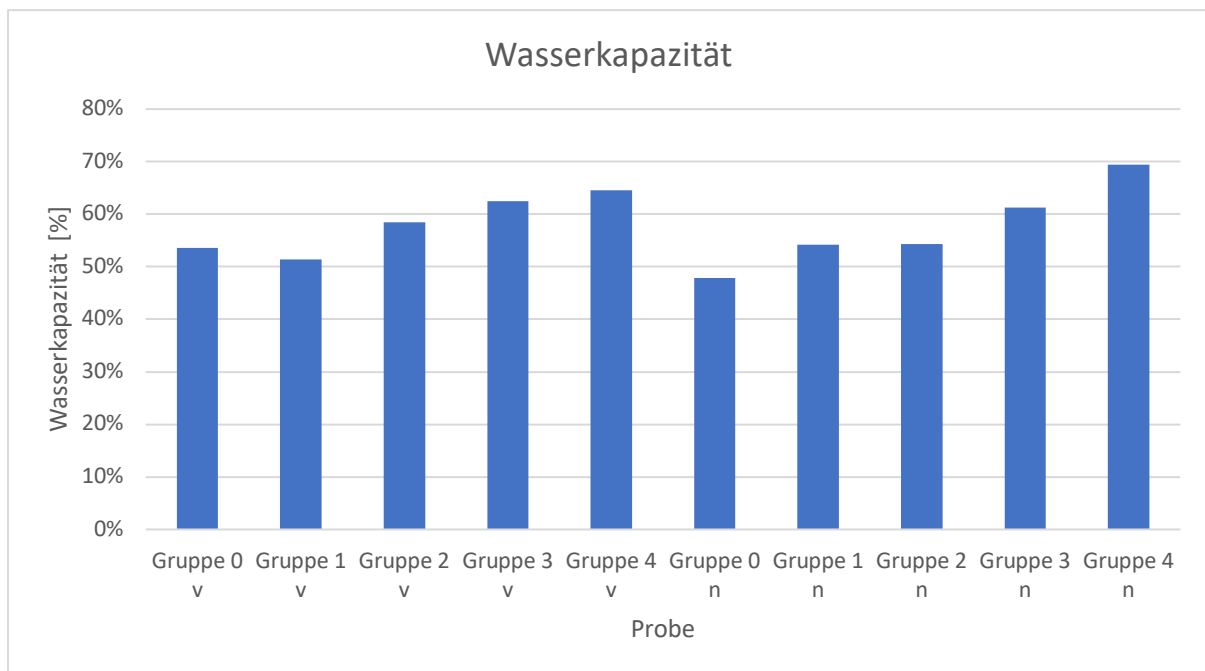


Abbildung 16: Wasserkapazitäten der verschiedenen Versuchsgruppen vor und nach dem Topfversuch (Hohl, 2021)

#### 4.4. pH-Werte

Bei allen Versuchsgruppen konnte ein Anstieg des pH-Wertes im Vergleich zur Kontrolle festgestellt werden, wie dies die Tabelle 5 und die Abbildung 17 zeigen.

Tabelle 5: Auswertung der pH-Werte vor und nach dem Versuch (Hohl, 2021)

Versuchsgruppe	0	1	2	3	4
pH-Wert vor dem Topfversuch	7.66	7.78	8.01	7.97	8.02
Steigerung/Verringerung im Vergleich zur Kontrolle vor dem Versuch	0	+ 0.21	+ 0.44	+ 0.31	+ 0.36
pH-Wert nach dem Topfversuch	7.80	7.90	8.10	8.10	8.23
Steigerung/Verringerung im Vergleich zur Kontrolle nach dem Versuch	0	+ 0.1	+ 0.3	+ 0.3	+ 0.43

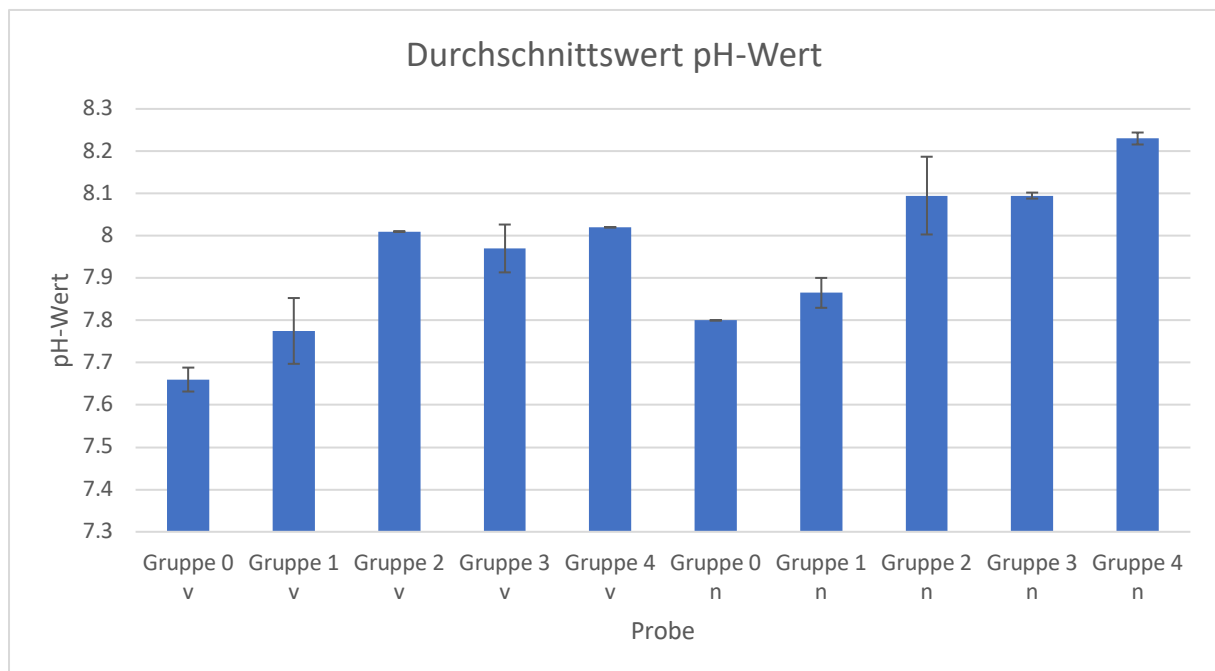


Abbildung 17: Durchschnittswerte der pH-Messungen der Versuchsgruppen vor und nach dem Versuch (Hohl, 2021)

## 4.5. Gesamtstickstoff

Die Messung des Gesamtstickstoffgehaltes der Proben ergab verschiedene Trends, die in der Abbildung 18 und der Tabelle 6 dargestellt sind.

Tabelle 6: Auswertung des Gesamtstickstoffgehaltes (Partikelgrösse < 2mm) (Hohl, 2021)

Versuchsgruppe	0	1	2	3	4
Gesamtstickstoffgehalt vor dem Topfversuch [%]	1.39	1.43	1.41	1.43	1.38
Gesamtstickstoffgehalt nach dem Versuch [%]	1.21	1.33	1.28	1.41	1.31
Abnahme/Zunahme des Stickstoffgehaltes über den Versuch [%]	- 0.18	- 0.1	- 0.13	- 0.02	- 0.07

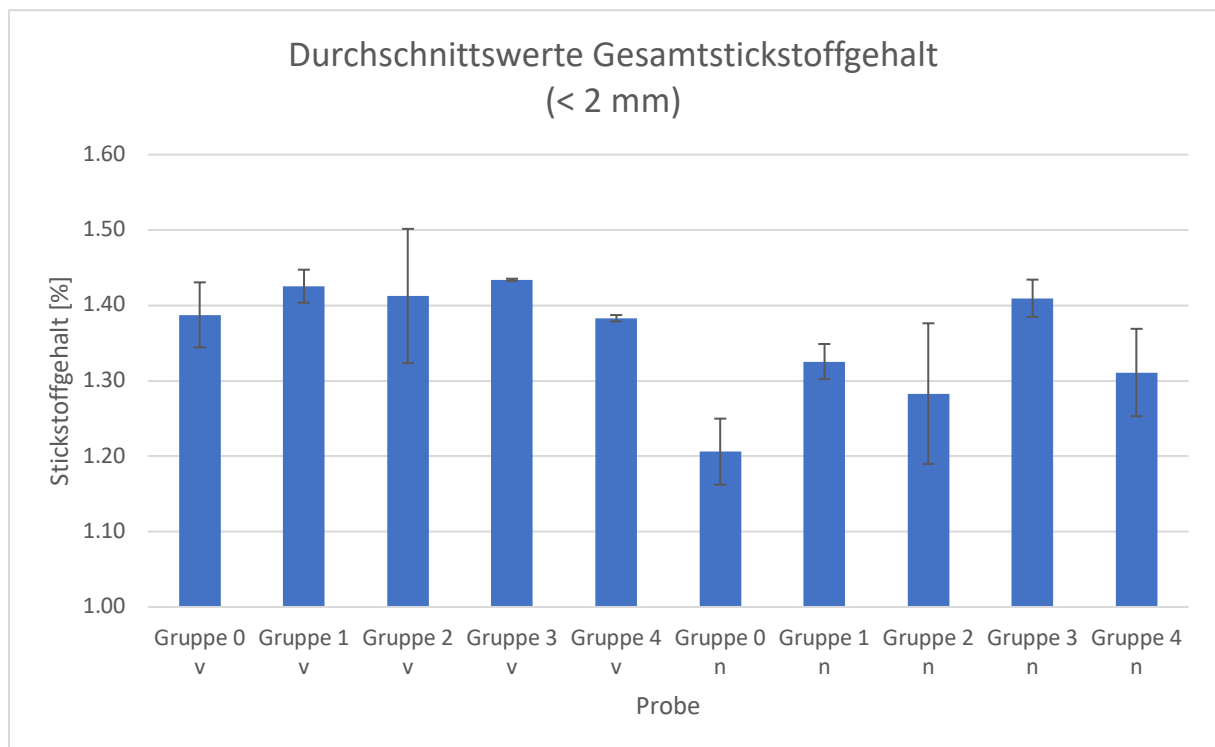


Abbildung 18: Durchschnittswerte des Stickstoffgehaltes der Proben < 2 mm vor und nach dem Versuch (Hohl, 2021)

Die Abbildung 19 und die Tabelle 7 zeigen, dass sich die Werte der zusätzlichen Fraktionen, die für die pflanzenkohlehaltigen Gruppen 1, 3 und 4 erstellt wurden, ebenfalls stark unterschieden.

Tabelle 7: Auswertung des Gesamtstickstoffgehaltes (Partikelgrösse > 2mm) (Hohl, 2021)

Versuchsgruppe	1	3	4
Gesamtstickstoffgehalt vor dem Topfversuch [%]	1.29	1.51	1.35
Gesamtstickstoffgehalt nach dem Versuch [%]	1.24	1.67	1.26
Abnahme/Zunahme des Stickstoffgehaltes über den Versuch [%]	- 0.05	+ 0.16	- 0.09

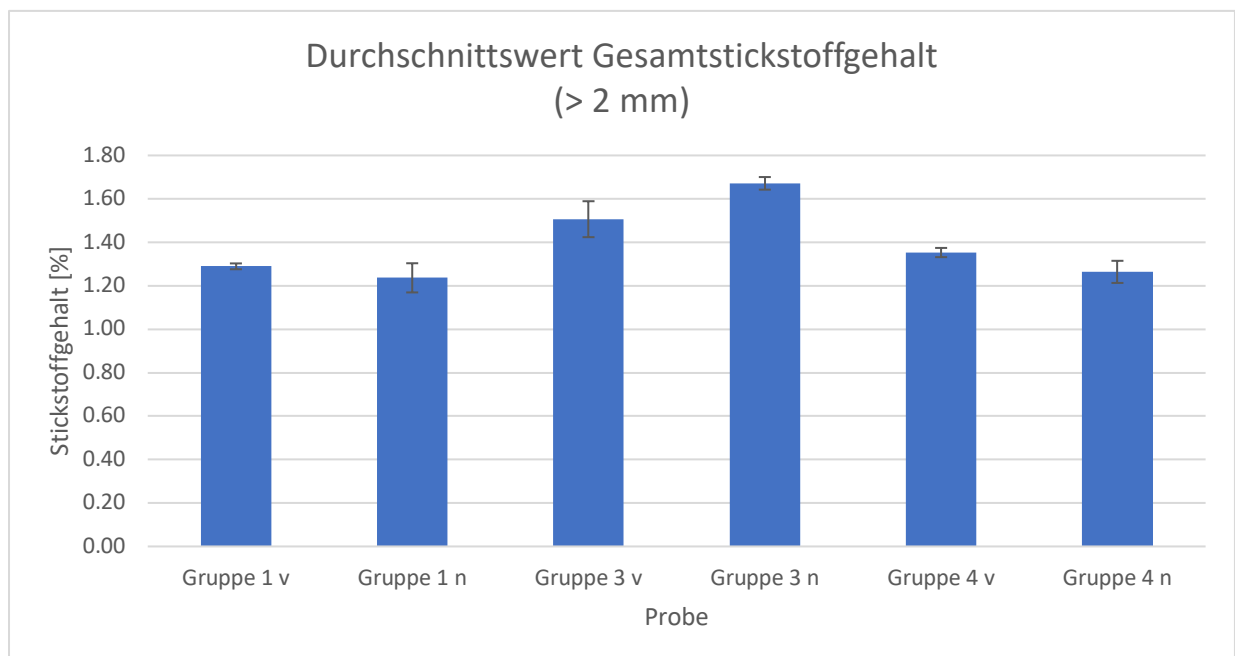


Abbildung 19: Durchschnittswerte des Stickstoffgehaltes der Proben > 2 mm vor und nach dem Versuch (Hohl, 2021)

#### 4.6. Anteil organischer Masse

Bei der Messung der organischen Masse war kein eindeutiger Trend sichtbar. Ersichtlich ist dies in der Tabelle 8 und der Abbildung 20.

Tabelle 8: Auswertung der organischen Masse (Hohl, 2021)

Versuchsgruppe	0	1	2	3	4
Steigerung/Verringerung im Vergleich zum gemessenen Wert am Anfang des Versuchs[%]	- 1.04	- 5.63	- 3.11	+ 1.64	- 8.55

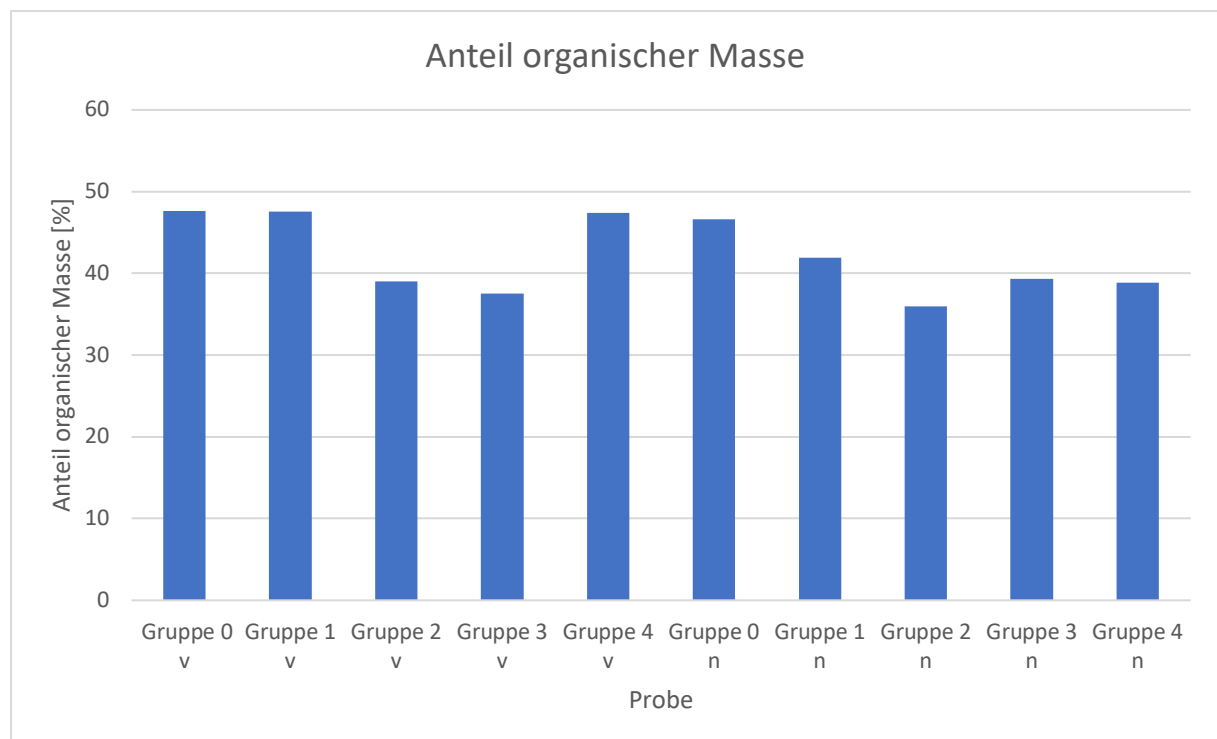


Abbildung 20: Anteil der organischen Masse der Versuchsgruppen vor und nach dem Topfversuch (Hohl, 2021)



---

## 5. Diskussion

### 5.1. Pflanzenwachstum

Die Vermutung, dass Pflanzenkohle und Kompost das Pflanzenwachstum fördern, wird vom Versuch unterstützt. Es wurde gezeigt, dass mit Kompost ein höherer Biomasseertrag erzielt werden kann, dieser aber durch ein Beimischen von Pflanzenkohle noch zusätzlich weiter gesteigert wird.

Auch Schulz *et al.* (2013) beschrieben einen solchen Effekt, wobei die Biomasse von Hafer und eine vorherige Zugabe von Pflanzenkohle und Kompost linear zusammenhingen. Je grösser die Pflanzenkohlezugabe war, desto mehr Hafer konnte geerntet werden. Anders als in jener Untersuchung wurde hier jedoch beobachtet, dass die Biomasse des Feldsalats nicht linear mit der Zugabe von Pflanzenkohle gesteigert werden kann. Obwohl die Gruppe 4 dreimal mehr Pflanzenkohle erhielt als die Gruppe 3, entwickelten sich die Pflanzen dieser Gruppe langsamer und generierte schlussendlich weniger Biomasse. Dies legt die Vermutung nahe, dass ein Optimum für die Zugabe von Pflanzenkohle existiert und dass der Boden nicht beliebig viel Pflanzenkohle aufnehmen kann, ohne dass Bodenfunktionen beeinträchtigt werden. Der Versuch lässt vermuten, dass dieses Optimum zwischen den Kohlezugaben der Gruppen 3 und 4 liegt. Um dieses genauer zu ermitteln, wären in einem Folgeversuch das Wachstum mit verschiedenen Kohlemengen, die zwischen den zugegebenen Mengen der Gruppen 3 und 4 liegen, erneut zu untersuchen und zu bewerten.

Die Gruppe, welche unbehandelte Pflanzenkohle ohne Kompost erhalten hatte, entwickelte sich wie vermutet langsamer und am Ende des Versuchs wurde weniger Biomasse geerntet. Dass mit Kompost gemischte Pflanzenkohle zu besseren Resultaten führt als unbehandelte Pflanzenkohle, wurde auch von Fischer *et al.* (2012) erwähnt, wobei dieser Unterschied auf eine bessere Nährstoffverfügbarkeit, sowie eine vorgängige Besiedlung der Pflanzenkohle durch Mikroorganismen während des Mischens und Lagerns mit Kompost zurückgeführt wurde.

Auffällig war jedoch, dass die Blätter der Pflanzen der Gruppe 2 bedeutend dicker und gröber waren, sowie eine dunklere Färbung besaßen als diejenigen der anderen Gruppen, wie dies die Abbildung 21 veranschaulicht. Auch die Pflanzen der Gruppe 3, die schlussendlich mehr Biomasse generierten, hatten bedeutend feinere und hellere Blätter.



Abbildung 21: Pflanze der Gruppe 2 (links) und Pflanze der Gruppe 3 (rechts) am 23.10.2021 (Hohl, 2021)

---

Diese Auffälligkeit könnte auf einen Unterschied in der Nährstoffversorgung der Pflanzen zurückgehen. Die dunklere Färbung könnte aufgrund eines höheren Chlorophyll-gehalts bei den Pflanzen der Gruppe 2 zustande gekommen sein. Der Schluss liegt nahe, dass bei diesen Pflanzen die Nährstoffversorgung besser war, da Pflanzen typischerweise weniger Chlorophyll herstellen, wenn Nährstoffe begrenzt sind (Lüthi, persönliche Mitteilung). Diese Hypothese liesse sich mit einer Untersuchung der Blätter auf verschiedene Nährstoff- und Vitamingehalte untersuchen.

Weiterführend könnte dieser Mangel an Nährstoffen durch die Pflanzenkohle entstanden sein. Wenn das Adsorptionspotenzial der Kohle bei der Zugabe noch nicht ausgeschöpft war, könnte ein ähnlicher Effekt wie bei der Versuchsgruppe 1 aufgetreten sein. Die Pflanzenkohle hätte die im Substrat enthaltenen Nährstoffe aufgenommen, wodurch bei den Pflanzen nachfolgend ein Mangel entstand. Diese Vermutung könnte durch eine Untersuchung einzelner Kohlestücke auf deren Nährstoffgehalt am Anfang des Topfversuchs und nach einiger Verweilzeit im Substrat untersucht werden.

## 5.2. Schüttdichte

Vor dem Versuch wurden Werte gemessen, welche den Erwartungen entsprechen. Die Versuchsgruppen mit einer Kompostzugabe besaßen eine höhere Dichte als die Kontrolle, und mit wachsender Kohlezugabe wurde die Dichte immer weiter verringert. Dieser Effekt war sowohl bei den Proben mit Kompostzugabe, aber auch bei jenen ohne Kompostzusatz sichtbar. Das Resultat wird auf die geringe Dichte der Kohle selbst, aber auch auf eine Veränderung der gesamten Bodenstruktur zurückgeführt, wie dies beispielsweise von Ding *et al.* (2016) beschrieben wurde.

Interessanterweise waren jedoch nach dem Versuch zwei unterschiedliche Entwicklungstrends bei den Gruppen mit Kompostzugaben und den Gruppen ohne Kompost sichtbar. Bei den Gruppen 0 und 1 ohne Kompostzugabe wurden nach dem Versuch höhere Dichten gemessen worden, wobei die Gruppe 1 nach dem Versuch sogar einen höheren Wert aufwies als die Gruppe 0. Bei den Gruppen 2, 3 und 4 war über den Versuch eine Abnahme der Dichte sichtbar, wobei diese bei der Gruppe 3 am stärksten war.

Eine Veränderung der Bodendichte, wie bei den Gruppen 0 und 1 kann durch Veränderungen des Porenanteils auch auf natürliche Weise geschehen (Scheffer *et al.*, 2018; S. 224). Mit Bezug auf die Gruppe 1 könnten eine Alterung und ein damit einhergehender Zerfall der Pflanzenkohlepartikel ebenfalls eine Rolle gespielt haben. Obwohl nur wenige Studien zu Verwitterungsprozessen von Pflanzenkohle im Boden existieren, beschreiben Pignatello *et al.* (2015) einen Zerfall von Pflanzenkohlepartikeln in kleinere Bruchstücke. So könnte die Dichte durch die kleineren Partikel und die folglich kleineren Bodenzwischenräume erhöht worden sein.

---

### 5.3. Wasserkapazität

Die Erwartung einer steigenden Wasserkapazität wurde von den Messungen insofern unterstützt, dass für die Gruppen mit Kompost und Pflanzenkohle eine weit höhere Wasserkapazität festgestellt wurde. Wie vermutet war dieser Wert für die Gruppe 4 mit der grössten Zugabe an Pflanzenkohle am höchsten.

Die Gruppe 1 hatte vor dem Versuch jedoch eine tiefere Wasserkapazität als die Kontrolle. Eine Erklärung für einen ähnlicher Effekt wird von Masiello *et al.* (2015) beschrieben und mit Hilfe der Abbildung 22 erklärt. In dieser Publikation werden die erhaltenen Werte auf Veränderung von Räumen zwischen den Boden- und Pflanzenkohlepartikeln zurückgeführt, die je nach Boden und Kohle unterschiedliche Grössen aufweisen. Wenn die zugefügten Pflanzenkohlepartikel grösser sind als die enthaltenen Bodenkomponenten, führt dies zu einer Vergrösserung der Bodenzwischenräume, wodurch mehr Wasser gespeichert werden kann. Bei Bodenpartikeln, welche die Grösse der Pflanzenkohlestücke überschreiten, wird allerdings ein gegenteiliger Effekt bemerkbar, da die Kohle die enthaltenen Zwischenräume auffüllt (Masiello *et al.*, 2015). Diese Beobachtung legt nahe, dass die Partikel-grösse der Kontrolle grösser war als diejenige der Gruppe 2, die noch Kompost enthielt, und dass darum bei der Kontrolle anfänglich eine Verringerung der Wasserkapazität nach der Pflanzenkohlezugabe messbar war.

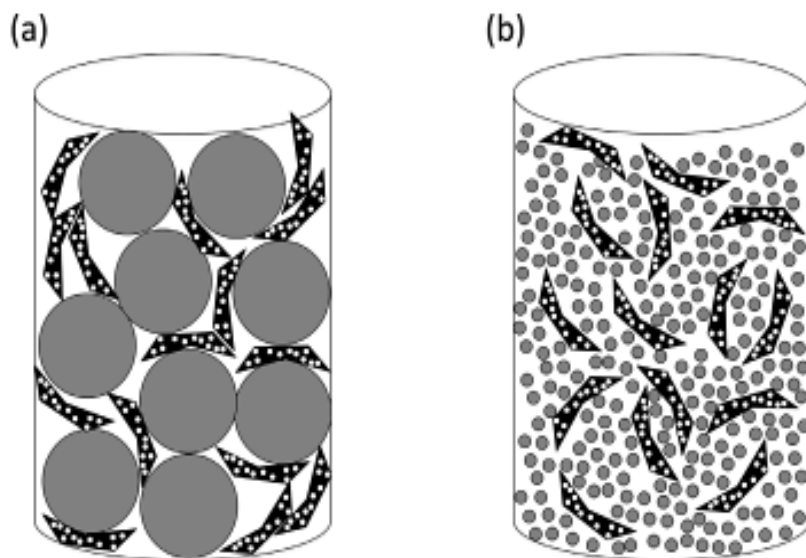


Abbildung 22: Bodenpartikel > Pflanzenkohlepartikel (a) und Bodenpartikel < Pflanzenkohlepartikel (b) (Masiello *et al.*, 2015)

---

Nach dem Versuch war besonders bei der Kontrolle ein tieferer Wert für die Wasserkapazität ermittelt worden als vor dem Versuch. Dies könnte auf die leichte Verdichtung zurückzuführen sein, die bei der Messung der Schüttdichte festgestellt wurde, da dichtere Böden durch den Verlust von Porenräumen vielfach weniger Wasser aufnehmen können (Scheffer *et al.*, 2018, S. 678). Ein gegenteiliger Effekt könnte auch für die Zunahme der Wasserkapazität über den Topfversuch bei der Gruppe 4 verantwortlich gewesen sein, wo eine Verringerung der Dichte über den Topfversuch gemessen wurde. Die Abnahme der Werte der Gruppen 2 und 3 über den Versuch stimmen allerdings nicht den gemessenen Werten der Schüttdichte überein. Der Grund für diese Abnahme ist vermutlich nicht auf eine Veränderung der Bodendichte zurückzuführen und müsste genauer untersucht werden.

#### 5.4. pH-Wert

Bei einer wachsenden Pflanzenkohlezugabe stieg der pH-Wert bei fast allen Gruppen linear an. Nach dem Versuch wurde bei der Gruppe 4, welche die grösste Menge an Pflanzenkohle erhalten hatte, ein weitaus höherer pH-Wert als bei den weiteren Gruppen festgestellt, und die Kontrolle wies den tiefsten pH-Wert auf. Einen solchen Effekt beobachteten auch Berek *et al.* (2011), wobei der pH-Wert eines sauren Bodens nach einer Zugabe von Pflanzenkohle erhöht und so dessen Qualität als Pflanzenstandort gefördert werden konnte.

Allerdings wurde bei der Gruppe 2, die nur Kompost erhalten hatte, ein grösserer Anstieg verzeichnet als bei der Gruppe 1, die mit unbehandelter Pflanzenkohle versetzt worden war. Für den verwendeten Kompost war ein pH-Wert von mindestens 7.5 für das Produkt angegeben worden. Wenn der Kompost einen höheren pH-Wert als den bei der Gruppe 2 gemessenen Wert von 8.01 hatte, könnte dieser zusammen mit der weniger basischen Erde einen pH-Wert von 8.01 ergeben haben. Diese Hypothese könnte in einem nächsten Schritt mit einer pH-Messung des Kompostes überprüft werden.

Ausserdem wurde bei allen Gruppen ein signifikanter Anstieg des pH-Wertes über den Topfversuch festgestellt. Dieser Effekt war auch bei der Kontrolle sichtbar und könnte dadurch erklärt werden, dass Redoxprozesse im Boden durch die Photosynthese von höheren Pflanzen angetrieben werden, da der Kohlenstoff aus dem aufgenommenen CO<sub>2</sub> dabei reduziert wird. Diese reduzierten Kohlenstoffverbindungen werden anschliessend von Bodenbakterien wieder zu CO<sub>2</sub> oxidiert, wobei Elektronen freigesetzt werden (Scheffer *et al.*, 2018; S. 201). Da so mehr Elektronen im Boden vorhanden sind, wird der pH-Wert erhöht (Kulli, persönliche Mitteilung). Eine Vermutung wäre nun, dass der Effekt der Pflanzenkohle auf den pH-Wert des Bodens nicht sofort, sondern erst nach einiger Verweilzeit im Boden bemerkbar wird. Diese Hypothese könnte mit pH-Messungen nicht nur vor und nach, aber auch während des Versuchs genauer untersucht werden.

---

## 5.5. Gesamtstickstoff

Vor dem Versuch wurden Gesamtstickstoffwerte gemessen, die alle sehr nahe beieinander lagen. Diese geringen Unterschiede hatten vermutlich nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Pflanzen und deren Wachstum.

Nach dem Versuch war die Abnahme bei der Kontrolle und der Gruppe 2, also den Gruppen ohne Kohlezugabe am grössten. Einerseits stammt diese Abnahme sicherlich durch den Verbrauch vom Stickstoff durch den Feldsalat, doch die Pflanzen der Gruppen 1, 3 und 4 benötigten ebenfalls Stickstoff, und dort war die Abnahme bedeutend geringer. Zusätzlich handelt es sich bei Feldsalat um einen sogenannten Schwachzehrer, der eher wenig Stickstoff benötigt (Gartenjournal, 2021). Folglich kann ausgeschlossen werden, dass die Abnahme allein durch den Pflanzenverbrauch zustande kam. Dieser zusätzliche Verlust von Stickstoff unterstützt die These, dass eine Auswaschung stattfand und Pflanzenkohle eine Auswaschung verhindern oder zumindest verringern kann. Ein weiterer Versuch, der diese These stützt, ist eine Untersuchung von Kamman *et al.* (2015). Diese hat ergeben, dass durch Pflanzenkohle eine bessere Stickstoffnutzung erzielt werden konnte und Stickstoffverluste durch Auswaschung minimiert werden konnten.

Auffällig war allerdings, dass die Gruppe 3 nach dem Versuch immer noch einen sehr grossen Gesamtstickstoffgehalt aufwies. Über den Versuch waren hier nur 0.02 % Stickstoff verloren gegangen oder verbraucht worden. Bei den Gruppen 1 und 4, die ebenfalls einen Pflanzenkohlezusatz erhalten hatten, war der Stickstoffverbrauch hingegen höher. Vermutet wird, dass der höhere Verbrauch der Gruppe 1 auf eine anfängliche Auswaschung während des Versuchs zurückzuführen sein könnte, da ein allfälliger Sorptionsprozess hier erst ab Beginn des Topfversuches starten konnte. Der grössere Verlust der Gruppe 4 hingegen widerspricht der Theorie, dass eine Sorption linear mit der Menge an zugegebener Pflanzenkohle steigt. Denn obwohl die Gruppe 4 bedeutend mehr Kohle als die Gruppe 3 erhalten hatte, war der Stickstoffverlust beinahe viermal grösser. Es wird daher vermutet, dass bei einer zu grösseren Menge an Pflanzenkohle die Kräfte, die auf den im Boden vorhandenen Stickstoff wirken, verändert werden, was zu diesen Werten geführt hat. Auch hier weisen die Daten auf ein Optimum bezüglich der verwendeten Menge an Pflanzenkohle hin, welches unbedingt noch genauer untersucht werden müsste, um die Effekte der Pflanzenkohle genauer zu verstehen und eine möglichst gewinnbringende Anwendung zu ermöglichen.

---

Diese Trends sind auch in den Messungen der zusätzlichen Fraktionen der Gruppen 1, 3 und 4 sichtbar. Die Pflanzenkohlepartikel der Gruppe 3 wiesen einen bedeutend grösseren Stickstoffgehalt auf als diejenigen der Gruppen 1 und 4 und über den Versuch wurde dieser Wert weiter erhöht. Diese zusätzliche Messung unterstützt die unter 10.1 aufgestellte Hypothese, dass der Sorptiosprozess zum Zeitpunkt der Verwendung des Substrats noch nicht abgeschlossen war, und die Pflanzenkohle auch während des Topfversuchs kontinuierlich Stickstoff aufgenommen hat. Dies könnte zu einem Nährstoffmangel und einer verringerten Menge an Chlorophyll geführt haben. Falls sich die Hypothese nach einer Nährstoffanalyse der Pflanzen bewahrheiten würde, müsste die Verweilzeit der Kohle im Kompost verlängert werden, um einen solcher Effekt zu verhindern.

## 5.6. Anteil organischer Masse

Entgegen der Erwartungen wiesen nicht die Proben mit Kompost- und Pflanzenkohlezugabe den grössten Anteil an organischer Masse auf, sondern die Kontrolle.

Bei den Versuchsgruppen 0, 1, 3 und 4 wurde eine Abnahme der organischen Masse im Vergleich zu den Proben, die vor dem Versuch genommen wurden, festgestellt. Dieser Verlust kann durch einen Abbau der organischen Substanz durch Mikroorganismen und den Pflanzen selbst erklärt werden (Ottow, 2011; S. 285). Einzig bei der Versuchsgruppe 2 wurde eine Zunahme über den Versuch festgestellt, was durch Aufbau von organischer Masse durch Mikroorganismen möglich wäre. Allerdings muss auch berücksichtigt werden, dass bei der Ausführung der Messungsserie für die ersten drei Proben der Fehler in der Verwendung der Abdampfschalen gemacht wurde, und dass darum von einer gewisse Ungenauigkeit ausgegangen werden muss. Eine solche Ungenauigkeit bei der ersten Messung wird als wahrscheinlicher angesehen.

Generell handelte es sich bei allen untersuchten Substraten um stark humose Böden, da sie einen Humusgehalt von weit über 8 % enthielten (Zum Unterrichten, 2021). Da dieser Grenzwert weit unter den ermittelten Werten liegt, kann davon ausgegangen werden, dass solch hohe Werte nicht üblich sind. Nach einem genaueren Nachforschen wurde schliesslich bemerkt, dass die verwendete Erde rein organisch war und kein mineralischer Bodenanteil vorhanden war. Daraus wurde geschlossen, dass kein gravierender Unterschied zwischen den Versuchsgruppen und den Pflanzen bemerkbar sein sollte, da grundsätzlich genug organische Substanz enthalten war, und diese keinen limitierenden Faktor darstellte. Auch Haubold-Rosar *et al.* (2016) beschrieben, dass vor allem bei Böden mit mangelhaften Eigenschaften Verbesserungen mit Pflanzenkohle erzielt werden können. Bei einem Versuch mit einem Ackerboden, der weniger organische Masse enthält, würde der Versuch vermutlich zu anderen Ergebnissen führen, da die organische Masse nicht im Überfluss vorhanden wäre. Dies könnte in einem Folgeversuch überprüft werden.

---

## 5.7. Weitere Forschungsmöglichkeiten

Zusätzlich zu den bereits erwähnten weiteren Untersuchungsmöglichkeiten könnte noch eine Reihe weiterer Versuche durchgeführt werden. Um aussagekräftige Resultate für die Landwirtschaft zu erhalten, müsste in einem nächsten Schritt versucht werden, die Wirkung der Pflanzenkohle nicht nur in einem Topfversuch, sondern in einer Feldstudie auf einem Ackerboden untersucht werden. Wenn in einem solchen Ackerversuch keine Setzlinge, sondern Samen verwendet würden, könnte auch der Einfluss von Pflanzenkohle auf das Keimverhalten untersucht werden.

Ebenfalls könnte das Wachstum von Pflanzen betrachtet werden, die eine längere Vegetationsperiode habe als der hier verwendete Feldsalat. Zusätzlich könnte eine Pflanzenkohle aus einer anderen Biomasse verwendet werden und untersucht werden, ob ähnliche Effekte messbar sind.

Die in dieser Arbeit festgestellten Veränderungen durch die Zugabe von Pflanzenkohle könnten auch spezifisch angewendet werden. Beispielsweise könnte versucht werden, mit Hilfe von Pflanzenkohle gezielt den pH-Wert eines zu sauren Bodens zu senken, um seine Qualität als Pflanzenstandort zu verbessern.

---

## 6. Schlussfolgerungen

1. Wie werden das Wachstum und die Entwicklung von gewöhnlichem Feldsalat durch die Zugabe von Kompost und Pflanzenkohle beeinflusst?

Die Versuche zeigen, dass Pflanzenkohle und Kompost tatsächlich ein Mittel zur Steigerung des Ertrags darstellen, und dass Pflanzen mit einer Kompost- und Pflanzenkohlezugabe mehr Biomasse generierten. Allerdings kann dieser Mehrertrag nicht linear mit der Menge an Pflanzenkohle gesteigert werden, da für die Menge an verwendeter Pflanzenkohle ein Optimum besteht, das noch genauer untersucht werden sollte. Die Verwendung unbehandelter Pflanzenkohle hingegen führt zu einer Verringerung des Wachstums und sollte darum vermieden werden.

2. Welchen Einfluss hat die Zugabe von Pflanzenkohle und Kompost auf verschiedene Bodeneigenschaften wie die Schüttdichte, die Wasseraufnahmekapazität, den pH-Wert und den Anteil organischer Masse?

Die Messungen der Schüttdichte ergaben, dass die Zugabe von Pflanzenkohle zu einer kurzfristigen Abnahme der Dichte, sowie zu einer kontinuierlichen Zunahme der Wasserkapazität bei steigender Menge an Pflanzenkohle führt. Der pH-Wert kann durch eine Zugabe von Pflanzenkohle und Kompost deutlich erhöht werden, wobei sich der Effekt bei längerer Verweilzeit der Kohle im Boden zusätzlich noch verstärkt. Pflanzenkohle könnte darum als bodenverbesserndes Mittel verwendet werden, um den pH-Wert versauerter Böden zu erhöhen. Eine eindeutige Veränderung des organischen Anteils aufgrund der Pflanzenkohle und des Komposts ist hingegen nicht erwiesen.

3. Sind allfällige Veränderungen des Pflanzenwachstums durch die Nährstoffverfügbarkeit des Nährstoffs Stickstoff zu erklären?

Durch Messungen des Gesamtstickstoffgehalts konnte gezeigt werden, dass die Pflanzenkohle zu einer Verringerung des Stickstoffverlustes führt und ein Mittel zur effizienteren Nutzung von Düngemitteln darstellen könnte. Doch auch in diesem Fall kann der Effekt nicht linear mit der Menge an Pflanzenkohle gesteigert werden, wodurch ein weiteres Optimum noch zu ermitteln ist. Jedoch besteht die Vermutung, dass Pflanzenkohle die Stickstoffversorgung von Pflanzen beeinträchtigen kann, da die Aufnahme von Stickstoff nach der Ausbringung andauern kann, was zu einem Mangel bei den Kulturpflanzen führen könnte. Die Menge an Stickstoff, die Pflanzenkohle aufnehmen kann, und die Dauer des Sorptionsprozesses müssen noch genauer untersucht werden, um einen solchen Effekt zu verhindern.



---

## Anhang I: Danksagung

Ein grosser Dank geht an

Matthias Beck für die Betreuung dieser Arbeit und die Unterstützung während des Arbeitsprozesses.

Dr. Beatrice Kulli Honauer für die Hilfe beim Versuchsaufbau sowie den Methoden für die anschliessenden Messungen und die Möglichkeit, diese in einem Labor an der ZHAW Wädenswil durchzuführen.

Rahel Wanner und Valentin Schmidt für die Betreuung an den Labor-Nachmittagen und bei der Durchführung der Experimente.

Martina Lüthi für die kritische Beurteilung der Planung des Versuchs und der Korrektur meiner Arbeit.

Martin Enderli, Bio-Landwirt, für die Hilfe bei der Themenfindung und der praktischen Durchführung des Versuchs.

Armin Steiner, meinen Nachbarn, für das Achtgeben auf die Pflanzen und die Weiterführung der Bilderserie des Feldsalates während der Ferien.

---

## Anhang II: Erster Versuchsaufbau

Ursprünglich war eine Versuchsreihe mit Maispflanzen mit drei verschiedenen Versuchsgruppen vorgesehen. Die Pflanzung der zugehörigen Maissetzlinge erfolgte im Juni 2021. Den Pflanzen wurden verschiedene Anteile von Kompost und darin mitkompostierter Pflanzenkohle zugesetzt und geplant war, die Auswirkungen auf deren Wachstum zu untersuchen. Einige Monate später stellte sich jedoch heraus, dass das Konzept fehlerhaft war. Die verwendeten Materialien, die verschiedenen Komposte und auch die mitkompostierten Pflanzenkohlen stammten aus unterschiedlichen Quellen, wodurch eine Gleichheit der Bedingungen und eine Aussagekräftigkeit des Versuchs nicht gewährleistet war. Aufgrund dieser Mängel wurde die Entscheidung getroffen, einen neuen Versuchsaufbau zu entwickeln und diese Fehler zu beheben. Mit den neu gewonnenen Erkenntnissen und einer anschließenden Kontrolle durch Beatrice Kulli der ZHAW wurde der neue Versuchsaufbau konzipiert und erfolgreich umgesetzt.



Abbildung 23: Maispflanzen aus der ersten Versuchsanordnung (Hohl, 2021)

---

## Anhang III: Literaturverzeichnis

Baltisberger, Matthias *et al.*, Systematische Botanik, Zürich, VdF Hochschulverlag, 2013, 4. Auflage

Bassler, David, Einsatzmöglichkeiten aufgeladener Pflanzenkohle als Langzeitdünger bei Weisskohl, Wädenswil, ZHAW Wädenswil, 2017

Bates, Albert *et al.*, Cool Down, München, oekom Verlag, 2021

Bates, Albert, The Biochar Solution, Gabriola Island, new society publishers, 2021

Batista, Estela *et al.*, «Effect of surface and porosity of biochar on water holding capacity aiming indirectly at preservation of the Amazon biome», in: Scientific Reports, Volume 8, White, Richard, London, 2018, S. 1 - 9

Berek, Arnoldus Klau *et al.*, Beneficial Use of Biochat To Correct Soil Acidity, Berlin, ResearchGate, 2011

Blum, Winfried E. H. *et al.*, Bodenkunde in Stichworten, Stuttgart, Gebr. Borntraeger, 2012, 7. Auflage

Brockamp, Rachel *et al.*, «Chapter 8 – Biochar amendments show potential for restoration of degraded, contaminated, and infertile soils in agricultural and forested landscapes», in: Soils and Landscape Restoration, Stanturf, John A., Cambridge, Academic Press, 2021, S. 209 - 236

Boateng, Akwasi A. *et al.*, «Biochar production technology», in: Biochar for Environmental Management, Lehmann, Johannes, New York, Routledge, 2015, 2. Auflage, S. 63 - 88

Brown, Robert *et al.*, «Fundamentals of biochar production», in: Biochar for Environmental Management, Lehmann, Johannes, New York, Routledge, 2015, 2. Auflage, S. 39 - 62

Brusseau, Mark L. *et al.*, Environmental and Pollution Science, Amsterdam, Academic Press, 2019

Chia, Chee H. *et al.*, «Characteristics of biochar: physical and structural properties», in: Biochar for Environmental Management, Lehmann, Johannes, New York, Routledge, 2015, 2. Auflage, S. 89 - 110

DeLuca, Thomas *et al.*, «Biochar effects on soil nutrient transformations», in: Biochar for Environmental Management, Lehmann, Johannes, New York, Routledge, 2015, 2. Auflage, S. 421 - 454

Ding, Yang *et al.*, «Biochar to improve soil fertility. A review», in: Agron. Sustain. Dev., Nr. 36, 2017, INRA, Paris, Springer-Verlag France, 2016, S. 1 - 18

EBF, European Biochar Certificate - Guidelines for a Sustainable Production of Biochar, Arbaz, European Biochar Foundation, 2016

Fischer, Daniel *et al.*, «Synergisms between compost and biochar for sustainable soil amelioration», in: Management of Organic Waste, Sunil, Kumar *et al.*, Rijeka, InTech, 2012, S. 167 - 198

---

---

Gartenjournal, «Feldsalat düngen und als Dünger nutzen», 2021,

<https://www.gartenjournal.net/feldsalat-duengen>, 21.11.2021

Glaser, Bruno *et al.*, «State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (terra preta de Índio)», in: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Volume 82, Catalano, Jeffrey, Amsterdam, Elsevier, 2012, S. 39 - 51

Glaser, Bruno *et al.*, «The «Terra Preta» phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics», in: *Naturwissenschaften*, Nr. 88, Waltert, Matthias, Cham, Springer Verlag, 2001, S. 37 - 41

Glaser, Bruno, «Chapter II: Biochar as soil amendment – Facts and myths», in: *Terra Preta Sanitation 1*, DBU, Osnabrück, DBU, 2015, S. 30 - 59

Hagemann, Nikolas *et al.*, «Nitrate capture and slow release in biochar amended compost and soil», in: *PLOS ONE*, 12(2), 2017, o. S.

Haubold-Rosar, Michael *et al.*, Chancen und Risiken des Einsatzes von Biokojle und anderer «veränderter» Biomasse als Bodenhilfsstoffe oder für die C-Sequestrierung in Böden, Dessau-Rosslau, Umweltbundesamt, 2016

Ippolito, James A. *et al.*, «Biochar elemental composition and factors influencing nutrient retention», in: *Biochar for Environmental Management*, Lehmann, Johannes, New York, Routledge, 2015, 2. Auflage, S. 139 - 164

Kaltschmitt, Martin *et al.*, *Energie aus Biomasse*, Berlin, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2009, 2. Auflage

Kamman, Claudia I. *et al.*, «Plant growth improvement mediated by nitrate capture in composted biochar», in: *Scientific Reports*, Nr. 5, White, Richard, London, Nature, 2015, S. 1 - 13

Kleber, Markus *et al.*, «Characteristics of biochar: macro-molecular properties», in: *Biochar for Environmental Management*, Lehmann, Johannes, New York, Routledge, 2015, 2. Auflage, S. 111 - 138

Koerber, Karl von *et al.*, *Globale Nahrungssicherung für eine wachsende Weltbevölkerung – Flächenbedarf und Klimarelevanz sich wandelnder Ernährungsgewohnheiten*, Basel, Birkhäuserverlag, 2009

Laird, David *et al.*, «Biochar effects on Nutrient Leaching», in: *Biochar for Environmental Management*, Lehmann, Johannes, New York, Routledge, 2015, 2. Auflage, S. 521 - 542

LECO, «TruSpec Micro», <https://www.leco.com/product/truspec-micro>, 26.11.2021

---

- 
- Lehmann, Johannes *et al.*, «Chapter 7: Nutrient Leaching», in: Trees, Crops and Soil Fertility – Concepts and Research Methods, Schrotz, Götz, Wallingford, CABI Publishing, 2003, S. 151 - 166
- Lehmann, Johannes *et al.*, «Biochar for environmental management: an introduction», in: Biochar for Environmental Management, Lehmann, Johannes, New York, Routledge, 2015, 2. Auflage, S. 1 - 14
- Mandpe, Ashootosh *et al.*, «Composting: A Sustainable Route for Processing of Biodegradable Waste in India», in: Organic Waste Composting through Nexus Thinking, Hettiarachichi, Hiroshan, Cham Springer Nature Switzerland, 2020, S. 39 - 60
- Masiello, Caroline A. *et al.*, «Biochar effects on soil hydrology», in: Biochar for Environmental Management, Lehmann, Johannes, New York, Routledge, 2015, 2. Auflage, S. 543 - 562
- Ottow, Johannes C.G., Mikrobiologie von Böden, Berlin, Springer, 2011
- Pignatello, Joseph J. *et al.*, «Evolution of biochar properties in soil», in: Biochar for Environmental Management, Lehmann, Johannes, New York, Routledge, 2015, 2. Auflage, S. 195 - 234
- Quicker, Peter *et al.*, Biokohle, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2016
- Radloff, Sophia, Modellgestützte Bewertung der Nutzung von Biokohle als Bodenzusatz in der Landwirtschaft, Karlsruhe, KIT Scientific Publishing, 2016, Produktion und Energie
- Scheffer, Fritz *et al.*, Lehrbuch der Bodenkunde, Berlin, Springer Spektrum, 2018, 17. Auflage
- Schmidt, Hans-Peter *et al.*, «Mit Pflanzenkohle das Klima schützen», 24.6.2021, <https://www.agrarforschungschweiz.ch/2021/06/mit-pflanzenkohle-das-klima-schuetzen/>, 14.10.2021
- Schmidt, Hans-Peter, «Schweiz bewilligt Pflanzenkohle zur Bodenverbesserung», 4.5.2013, <http://www.ithaka-journal.net/schweiz-bewilligt-pflanzenkohle-zur-bodenverbesserung>, 14.10.2021
- Schulz, Hardy *et al.*, «Positive effects of composted biochar on plant growth and soil fertility», in: Agronomy for Sustainable Development, Volume 33, issue 4, 2013, S. 817 - 827
- Shaxson, Francis *et al.*, «Optimizing soil moisture for plant production - The significance of soil porosity», in: FAO soil bulletins, Nr. 79, 2003, S. 4 - 129
- Thies, Janice E. *et al.*, «Biochar effects on the abundance, activity and diversity of the soil biota», in: Biochar for Environmental Management, Lehmann, Johannes, New York, Routledge, 2015, 2. Auflage, S. 327 - 390
- Wagner, Otto *et al.*, Kompostierung – Neue Betrachtung einer alten Technik, Berlin, Researchgate, 2004
-

---

Waters, David *et al.*, «Biochar in Soil for Climate Change Mitigation and Adaptation», in: Soil Health and Climate Change, Nr. 29, Pal Singh, Bhupinder, Berlin, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, S. 345 - 368

Zum Unterrichten, «Wir bestimmen den Humusanteil einer Bodenprobe durch Glühen», 2019, [https://unterrichten.zum.de/wiki/Wir erforschen den Boden/Wir bestimmen den Humusanteil einer Bodenprobe durch Glühen](https://unterrichten.zum.de/wiki/Wir_erforschen_den_Boden/Wir_bestimmen_den_Humusanteil_einer_Bodenprobe_durch_Gl%C3%BChen), 7.11.2021

---

## Anhang IV: Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Typische Profile einer Terra Preta (a) und eines verwitterten Urwaldbodens (b) (Glaser <i>et al.</i> , 2001).....	5
Abbildung 2: Elektronenmikroskopische Aufnahme von Pflanzenkohlensampeln bei verschiedenen Vergrößerungen. (CR=Holzkohle; CS=Kokosnussschalen; OP=Orangenschale; PO=Palmöl; SB=Zuckerrohr-Bagasse; WH=Wasserhyazinthe).....	8
Abbildung 3: Beteiligte Mechanismen an der Bindung von Nährstoffen an Pflanzenkohlepartikel (Laird <i>et al.</i> , 2015).....	12
Abbildung 4: Verwendetes 2 mm Sieb (Hohl, 2021) .....	20
Abbildung 5: Aufbau zur Messung der pH-Werte .....	20
Abbildung 6: Kugelmühle (Hohl, 2021).....	21
Abbildung 8: Vorbereitete Proben für die Stickstoffmessung (Hohl, 2021) .....	21
Abbildung 7: Einwägen der Proben in Aluschiffchen (Hohl, 2021) .....	21
Abbildung 9: Feldsalat am 11.10.2021 (Hohl, 2021) .....	23
Abbildung 10: Feldsalat am 3.10.2021 (Hohl, 2021) .....	23
Abbildung 11: Feldsalat am 23.10.2021 (Hohl, 2021).....	24
Abbildung 12: Feldsalat am 30.10.2021 (Hohl, 2021).....	24
Abbildung 13: Durchschnittswerte der unbehandelten Biomasse nach dem Topfversuch (Hohl, 2021) .....	25
Abbildung 14: Durchschnittswerte der getrockneten Biomassen nach dem Topfversuch (Hohl, 2021) .....	26
Abbildung 15: Schüttdichten der verschiedenen Versuchsgruppen vor und nach dem Topfversuch (Hohl, 2021).....	27
Abbildung 16: Wasserkapazitäten der verschiedenen Versuchsgruppen vor und nach dem Topfversuch (Hohl, 2021).....	28
Abbildung 17: Durchschnittswerte der pH-Messungen der Versuchsgruppen vor und nach dem Versuch (Hohl, 2021).....	29
Abbildung 18: Durchschnittswerte des Stickstoffgehalts der Proben < 2 mm vor und nach dem Versuch (Hohl, 2021).....	30

---

Abbildung 19: Durchschnittswerte des Stickstoffgehalts der Proben > 2 mm vor und nach dem Versuch (Hohl, 2021).....	31
Abbildung 20: Anteil der organischen Masse der Versuchsgruppen vor und nach dem Topfversuch (Hohl, 2021).....	32
Abbildung 21: Pflanze der Gruppe 2 (links) und Pflanze der Gruppe 3 (rechts) am 23.10.2021 (Hohl, 2021).....	33
Abbildung 22: Bodenpartikel > Pflanzenkohlepartikel (a) und.....	35
Abbildung 23: Maispflanzen aus der ersten Versuchsanordnung (Hohl, 2021) .....	42



---

## Anhang V: Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Versuchsgruppen des Topfversuchs (Hohl, 2021) .....	15
Tabelle 2: Auswertung der unbehandelten Biomasse (Hohl, 2021) .....	25
Tabelle 3: Auswertung der Schüttdichte vor und nach dem Versuch (Hohl, 2021) .....	27
Tabelle 4: Auswertung der Wasserkapazität vor und nach dem Versuch (Hohl, 2021) .....	28
Tabelle 5: Auswertung der pH-Werte vor und nach dem Versuch (Hohl, 2021) .....	29
Tabelle 6: Auswertung des Gesamtstickstoffgehaltes (Partikelgrösse < 2mm) (Hohl, 2021) .....	30
Tabelle 7: Auswertung des Gesamtstickstoffgehaltes (Partikelgrösse > 2mm) (Hohl, 2021) .....	31
Tabelle 8: Auswertung der organischen Masse (Hohl, 2021) .....	32

---

## Anhang VI: Rohdaten

### I. Biomasse: Blätter

Pflanze	Biomasse unbehandelt (in g)	Biomasse getrocknet (in g)
Gruppe 0; Pflanze 1	1.85	0.187
Gruppe 0; Pflanze 2	1.614	0.197
Gruppe 0; Pflanze 3	2	0.228
Gruppe 1; Pflanze 1	1.333	0.155
Gruppe 1; Pflanze 2	1.117	0.141
Gruppe 1; Pflanze 3	1.558	0.186
Gruppe 2; Pflanze 1	2.971	0.331
Gruppe 2; Pflanze 2	2.965	0.305
Gruppe 2; Pflanze 3	4.672	0.525
Gruppe 3; Pflanze 1	3.658	0.463
Gruppe 3; Pflanze 2	3.349	0.413
Gruppe 3; Pflanze 3	3.936	0.477
Gruppe 4; Pflanze 1	3.266	0.367
Gruppe 4; Pflanze 2	2.858	0.347
Gruppe 4; Pflanze 3	3.125	0.423

II. Schüttdichte und Wasserkapazität

Versuchsgruppe	Masse Gefäss (g)	Masse Substrat + Gefäss (g)	Masse Substrat (g)	Schüttvolumen (cm <sup>3</sup> )	Schüttdichte	Total zurückgehaltenes Wasser + Substrat (g)	Total zurückgehaltenes Wasser (g)	Wasserkapazität
Gruppe 0 v	111.74	190.11	78.37	250	<b>0.31348</b>	324.01	133.9	<b>54%</b>
Gruppe 1 v	111.89	184.39	72.5	250	<b>0.29</b>	312.89	128.5	<b>51%</b>
Gruppe 2 v	123.38	234.43	111.05	250	<b>0.4442</b>	380.69	146.26	<b>59%</b>
Gruppe 3 v	124.85	229.36	104.51	250	<b>0.41804</b>	385.45	156.09	<b>62%</b>
Gruppe 4 v	185.15	286.48	101.33	250	<b>0.40532</b>	447.9	161.42	<b>65%</b>
Gruppe 0 n	111.72	192.04	80.32	250	<b>0.32128</b>	311.69	119.65	<b>48%</b>
Gruppe 1 n	111.81	194.55	82.74	250	<b>0.33096</b>	330.12	135.57	<b>54%</b>
Gruppe 2 n	123.34	225.51	102.17	250	<b>0.40868</b>	361.24	135.73	<b>54%</b>
Gruppe 3 n	124.82	219.6	94.78	250	<b>0.37912</b>	372.77	153.17	<b>61%</b>
Gruppe 4 n	185.15	284.5	99.35	250	<b>0.3974</b>	457.95	173.45	<b>69%</b>

---

### III. pH-Werte

Versuchsgruppe	Messwert Nr.1	Messwert Nr. 2	Durchschnittswert pH-Wert
Gruppe 0 v	7.64	7.68	7.66
Gruppe 1 v	7.72	7.83	7.775
Gruppe 2 v	8.01	8.01	8.01
Gruppe 3 v	7.93	8.01	7.97
Gruppe 4 v	8.02	8.02	8.02
Gruppe 0 n	7.8	-	7.8
Gruppe 1 n	7.84	7.89	7.865
Gruppe 2 n	8.03	8.16	8.095
Gruppe 3 n	8.1	8.09	8.095
Gruppe 4 n	8.24	8.22	8.23

#### IV. CHN-Analyse

Name	Einwaage [g]	Ctot [%]	Htot [%]	Ntot [%]	Datum	Methode
rot v < 2mm	0.1015	23.80	2.93	1.42	11/15/2021 1:40:36 PM	total Gehalte 950C Jan20
rot v < 2mm	0.1015	24.00	3.03	1.36	11/15/2021 1:45:48 PM	total Gehalte 950C Jan20
rot n < 2mm	0.1032	21.10	2.71	1.18	11/15/2021 1:51:00 PM	total Gehalte 950C Jan20
rot n < 2mm	0.1039	21.30	2.74	1.24	11/15/2021 1:56:11 PM	total Gehalte 950C Jan20
schwarz v < 2mm	0.101	26.10	3.15	1.44	11/15/2021 2:01:22 PM	total Gehalte 950C Jan20
schwarz v < 2mm	0.1021	25.80	3.13	1.41	11/15/2021 2:06:34 PM	total Gehalte 950C Jan20
schwarz n < 2mm	0.1024	25.10	2.98	1.31	11/15/2021 2:22:08 PM	total Gehalte 950C Jan20
schwarz n < 2mm	0.1038	25.40	3.00	1.34	11/15/2021 2:27:19 PM	total Gehalte 950C Jan20
violett v < 2mm	0.1041	20.00	2.56	1.48	11/15/2021 3:14:03 PM	total Gehalte 950C Jan20
violett v < 2mm	0.1042	19.90	2.56	1.35	11/15/2021 3:19:14 PM	total Gehalte 950C Jan20
violett n < 2mm	0.1027	19.80	2.48	1.35	11/15/2021 3:03:40 PM	total Gehalte 950C Jan20
violett n < 2mm	0.1035	19.70	2.45	1.22	11/15/2021 3:08:51 PM	total Gehalte 950C Jan20
blau v < 2mm	0.101	23.90	2.94	1.44	11/15/2021 2:53:17 PM	total Gehalte 950C Jan20
blau v < 2mm	0.1035	23.90	2.95	1.43	11/15/2021 2:58:28 PM	total Gehalte 950C Jan20
blau n < 2mm	0.1024	23.20	2.70	1.39	11/15/2021 3:34:47 PM	total Gehalte 950C Jan20
blau n < 2mm	0.1044	23.00	2.69	1.43	11/15/2021 3:39:59 PM	total Gehalte 950C Jan20
gruen v < 2mm	0.1012	23.30	2.59	1.39	11/15/2021 2:42:54 PM	total Gehalte 950C Jan20
gruen v < 2mm	0.1049	23.50	2.63	1.38	11/15/2021 2:48:05 PM	total Gehalte 950C Jan20
gruen n < 2mm	0.1	21.70	2.38	1.27	11/15/2021 3:24:25 PM	total Gehalte 950C Jan20
gruen n < 2mm	0.1005	22.00	2.39	1.35	11/15/2021 3:29:36 PM	total Gehalte 950C Jan20

Name	Einwaage [g]	Ctot [%]	Htot [%]	Ntot [%]	Datum	Methode
schwarz v > 2mm	0.1027	26.30	3.33	1.30	11/15/2021 2:11:45 PM	total Gehalte 950C Jan20
schwarz v > 2mm	0.103	27.50	3.44	1.28	11/15/2021 2:16:56 PM	total Gehalte 950C Jan20
schwarz n > 2mm	0.1019	31.40	3.48	1.19	11/15/2021 2:32:31 PM	total Gehalte 950C Jan20
schwarz n > 2mm	0.1042	31.40	3.52	1.28	11/15/2021 2:37:43 PM	total Gehalte 950C Jan20
blau v > 2mm	0.0991	24.00	3.65	1.57	11/22/2021 9:45:24 AM	total Gehalte 950C Jan20
blau v > 2mm	0.1005	24.20	3.63	1.45	11/22/2021 9:50:36 AM	total Gehalte 950C Jan20
blau n > 2mm	0.1002	27.70	3.47	1.65	11/22/2021 9:35:00 AM	total Gehalte 950C Jan20
blau n > 2mm	0.1001	27.80	3.50	1.69	11/22/2021 9:40:12 AM	total Gehalte 950C Jan20
gruen v > 2mm	0.1006	31.90	3.77	1.37	11/22/2021 9:55:47 AM	total Gehalte 950C Jan20
gruen v > 2mm	0.1008	32.40	3.77	1.34	11/22/2021 10:00:58 AM	total Gehalte 950C Jan20
gruen n > 2mm	0.1001	32.40	3.43	1.30	11/22/2021 10:06:09 AM	total Gehalte 950C Jan20
gruen n > 2mm	0.1024	32.30	3.43	1.23	11/22/2021 10:11:21 AM	total Gehalte 950C Jan20

---

VI. Anteil an organischer Masse

Versuchsgruppe	Gewicht getrocknete Probe (g)	Gewicht getrocknete Probe nach Glühen (g)	Anteil organischer Masse (%)
Gruppe 0 v	37.108	19.419	47.669
Gruppe 1 v	38.373	20.116	47.578
Gruppe 2 v	36.718	22.36	39.049
Gruppe 3 v	36.13	22.557	37.567
Gruppe 4 v	34.91	18.371	47.376
Gruppe 0 n	24.583	13.119	46.634
Gruppe 1 n	25.781	14.967	41.946
Gruppe 2 n	26.436	16.935	35.937
Gruppe 3 n	29.155	17.699	39.294
Gruppe 4 n	30.102	18.413	38.831