



HOCHSCHULE RUHR WEST
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Abschlussbericht:
**Torfsubstitution durch den Einsatz von carbonisierter
Biomasse vorrangig aus Landschaftspflegematerial als
Substratzuschlagstoff**

Projektnummer: AZ 29695
Projektzeitraum: 01.03.2012-29.02.2014

Projektleiter:

Hochschule Ruhr West
Prof. Dr.-Ing. M. Rehm
Institutsleiter Energiesysteme und Energiewirtschaft
Tel.: +49 208 88254-837
Email: marcus.rehm@hs-ruhrwest.de

Mitarbeiter:

Dipl.-Ing. (FH) Julian Schwark
Dipl.-Ing (FH) Anke Schwark

Projektpartner:



Lehr- und Versuchsanstalt für Gartenbau Ahlem (LVG)

Herr Emmel, Versuchswesen Zierpflanzen, Diagnose

gefördert durch



www.dbu.de

Kontaktdaten: Prof. Dr.-Ing. Marcus Rehm
Institut Energiesysteme und Energiewirtschaft

Hochschule Ruhr West
Mellinghofer Straße 55
45473 Mülheim an der Ruhr

Zum Institut: Entwicklung in den Bereichen:

- Thermische Energiesysteme:
 - Kraftwärmekopplung sowie Nahwärme und -kälte mit geringen Leistungen
 - Nutzung der Solarstrahlung für die Niedertemperatur-Prozesswärme und Stromerzeugung
 - Hydrothermale Carbonisierung (HTC, Biokohle)
- Elektrische Energiesysteme:
 - Elektromobilität und Photovoltaik mit optimierten Ladestrategien und optimiertem Energiemanagement
 - Moderne Kommunikationsinfrastruktur in der Energieversorgung (z.B. Mobilfunknetze der 4. Generation)
 - Dezentral verteilte Netze (virtuelle Kraftwerke)
- Energiekonzepte:
 - Planungen für einen Zero-Emission-Campus
 - Simulationstechnik und –modelle zur Verbesserung der Energieeffizienz
- Marktentwicklung und Energieeffizienz
 - Politikinstrumente, z.B. Standardsetzung innerhalb der Ökodesign-Richtlinie
 - Energieeffizienz-Dienstleistungen

Projektleistungen:

- Projektleitung, Budgetierung, Projektplanung
- Durchführen der Versuche
- Auswertung der Ergebnisse
- Schnittstelle und Projektkoordination
- Durchführen von brennstoffspezifischen Analysen

Kontaktdaten: Landwirtschaftskammer Niedersachsen
Lehr- und Versuchsanstalt für Gartenbau Ahlem
Heisterbergallee 12
30453 Hannover

Email: michael.emmel@lwk-niedersachsen.de

Zur Versuchsanstalt: Rechtsform: Körperschaft des öffentlichen Rechts

Forschungsgebiete:

- Kulturverfahren für Zierpflanzen
 - Gewächshausklima
 - Substrate und Düngung
 - abiotische Schadursachen
-

Projektleistung:

- Planung, Anlage und Auswertung von pflanzenbaulichen Versuchen mit Substraten, die unterschiedliche Mengen carbonisierter Biomasse enthalten. An drei verschiedenen Pflanzenarten wird die Eignung dieser Substrate für den Einsatz im Zierpflanzenbau und Topfkräuteranbau geprüft.
- Laboruntersuchung verschiedener carbonisierter Biomassen, insbesondere hinsichtlich des Stickstoffhaushaltes und der mikrobiellen Aktivität

Neben dem Antragsteller der Hochschule Ruhr West und dem Projektpartner der Lehr- und Versuchsanstalt in Ahlem haben sich die Firmen Klasmann-Deilmann GmbH sowie die Revatec GmbH beteiligt. Revatec hat die für die Arbeiten notwendigen Carbonisierungsanlagen zur Verfügung gestellt. Von seitens der Klasmann-Deilmann GmbH wurden Analysenkosten übernommen und Tastversuche durchgeführt. Weiterhin konnte durch die Beteiligung der Klasmann-Deilmann GmbH der notwendige Praxisbezug zur Torf verarbeitenden Industrie sowie des Erwerbsgartenbaus sichergestellt werden.

Abstract

In diesem Forschungsprojekt wurde mit den beteiligten Partnern geprüft, ob es möglich ist, aus heimischer Biomasse vorrangig aus Landschaftspflegematerial ein Torfsubstitut für den Erwerbsgartenbau herzustellen. Hierzu wurden neben der verfahrenstechnischen Umsetzung mittels vapo-thermale Carbonisierung Auffaserungsversuche mit Landschaftspflegematerial statt. Bei der vapo-thermalen Carbonisierung erfolgt die Umsetzung nicht im Wasserbad, sondern in einer Dampf-atmosphäre. Der Wärmetransport erfolgt ebenfalls mittels Dampf.

Gartenbaulich überzeugte keines der eingesetzten Edukte respektive der Konversionsverfahren. Beide Verfahren führen beim Material zur Schimmelbildung und/oder Unterversorgung mit Stickstoff. Darüber hinaus treten zum Teil bei Verwendung von carbonisiertem Material weitere Schadbilder an den Testpflanzen auf. Alle Punkte verhindern die gartenbauliche Verwendung. Aufgrund wirtschaftlicher Gesichtspunkte wurden weitere Nachbehandlungsmethoden des carbonisierten Materials wie beispielsweise die Kompostierung ausgeschlossen.

Da der Einsatz im Kultursubstrat ausgeschlossen werden konnte, wurde weiterhin geprüft, ob durch die Carbonisierung des Landschaftspflegematerials ein hochwertiger biogener Brennstoff hergestellt werden kann, der im Einklang mit den jeweiligen Landschaftspflegezielen produziert werden könnte.

Inhaltsverzeichnis

1. EINFÜHRUNG	1
2. GLIEDERUNG DES PROJEKTS	2
3. ARBEITSPAKET 1: VERSUCHSAUFBAU UND EDUKTAKQUISE	3
3.1 Carbonisierung	3
3.2 Versuchsanlagen.....	5
3.3 Landschaftspflegematerial.....	8
4. UNTERSUCHUNGSPARAMETER	9
4.1 Pflanzenbauliche Parameter	9
4.2 Brennstoffspezifische Parameter	10
5. ARBEITSPAKET 2: ERGEBNISSE DES SCREENINGS SOWIE UNTERSUCHUNGEN ZUM ANLAGENEINFLUSS	11
5.1 Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Materialien.....	11
5.1.1 Versuchsparameter	11
5.1.2 Ergebnisse der Biotests	12
5.1.3 Analyseergebnisse des Produktes	17
5.1.4 Fazit	19
5.2 Untersuchungen zum Einfluss der Anlage und des Verfahrens	20
5.2.1 Versuchsparameter	20
5.2.2 Ergebnisse der Biotests	20
5.2.3 Analyseergebnisse des Produktes	22
5.2.4 Fazit	23
5.3 Fazit des Arbeitspakets 2 und weiteres Vorgehen.....	24
6. ARBEITSPAKET 3: ERUIEREN DES EINFLUSSES DER PROZESSPARAMETER AUF DIE PRODUKTEIGENSCHAFTEN SOWIE UNTERSUCHUNGEN ZUR REPRODUZIERBARKEIT DER VERSUCHE	25
6.1 Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit	25
6.1.1 Versuchsparameter	25
6.1.2 Ergebnisse der Biotests	25
6.1.3 Analyseergebnisse des Produktes	27
6.1.4 Fazit	28
6.2 Untersuchungen zum Einfluss der Temperatur und Zeit bei Einsatz von Landschaftspflegematerial..	29
6.2.1 Versuchsparameter	29
6.2.2 Ergebnisse der Biotests	29

6.2.3	Analyseergebnisse des Produktes	33
6.2.4	Fazit	34
6.3	Untersuchungen zum Einfluss der Temperatur und Zeit bei Einsatz von pflanzlichem Gärrest.....	35
6.3.1	Versuchsparameter	36
6.3.2	Ergebnisse der Biotests	36
6.3.3	Analyseergebnisse des Produktes	40
6.3.4	Fazit	44
6.4	Fazit des Arbeitspaketes 3 und weiteres Vorgehen.....	45
7.	REDUZIERUNG DES POTENZIALS ZUR BILDUNG VON SCHIMMEL	46
7.1	Versuchsdurchführung.....	46
7.2	Ergebnisse der Biotests.....	47
7.3	Fazit	51
8.	VERSUCHE MIT UNBEHANDELTEM LANDSCHAFTSPFLEGEMATERIAL ALS SUBSTRATZUSCHLAGSTOFF	52
8.1	Versuchsdurchführung.....	52
8.2	Ergebnisse der Biotests.....	56
8.3	Ergebnisse weiterer Analysen	61
8.4	Fazit	63
9.	ENERGETISCHE BEWERTUNG DES CARBONISIERTEN MATERIALS	65
9.1	Ergebnisse der brennstoffspezifischen Untersuchung.....	68
9.2	Ergebnisse zur Herstellung von Briketts	76
9.3	Fazit energetische Bewertung.....	79
10.	FAZIT DES GESAMTEN PROJEKTES.....	81
	LITERATURVERZEICHNIS	I
	ANHANG A: BEURTEILUNGSKRITERIEN DER BIOTESTS - BONITUR.....	III
	ANHANG B: BEWERTUNGSSYSTEM	IV
	ANHANG C: SUBSTRATSPEZIFISCHE ANALYSEN	V
	ANHANG D: BRENNSTOFFSPEZIFISCHE ANALYSEN	VII

1. Einführung

In der Substratherstellung spielt Torf aufgrund seiner chemisch-physikalischen Eigenschaften eine zentrale Rolle. Demgegenüber steht: Torf ist ein endlicher fossiler Rohstoff bei dessen Zersetzung Treibhausgase emittiert und Lebensräume für Tiere und Pflanzen irreversibel verändert werden. Bisher wurde jedoch kein ökologisch und ökonomisch sinnvolles Substitut gefunden.

Jährlich werden in der EU 67 Mio. m³ Torf abgebaut, wovon etwa 37 Mio. m³ für Kultursubstrate und Blumenerden verwendet werden (1). Durch den Abbau von Torf wird die viele Jahrhunderte aufgebaute und langfristig gespeicherte Biomasse in Form von Kohlendioxid freigesetzt und trägt hierdurch zur globalen Erwärmung bei.

Neben Hochmoortorf findet Kompost auf Basis von kompostierten Grünabfällen in den Substraten Verwendung. Der Einsatz von Rindenumus ist rückläufig, da Baumrinde auch für die Energiegewinnung eingesetzt wird. Mit dem Rohstoff Holz in Kultursubstraten liegen seit über 20 Jahren positive Erfahrungen vor, wobei in der Regel mechanisch vorbehandelte Holzhackschnitzel verwendet werden. Seit einigen Jahren werden auch Kokosfasern und Kokosmark als Zuschlagstoff in Kultursubstraten verwendet. Problematisch hierbei sind die weiten Transportwege von Asien nach Europa und z. T. die aufgrund hoher Chloridgehalte bedingten aufwendigen Aufbereitungsverfahren. Es zeigt sich, dass ein adäquates Substitut für Torf zurzeit nicht vorhanden ist.

Eine andere Option zur Substitution von Torf könnte hierbei die Vorbehandlung von Landschaftspflegematerial von ehemaligen Torfabbauflächen durch die Carbonisierung sein. Beim Anbau von Rohrglanzgras können die Emissionen¹ gegenüber dem Ackerbau und der konventionellen Grünlandnutzung mit 24 t CO₂-eq*ha⁻¹*a⁻¹ auf Werte zwischen 5 t und 22 t CO₂-eq*ha⁻¹*a⁻¹ bzw. beim Anbau von Schilf auf 0 bis 11 t CO₂-eq*ha⁻¹*a⁻¹ reduziert werden (2). Für die Flächen mit Schilfaufwuchs würde weiterhin bei ökologischer Betrachtung in nassen Jahren ein Lebensraum für die gefährdeten Arten wie Kiebitz und Rotschenkel erhalten bleiben (2). Zusätzlich würde bei gegebener Wasserstufe der restliche Torf auf den Flächen erhalten (Wasserstufe 4+) bzw. sogar wieder aufgebaut werden (Wasserstufe 5+ und 6+) (2).

Bei einer Nutzung von 10 % der 93.000 ha deutschen Moorflächen (3) für den Anbau von z.B. Schilf können demnach 67.000 t TS²/a Torf substituiert werden. Hierdurch reduzieren sich die Emissionen zum einen auf den Flächen durch den Anbau von Rohrglanzgras bzw. Schilf gegenüber der konventionellen Grünlandnutzung bzw. dem Ackerbau. Zum anderen werden die Emissionen durch den Verbleib des Torfes im Boden um etwa 123.000 t CO₂ reduziert³. Hierbei wird unterstellt, dass Schilf einen Ertrag von 12 t TS*ha⁻¹*a⁻¹ (2) hat und der Output aus der Carbonisierung 0,6 t TS je t TS Input beträgt.

In 2010 wurden erste eigene Pflanzversuche mit carbonisierten Grünreststoffen aus der vapo-thermalen Carbonisierung (VTC) durchgeführt. Hierbei wurde gezeigt, dass

¹ Die schwer einschätzbaren Lachgasemissionen sind nicht berücksichtigt.

² Trockensubstanz

³ C-Gehalt des Torfs von 50 %

salzverträgliche Chrysanthemen beim Einsatz von 10 % Biokohle 16 % mehr Trockenmasse entwickelten gegenüber dem Kontrollsubstrat aus 100 % Torf. Demgegenüber ergab im Bereich von Anzuchtsubstraten für Gemüsejungpflanzen die Zumischung von 10 % Biokohle aus Grünreststoffen wachstumsmindernde Wirkung.

Um einen Zuschlagstoff aus der Carbonisierung weiter abzusichern, wurden in diesem Forschungsprojekt Grundlagenwissen zur Produktion gesammelt sowie pflanzenbauliche Versuche durchgeführt.

Beim Prozess der hydrothermalen Carbonisierung wird der natürliche Inkohlungsablauf technisch nachempfunden. Hierbei wird Biomasse durch Einwirkung von Druck und Temperatur bei Anwesenheit von Wasser und unter Ausschluss von Sauerstoff umgesetzt. Bei dem Prozess der HTC handelt es sich um eine chemisch-physikalische Umwandlung von Biomasse.

2. Gliederung des Projekts

Das Forschungsprojekt wurde in folgende 7 Arbeitspakete (AP) untergliedert:

- AP 1) Versuchsaufbau und Eduktakquise
- AP 2) Screening: Carbonisierung 10 verschiedener Edukte und Untersuchung der Produkte hinsichtlich Ihrer chemischen, physikalischen und biologischen Eigenschaften
- AP 3) Eruiere des Einflusses der VTC-Parameter auf die Produkteigenschaften (Temperatur- und Zeitvariation): Carbonisierung zweier Edukte bei verschiedenen Prozessparametern und Analyse der Substratmischungen inkl. Biotest und Pflanzversuchen
- AP 4 - 6) Anwendungsversuche: Durchführen von Pflanzversuchen mit Zier- und Nutzpflanzen bei unterschiedlichen Substratmischungen, Bestimmung der Treibhausgasemissionen (THG) sowie des Stickstoffhaushaltes und der Nährstoffrückführung (z.B. Bilanzierung des Phosphors)
- AP 7) Interpretation der Ergebnisse: Erstellen eines Businessplanes sowie einer Ökobilanz unter Berücksichtigung der THG-Faktoren und Zusammenstellung der Ergebnisse

Innerhalb des Arbeitspakets 1 wurde der Versuchsstand aufgebaut sowie zur Prüfung der Anlage Vorversuche durchgeführt, um etwaige Probleme zu beheben. Darüber hinaus wurden die benötigten Edukte für das Arbeitspaket 2 beschafft.

Im Arbeitspaket 2 wurde ermittelt, ob es einen eduktspezifischen Einfluss auf die Eignung als Substratzuschlagstoff gibt. Hierzu wurden gezielt Eigenschaften des Eduktes wie Struktur, Zusammensetzung und Inhaltstoffe mit den pflanzenrelevanten Kriterien verglichen. Das Versuchs- und Analysekonzept war darauf ausgelegt, phytotoxische Eigenschaften, physikalische und weitere Parameter wie Nährstoff- und Wasserverfügbarkeit zu ermitteln. Hierdurch bestand die Möglichkeit einer ersten grundsätzlichen Abschätzung der Eignung des

carbonisierten Materials als Substratzuschlagstoff. In diesem Zusammenhang wurde das carbonisierte Material im feuchten und im trockenen Zustand eingesetzt, um den Einfluss von niedermolekularen Substanzen zu ermitteln. Darüber hinaus wurden in dieser Phase Versuche zum Anlageneinfluss durchgeführt.

Auf Basis der Ergebnisse aus dem Arbeitspaket 2 wurden im Arbeitspaket 3 zwei Materialien verwendet, deren Eignung als Substratzuschlagstoff respektive Torfersatz in diesem Paket bei Variation der Reaktionszeit und Temperatur untersucht wurden. Darüber hinaus wurden Versuche zur Reproduzierbarkeit sowohl der brennstoffspezifischen sowie der pflanzenbaulichen Ergebnisse durchgeführt.

Die Anwendungsversuche wurden aufgrund negativen Ergebnisse bei spezifischen Parametern der vorhergehenden Arbeitspakete nicht durchgeführt. Dafür wurden weitere Versuche zur Reduzierung des Schimmelpotenzials durchgeführt. Ebenfalls wurden Versuche zur Ermittlung der phytotoxischen Komponenten eingeplant. Abschließend erfolgten Versuche zur energetischen Bewertung der Materialien. Hierzu wurden neben den brennstoffspezifischen Daten Briketts hergestellt und beprobt.

3. Arbeitspaket 1: Versuchsaufbau und Eduktakquise

3.1 Carbonisierung

Schon im Jahr 1913 hat der Chemiker Friedrich Bergius die hydrothermale Carbonisierung beschrieben (4). Anfang der dreißiger Jahre des letzten Jahrhunderts wurde ihm für die Arbeiten zu dem Thema chemische Reaktionen unter hohem Druck der Nobelpreis verliehen, zu denen auch die Arbeiten der HTC zählen. Bergius' Erkenntnisse wurden fortan in der Entwicklung der Biomasseverflüssigung genutzt (5), (6), (7).

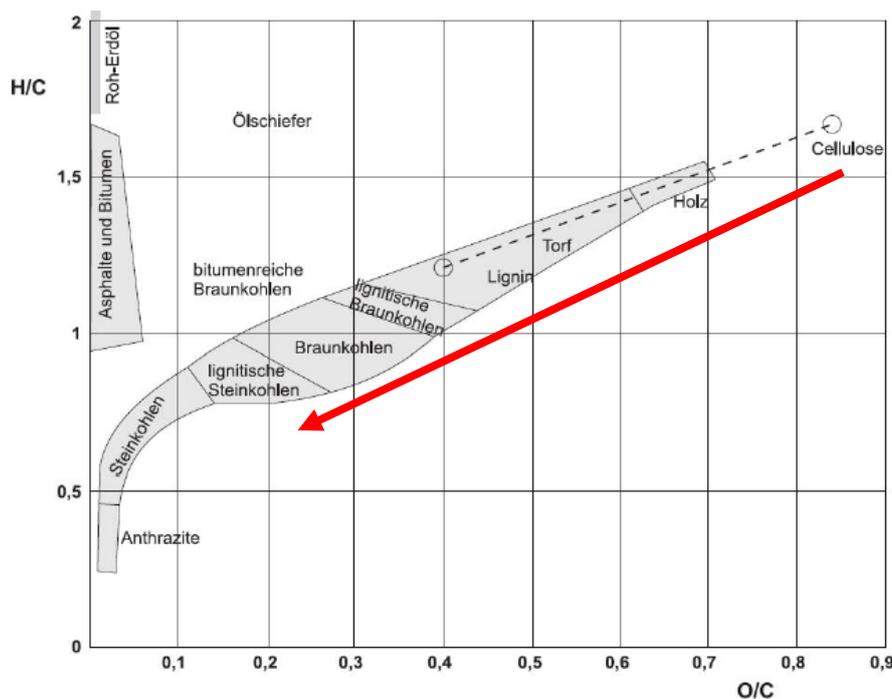


Abb. 1: Schematische Darstellung des Inkohlungsverganges nach van Krevelen

Beim Prozess der hydrothermalen Carbonisierung wird der natürliche Inkohlungsablauf technisch nachempfunden. Hierbei wird Biomasse durch Einwirkung von Druck und Temperatur bei Anwesenheit von Wasser und unter Ausschluss von Sauerstoff umgesetzt. Bei dem Prozess der HTC handelt es sich um eine chemisch-physikalische Umwandlung von Biomasse zu einem Brennstoff (Biokohle) ähnlich der Braun- und Steinkohle. Je nach Intensität der Inkohlung können auch Stoffe, bezogen auf die elementare Zusammensetzung, erzeugt werden, die dem Torf ähneln. (Siehe *Abb. 1*) Neben der stofflichen Nutzung als Bodenhilfsstoff erfolgen Untersuchungen zum Aufbau von Nanostrukturen durch die Carbonisierung von Biomasse (8), (9).

Durch hydrolytische und anschließende polymerisierende sowie kondensierende Prozesse (10), (11), (12) wird Biomasse umgesetzt. *Abbildung 2* zeigt die schematische Darstellung des Carbonisierungsprozesses inklusive der Ausgangsstoffe und Produkte.

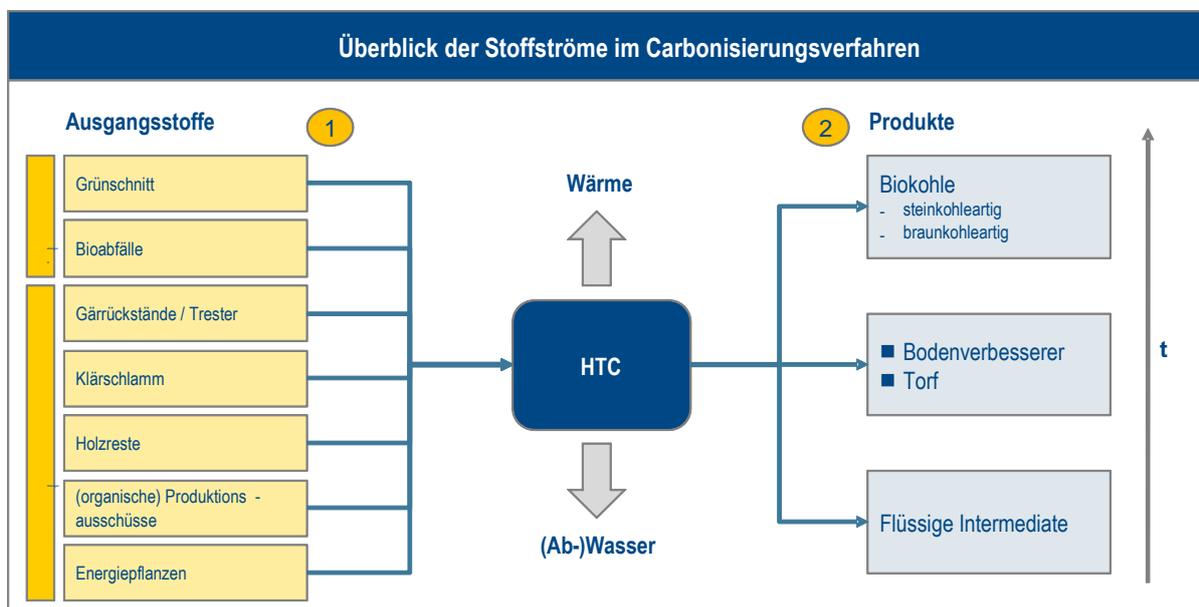


Abb. 2: Skizzierung des technischen Verfahrens der HTC

Die möglichen Vorteile der Carbonisierung in einer Dampfathmosphäre sind:

- die Aufheizeiten sind durch den hochenergetischen Dampf (Temperatur: ca. 220 °C, Druck: ca. 2,2 MPa) und die damit verbundene direkte Wärmeübertragung ohne Wärmetauscher auf ein Minimum reduziert
- das Einsetzen der Reaktion kann besser gesteuert und die optimale Prozesszeit für unterschiedliche Edukte besser eingestellt werden
- da die Reaktion nicht im Wasserbad stattfindet, müssen geringere Wassermengen aufgeheizt werden. Das führt zu einem erheblich niedrigeren Energiebedarf
- der Biokohleverlust durch Ausschwemmen von Kohlepartikeln ins Abwasser wird minimiert. Damit steigt die Produktausbeute und somit der Wirkungsgrad des Systems
- die Abwassermengen werden reduziert und die Abwasseraufbereitung damit vereinfacht

- die Nachbearbeitung der Biokohle vereinfacht sich ebenfalls durch den geringeren Wassergehalt des Produktes. Ein kompletter Arbeitsschritt kann dadurch eingespart werden
- die aufgrund der exothermen Reaktion freigesetzte Wärme kann als Dampf gespeichert und zur Aufheizung der frischen Biomasse und/oder Trocknung der Biokohle verwendet werden

3.2 Versuchsanlagen

Während dieses Forschungsvorhabens wurden zwei Versuchsanlagen genutzt. Zum einen wurde ein 2,3-Liter-Versuchsreaktor (Bezeichnung: 2,3-Liter-Reaktor) verwendet, der sowohl für die Hydro- also auch die Vapothermale Carbonisierung eingesetzt werden kann sowie zum anderen ein 70-Liter-Autoklave (Bezeichnung: 70-Liter-Reaktor), der aufgrund seiner Bauweise lediglich zur Vapothermalen Carbonisierung genutzt werden kann.

Der eigentliche Versuch unterteilt sich selbst in drei Phasen: Aufheizen, Reaktion und Abkühlen. Die Reaktionsphase ist so definiert, dass sie mit dem Erreichen der gewünschten Reaktortemperatur beginnt und mit dem Einsetzen des Kühlvorgangs endet. Nach Ablauf der gewählten Reaktionszeit wird das Thermostat bzw. der Dampferzeuger ausgeschaltet und beim 2,3-Liter-Reaktor die Kühlung eingeschaltet.

Anlagenbeschreibung des 2,3-Liter-Reaktors

Das Reaktorvolumen beträgt 2,3 Liter. In den Deckel des Autoklaven sind zwei Tauchhülsen eingelassen, in denen zwei Temperaturfühler platziert sind: zum einen für die Messwerterfassung und zum anderen für die Steuerung. Weiterhin geht vom Deckel ein Rohr ab, an dem am oberen Ende der Drucksensor eingebaut ist. Der Autoklav ist doppelwandig ausgeführt und über zwei Anschlüsse direkt mit dem Thermoölkreislauf verbunden. Über den Thermoölkreislauf wird der Autoklav aufgeheizt und abgekühlt. Das Aufheizen des Thermoöls erfolgt elektrisch über ein in den Thermoölkreislauf eingebautes Thermostat. Das Thermostat ist mit einer integrierten Pumpe ausgestattet, welches über die Steuerung bedient und geregelt wird. Als Heizleistung kann zwischen 2 und 4 kW gewählt werden. Die Kühlung des Autoklaven erfolgt indirekt über den Thermoölkreislauf. Der Thermoölkreislauf ist dafür über einen Plattenwärmeübertrager mit dem Kühlwasserkreislauf verbunden, der optional über die Ansteuerung des Dreiwegeventils mit der Steuerung dazu geschaltet wird. Das Wasser für die Kühlung befindet sich unterhalb des Autoklaven in einem Wasserreservoir und wird von einer Pumpe (150 W) durch den Kühlkreislauf gefördert.

Zu der feuchten Biomasse wird im Falle eines HTC-Versuches eine definierte Menge an destilliertem Wasser gegeben, sodass die Biomasse vollständig mit Wasser bedeckt ist. Im Falle des VTC-Betriebs wird die Biomasse in einen Korbgefüllt, der einen definierten Abstand zum Boden des Reaktors aufweist. So kann in diesem Zwischenraum flüssiges Wasser eingebracht werden, das die Biomasse während der Aufheizphase durch Verdampfen und Kondensieren aufheizt und diese während des Prozesses mit Wasserdampf umgibt.

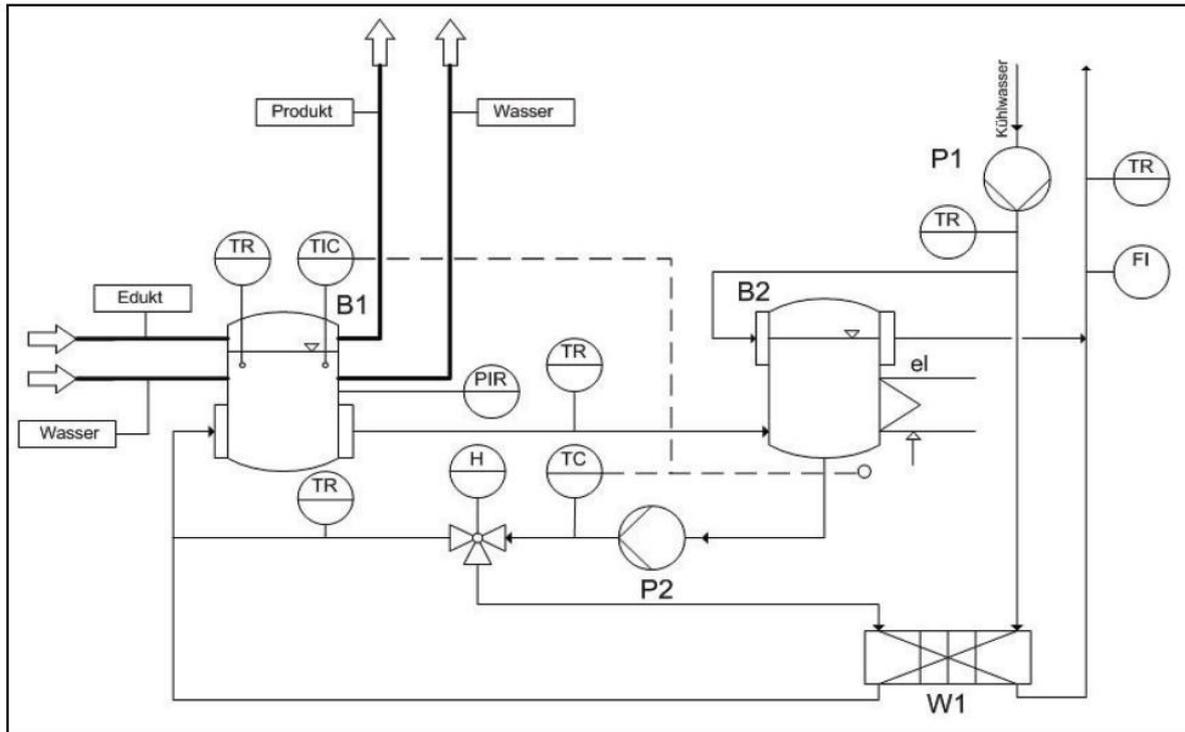


Abb. 3: Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema der 2,3-Liter-Anlage

Anlagenbeschreibung des 70-Liter-Reaktors

Die 70-Liter-Versuchsanlage wird dazu verwendet, Biomassen unter Einfluss verschiedener Betriebsparameter mittels vapo-thermale Carbonisierung umzusetzen. Bei dem Verfahren der VTC wird Biomasse in einer Dampf-atmosphäre bei Temperaturen von maximal 200°C und entsprechenden Dampfdruck inkohlt.

Die Anlage wird im Batchbetrieb betrieben. Der Reaktionsbehälter wird zum Anfang mit einem Siebkorb beladen, welcher mit Biomasse gefüllt ist. Anschließend wird der Reaktor verschlossen und mit Dampf beaufschlagt. Nach Erreichen der Reaktionstemperatur wird diese für eine Zeit, im Folgenden Reaktionszeit genannt, aufrechtgehalten. Die Aufheizdauer beträgt ca. 5 Minuten. Zur Erhaltung der Reaktionstemperatur wird periodisch Frischdampf zugeführt. Die Steuerung erfolgt automatisch über eine Rückschlagklappe und ein Druckregelventil am Dampferzeuger.

Das im Reaktionsbehälter anfallende Kondensat wird mittels eines thermischen Kondensatableiters aus dem Reaktionsraum ausgeschleust und über einen Plattenwärmeübertrager geführt, in dem das Kondensat auf eine Temperatur von unter 100°C abgekühlt wird. Der Plattenwärmeübertrager wird sekundärseitig mit Kühlwasser aus einem Kühlwasserbehälter gespeist. Die Kondensatabscheideeinrichtung ist so ausgelegt, dass die bei der Reaktion gebildeten Gase (überwiegend CO₂) zusammen mit dem Kondensat abgeleitet werden. Die Flüssigphase und die Gasphase werden in geeigneten Sammelgefäßen aufgefangen.

Nach Ablauf der Reaktion wird die Dampfzufuhr unterbrochen und der Reaktionsbehälter abgekühlt. Das Abkühlen erfolgt durch Ablassen von Dampf, welcher über einen zweiten Plattenwärmeübertrager geführt wird. Die Kondensationsenergie wird sekundärseitig durch

Kühlwasser aus dem Kühlwasserbehälter aufgenommen. Das Öffnen des Reaktionsbehälter erfolgt nach absinken des Behälterdrucks auf Atmosphärendruck.

Die Anlage verfügt über einen Drucksensor sowie drei Temperaturfühler. Die Temperaturfühler sind unterschiedlich lang, wobei einer die Temperatur der Gasphase, einer die Temperatur des äußeren Bereichs der Biomasse und ein weiterer die Temperatur in der Mitte der Biomasse anzeigt. Ein weiterer Temperaturfühler ermittelt die Raumtemperatur. Während des gesamten Versuchs werden sämtliche Temperaturen sowie der Druck im Reaktionsbehälter gemessen, aufgezeichnet und grafisch zur Überwachung dargestellt. Auf Basis dieser Werte wird die Anlage im Handbetrieb über Handarmaturen bedient.

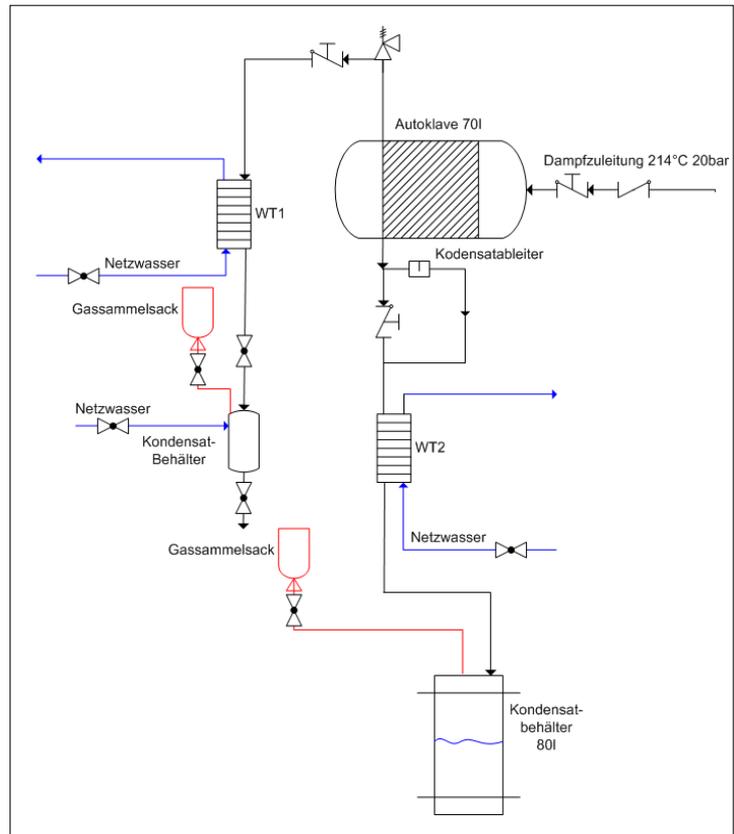


Abb. 4: Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema des 70-Liter-Reaktors

Tab. 1: Betriebsparameter der 70-Liter-Versuchsanlage

Betriebsparameter der wesentlichen Anlagenkomponenten:			
Reaktionsbehälter		Dampferzeuger	
Max. zul. Betriebsdruck [bar]:	20	Bauart:	Schnelldampferzeuger
Max. zul. Betriebstemperatur [°C]:	200	Dampfleistung [kg/h]:	500
Volumen [L]:	70	Max. zul. Betriebsdruck [bar]:	25
		Max. zul. Betriebstemperatur [°C]:	215
		Volumen [L]:	34,6

3.3 Landschaftspflegematerial

Landschaftspflegematerial ist nach der konsolidierten Fassung der Biomasseverordnung (seit 1. Januar 2012 geltenden Fassung) wie folgt definiert:

„Als Landschaftspflegematerial gelten alle Materialien, die bei Maßnahmen anfallen, die vorrangig und überwiegend den Zielen des Naturschutzes und der Landschaftspflege im Sinne des Bundesnaturschutzgesetzes dienen und nicht gezielt angebaut wurden. Marktfrüchte wie Mais, Raps oder Getreide sowie Grünschnitt aus der privaten oder öffentlichen Garten- und Parkpflege oder aus Straßenbegleitgrün, Grünschnitt von Flughafengrünland und Abstandsflächen in Industrie- und Gewerbegebieten zählen nicht als Landschaftspflegematerial. Als Landschaftspflegegras gilt nur Grünschnitt von maximal zweischürigem Grünland.“

Nach § 20, Abs. 20 des Bundesnaturschutzgesetz fällt Landschaftspflegematerial damit in folgenden Gebieten an, die sich vielfach überschneiden:

- Naturschutzgebiet,
- Nationalpark oder Nationale Naturmonument,
- Biosphärenreservat,
- Landschaftsschutzgebiet,
- Naturpark,
- Naturdenkmal und
- geschützte Landschaftsbestandteile.

Die Zusammensetzung und das Potenzial von Landschaftspflegematerial ist aufgrund der unterschiedlichen Biotoparten sowie Pflegemaßnahmen sehr verschieden. Hinsichtlich des Potenzials in Deutschland kann bei einer Fläche 900.000 ha (13), einem angenommenen Ertrag von 3,5 t/ha/a (14) sowie einer Nutzungsmöglichkeit des gesamten theoretischen Potenzials von 25 – 50 Prozent von 0,8-1,6 Mio. t TS ausgegangen werden. Der Anfall ist hierbei regional sehr verschieden.

4. Untersuchungsparameter

4.1 Pflanzenbauliche Parameter

Von allen Produkten wurden die Parameter aus *Tab. 2* analysiert. Nähere Erläuterungen zur Methode der Analysen sind im *Anhang A bis C* zu finden. Der Vergleich der Nährstoffe, Schwermetalle und Spurenelemente der verschiedenen carbonisierten Materialien erfolgt im Arbeitspaket 2 mit den Gütekriterien der RHP für Torf und Kompost aus dem Bereich Consumer und in den nachfolgenden Kapiteln alleine mit denen von Kompost.

Die Biotests erfolgten mit Volumenanteilen des carbonisierten Materials von 10 und 30 %. Als Kontrollsubstrat wurde für die Biotests Substrat 1 (bedding plant) verwendet. Das Substrat besteht zu 70 Vol.-% aus Humintorf und zu 30 Vol.-% aus Weißtorf, dem 7,5 kg Kalksteinmehl, 1,2 kg NPK-Dünger (12/14/24) sowie 0,05 kg von dem Netzmittel Hydro-S zugegeben wurde. Die Biotests erfolgten in Anlehnung an das VDLUFA „Methodenhandbuch“. *Tab. 3* gibt einen Überblick über die verschiedenen Pflanzenarten und deren Untersuchungsziel.

Der Aufwuchs des Salats sowie der Kohlarten erfolgt im Gewächshaus bei wenigstens 8 Stunden Licht am Tag. Ab einer Beleuchtungsstärke von 45 klx werden die Pflanzen schattiert. Die Kohlarten wachsen bei Temperaturen von 22 °C (18 – 31°C) auf und der Salat bei etwa 18 °C (16 – 31°C). Die Kressevarianten wachsen bei 20 °C ± 2K und etwa 10 Stunden Licht pro Tag auf.

Tab. 2: Analysenpaket zur Ermittlung der pflanzenbaulich relevanten Parameter und deren Ziele

Produkte der VTC	Ziel
pH-Wert - VDLUFA	Absicherung des pH-Wertes
Schwermetalle	Absicherung der Grenzwerte im pflanzenverträglichen Bereich
CaCO ₃	Absicherung des Grenzwertes
Mangan aktiv	Absicherung des toxischen Grenzwerts
Pflanzenverfügbare Nährstoffe im Vergleich zu Torf (Arbeitspaket 2) und Kompost (Arbeitspaket 2 und ff)	Absicherung der Grenzwerte
<i>Hergestelltes Substrat</i>	
Biotests mit Kresse, Salat, Chinakohl und Kohlrabi	Ausschluss von toxischen Gasen, Stoffen, Rückständen, etc.
Physikalische Parameter	Absicherung der notwendigen Wasser- und Luftkapazität

Tab. 3: Zusammenstellung der verwendeten Biotests und deren Untersuchungsziel

Test	Untersuchungsziel bzw. Hemmungen durch
Kresse - Gastest	ausgasende phytotoxische Stoffe und Stoffwechselprodukte des Substrats
Kresse - Keimtest	Wachstumsschäden, Keimhemmung und Wurzelentwicklung
Salat	Schadsymptome, die durch chemische und physikalische Parameter nicht erklärt werden können
Chinakohl	Schadsymptome, die durch chemische und physikalische Parameter nicht erklärt werden können
Kohlrabi	Schadsymptome, die durch chemische und physikalische Parameter nicht erklärt werden können

4.2 Brennstoffspezifische Parameter

Zur Beurteilung der carbonisierten Materialien hinsichtlich ihrer brennstoffspezifischen Eigenschaften wurden von allen hergestellten Materialien die in der nachfolgenden Tabelle dargestellten Parameter ermittelt.

Tab. 4: Analysenpaket zur Ermittlung der brennstoffrelevanten Parameter und deren Ziele

Edukt und Produkt	Ziel
Brennwert / Heizwert	Zur Bestimmung des Inkohlungsgrades als Indikator für den Reaktionsfortschritt
Elementaranalyse	
Organische und gesamte Trockensubstanz	Zur Ermittlung des Konversionsgrad als relevanten Parameter für die ökonomische sowie ökologische Betrachtung des Herstellungsprozesses
Masse der Feuchtschubstanz des In- und Outputs	Als Indikator für den Inkohlungsfortschritt sowie für den Anteil an leicht abbaubaren organischen Substanzen
Flüchtige Bestandteile	

5. Arbeitspaket 2: Ergebnisse des Screenings sowie Untersuchungen zum Anlageneinfluss

5.1 Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Materialien

5.1.1 Versuchsparameter

Im ersten Schritt wurden in einer Eduktvariation acht verschiedene Edukte bei gleichen Prozessbedingungen (200 °C, 2 h) in der 70-Liter-Anlage carbonisiert.

Verwendete Materialien:

- | | |
|-----------------|---------------------------|
| 1. Treibsel | 5. Rohrkolben |
| 2. Gärrückstand | 6. Grünschnitt, fein |
| 3. Rindermist | 7. Grünschnitt, Unterkorn |
| 4. Binsen | 8. Stroh |

Der Treibsel stammt aus Brunsbüttel, Schleswig-Holstein und setzt sich im Wesentlichen aus Rohrkolben zusammen.

Der Gärrückstand stammt aus der Biogasanlage Suhr, in Geeste. Das Inputmaterial setzt sich zu 68 Mass.-% aus Maissilage, zu 23 Mass.-% aus Zuckerrüben und zu 9 Mass.-% aus Grassilage zusammen.

Der Grünschnitt wurde am 8. Mai 2012 von der Kompostierung in Geeste, Groß Hesepe beschafft. Die feine Fraktion wurde über eine Woche gesammelt und bestand aus Gras und Vertikutiergut. Das Unterkorn wurde insgesamt über 3 Wochen gesammelt. Hierbei wurde die gesammte grobe Fraktion über 2 Wochen gesammelt, anschließend geschreddert und gesiebt, woraus das Unterkorn hervor ging.

Der Rindermist stammt von einem landwirtschaftlichen Betrieb aus der Region Emsland (Nds), dessen Kühe in einem Festmiststall auf Gerstenstroh gehalten werden sowie mit Mais- und Grassilage gefüttert werden. Das Stroh ist Gerstenstroh und stammt vom selben Landwirt.

Die Produkt aus der 70-Liter-Anlage wurden in zwei Proben aufgeteilt, wobei eine davon über 24 h bei 105°C im Trockenschrank getrocknet wurde. Hierdurch sollte geprüft werden, ob der Gehalt an niedermolekulare organische Säuren und anderen flüchtigen Komponenten verringert werden kann und sich damit die Produkteigenschaften positiv auf die Biotests auswirken. Das über 24 Stunden getrocknete Material wird im Folgenden als „trocken“ bezeichnet und die nicht getrocknete Probe als „frisch“. Die trockenen Proben hatten im Mittel einen Wassergehalt von 10 % und die frischen von 70 %. Die Biotests wurden als Doppelbestimmung ausgeführt.

5.1.2 Ergebnisse der Biotests

Vergleich der Frischgewichte des frischen Materials mit dem des trockenen

Bei Zugabe von 10 Vol.-% zum Substrat haben die Pflanzen bei Verwendung des frischen Materials im Mittel über alle Pflanzenarten 1,4 Prozentpunkte weniger Frischgewicht im Vergleich zum trockenen Material. Die Spannweite beträgt hierbei insgesamt 46 Prozentpunkte und reicht von – 28 bis + 18 Prozentpunkte. (Siehe *Tab. 5*) Bei Betrachtung aller Pflanzenarten verringert sich das Frischgewicht bei Einsatz von frischem Material bei 63 % der carbonisierten Materialien gegenüber dem Einsatz von trockenem. Allerdings sind die Auswirkungen bei einem carbonisierten Material zwischen verschiedenen Pflanzenarten unterschiedlich: Frischer, carbonisierter feiner Grünschnitt (Vers.-Nr. 6) weist beispielsweise gegenüber dem trockenem Material bei Chinakohl ein um 11 Prozentpunkte und bei Kohlrabi ein um 3 Prozentpunkte verringertes Frischgewicht auf, welches bei Salat dahingegen um 18 Prozentpunkte deutlich besser ist. (siehe *Tab. 5*) Über alle Materialien zeigt sich, dass das Frischgewicht bei Einsatz von frischem Material gegenüber trockenem Material (siehe *Tab. 5*):

- a) beim Chinakohl im Mittel um 1,7 Prozentpunkte geringer ist und bei 63 % der Materialien das Gewicht geringer ist;
- b) beim Salat im Mittel um 1,6 Prozentpunkte größer ist und bei 50 % der Materialien das Gewicht geringer ist und
- c) beim Kohlrabi im Mittel um 4,1 Prozentpunkte geringer ist und bei 75 % der Materialien das Gewicht geringer ist.

Der Unterschied zwischen den Frischmasseerträgen bei Einsatz von frischem und trockenem Material ist bei 10 Vol.-% Zumischung sehr gering, wobei tendenziell trockenes Material besser ist.

Bei 30 Vol.-% Zumischung ist das Frischmassegewicht der Pflanzen in Substraten mit frischem Material über alle Pflanzenarten im Mittel um 2,5 Prozentpunkte geringer. Die Spannweite beträgt hierbei 34 Prozentpunkte und reicht von – 15 bis + 19 Prozentpunkte. (Siehe *Tab. 5*) Bei Betrachtung aller Pflanzenarten verringert sich das Frischgewicht bei Einsatz von frischem Material bei 65 % der carbonisierten Materialien gegenüber dem Einsatz von trockenem. (Siehe *Tab. 5*) Über alle 8 Materialien zeigt sich, dass das Frischgewicht bei Einsatz von frischem Material gegenüber trockenem Material (vergl. mit *Tab. 5*):

- a) beim Chinakohl im Mittel um 4,2 Prozentpunkte geringer ist und insgesamt bei 75 % der Materialien das Gewicht geringer ist;
- b) beim Salat im Mittel um 2,2 Prozentpunkte größer ist, wobei bei 67 % der Materialien das Gewicht geringer ist und
- c) beim Kohlrabi im Mittel um 5,4 Prozentpunkte geringer ist und insgesamt bei 50 % der Materialien das Gewicht geringer ist.

Der Unterschied zwischen dem trockenem und frischen Material ist bei einem Anteil von 30 Vol.-% ebenfalls wie bei 10 Vol.-% Zumischung sehr gering, wobei tendenziell die Frischmasse bei Einsatz von frischem Material geringer ist. Es zeigt sich aber bei Vergleich von zwei Materialien, dass der Einfluss der Vorbehandlung nicht bei allen Materialien gleich

ist, sodass der frische carbonisierte Rohrkolben bessere Ergebnisse erzielt und dahingegen der carbonisierte Grünschnitt, fein insgesamt schlechtere. (Siehe Tab. 5)

Tab. 5: Vergleich der Ergebnisse zum Frischgewicht im Vergleich zur Kontrolle zwischen dem frischen und trockenem Material; Berechnung: Masse Frischgewicht bei Einsatz des frischen Materials im Vergleich zur Kontrolle abzüglich dem Frischgewicht bei Einsatz von trockenem Material im Vergleich zur Kontrolle; n.a. - bedeutet, dass die Probe während des Biotestversuchs verpilzten und dadurch nicht ausgewertet wurde

Material		Differenz der Frischgewichte im Vergleich zur Kontrolle [%-Punkte]					
		10 Vol.-% Zumischung			30 Vol.-% Zumischung		
		Chinakohl	Salat	Kohlrabi	Chinakohl	Salat	Kohlrabi
1	Treibsel	-4,3	0,9	-2,5	-9	n.a.	-12,3
2	Gärrückstand	2,8	-13,6	-12,1	-4,4	n.a.	-19
3	Rindermist	1,4	-0,9	-27,6	-9,5	10,8	1,4
4	Binsen	-1,1	15,1	18,1	-2,3	-2,9	-10,8
5	Rohrkolben	6,1	15,2	6,7	14,3	19,3	n.a.
6	Grünschnitt, fein	-11,2	18,1	-2,9	-15,3	-13,6	1,2
7	Grünschnitt, Unterkorn	-3,7	-18,8	-7,9	-7,2	-7,9	n.a.
8	Stroh	-3,5	-3,1	-4,7	0	-0,8	7,3
Mittelwert		-1,7	1,6	-4,1	-4,2	2,2	-5,4
Anzahl negativer Ergebnisse [%]		63	50	75	75	67	50

Vergleich der Frischgewichte der verschiedenen Pflanzenarten bei Einsatz desselben Materials

----- 10 Vol.-% Zumischung des carbonisierten Materials -----

Bei Einsatz von frischem und trockenem Material liegen die Frischgewichte der verschiedenen Pflanzen aus den Biotests bei einem Anteil von 10 Vol.-% zu 50 % zwischen 60 und 80 % im Vergleich zur Kontrolle und zu 75 % zwischen 60 und 90 % im Vergleich zur Kontrolle. Bei den Substratmischungen variiert das Frischgewicht zwischen den einzelnen Pflanzenarten bei Einsatz desselben carbonisierten Materials wie folgt:

- 9 bis zu 30 Prozentpunkte mehr Frischgewicht **beim Salat als beim Chinakohl**, wobei Salat bei 75 % der Versuche ein größeres Frischgewicht hat und Salat im Mittel 10,5 Prozentpunkte mehr Frischgewicht besitzt;
- 0,5 bis zu 30 Prozentpunkte mehr Frischgewicht **beim Kohlrabi als beim Salat**, wobei Kohlrabi bei 81 % der Versuche ein größeres Frischgewicht hat und Kohlrabi im Mittel 5,7 Prozentpunkte mehr Frischgewicht besitzt.
- 12 bis zu 30 Prozentpunkte mehr Frischgewicht **beim Kohlrabi als beim Chinakohl**, wobei Kohlrabi bei 88 % der Versuche ein größeres Frischgewicht hat und Kohlrabi im Mittel 16,1 Prozentpunkte mehr Frischgewicht besitzt.

Damit reagiert Chinakohl tendenziell am empfindlichsten auf das carbonisierte Material.

Aufgrund von Schimmelbildung beim Kresse-Gasphasentest konnten die Ergebnisse des carbonisierten Materials nicht als Indikator für gasförmige Schadstoffe herangezogen werden: Bei den durchgeführten Kresstests (Gasphase) war die Kontrolle ebenfalls von Schimmel befallen, wodurch Schimmelbildung an sich nicht auf das carbonisierte Material zurückzuführen ist.

Mit über 100 % Frischgewicht im Vergleich zur Kontrolle weist frischer und trockener carbonisierter Treibsel (Vers.-Nr. 1) als einziges bei 10 Vol.-% Zumischung in der Versuchsreihe im Versuch mit Kohlrabi sehr gute Ergebnisse auf.

Nach der RHP-Norm darf das Frischgewicht gegenüber der Kontrolle nicht weniger als 20 % betragen. Aufgrund der niedrigen Frischgewichte, insbesondere bei Chinakohl, hält kein Material die RHP-Norm ein. Nach VDLUFA besteht eine pflanzenschädigende Wirkung durch das Substrat, wenn das Frischgewicht gegenüber der Kontrolle um 25 % reduziert ist. Bezogen auf die Mittelwerte halten die Materialien der Vers.-Nr. 4 (Binsen) und 8 (Stroh) (jeweils nur trocken) dieses Kriterium ein.

Die Keimrate beträgt bei allen Versuchen mehr als 92 %. Nach den Vorschriften der RHP sowie der VDLUFA wurde damit keine Keimhemmung nachgewiesen, da die Keimrate mehr als 90 % beträgt. Lediglich trockener, carbonisierter Rindermist (Vers.-Nr. 3) hat bei Kohlrabi eine Keimrate von 88 % und das verwendete Material demnach keimhemmend.

----- 30 Vol.-% Zumischung des carbonisierten Materials -----

Bei einem Anteil von 30 Vol.-% waren von 48 Substraten mit frischem und trockenem Material 5 Proben verpilzt, wobei 4 Proben davon mit frischem Material gemischt wurden.

Gegenüber den Ergebnissen bei 10 Vol.-% Zugabe an carbonisiertem Material fallen die Ergebnisse bei 30 Vol.-% deutlich schlechter aus: Die Frischgewichte der verschiedenen Pflanzen aus den Biotests liegen unter Vernachlässigung der verpilzten Proben zu 26 % zwischen 30 und 50 % im Vergleich zur Kontrolle, zu 44 % zwischen 20 und 30 % und betragen maximal 55 % (Vers.-Nr. 5, frisch, Salat). Nach der RHP-Norm darf das Frischgewicht gegenüber der Kontrolle nicht weniger als 20 % betragen. Aufgrund der niedrigen Frischgewichte hält kein Material die RHP-Norm ein. Ebenfalls hält kein Material der Vorgaben der VDLUFA ein.

Das Frischgewicht variiert zwischen den einzelnen Pflanzenarten bei Einsatz desselben Materials wie folgt (die verpilzten Versuche wurden nicht bewertet):

- a) -16 bis zu 20 Prozentpunkte mehr Frischgewicht **beim Salat als beim Chinakohl**, wobei Salat bei 43 % der Versuche ein größeres Frischgewicht hat und Salat im Mittel 2,1 Prozentpunkte weniger Frischgewicht besitzt,
- b) -7 bis zu 32 Prozentpunkte mehr Frischgewicht **beim Kohlrabi als beim Salat**, wobei Kohlrabi bei 73 % der Versuche ein größeres Frischgewicht hat und Kohlrabi im Mittel 6,1 Prozentpunkte mehr Frischgewicht besitzt und
- c) -21 bis zu 17 Prozentpunkte mehr Frischgewicht **beim Kohlrabi als beim Chinakohl**, wobei Kohlrabi bei 77 % der Versuche ein größeres Frischgewicht hat und Kohlrabi im Mittel 3,4 Prozentpunkte mehr Frischgewicht besitzt.

Tendenziell zeigt sich damit, dass Salat gefolgt von Chinakohl am empfindlichsten auf das carbonisierte Material reagiert.

Die Keimrate beträgt bei allen Versuchen mehr als 92 Prozent, somit wurde nach den Vorschriften der RHP keine Keimhemmung nachgewiesen, da diese nicht mehr als 10 % beträgt. Lediglich frischer, carbonisierter Grünschnitt, fein (Vers.-Nr. 6) führt zu einer Keimrate von je 83 % bei Kohlrabi und bei Salat.

Bei allen Proben wurde keine Gelbverfärbung der Blätter beobachtet. Ebenfalls wurden auch keine anderen Schadensbilder wie Blattnekrosen beobachtet. In *Abbildung 5* sind die Ergebnisse der Biotests bildlich dargestellt.



Abb. 5: Darstellung der Biotest-Ergebnisse (v.o.n.u.: Kohlrabi, Chinakohl, Salat) des Materials Nr. 6 bei 10 und 30 Vol.-% Zumischung (v.l.n.r.: Kontrolle, frisch 10 Vol.-%; frisch 30 Vol.-%; trocken 10 Vol.-%; trocken 30 Vol.-%) mit erkennbarer Schimmelbildung beim Salat (weiße Stellen)

Zusammenfassung

Aufgrund geringer Unterschiede zwischen dem trockenen und frischen Material bei den Frischmasseerträgen sowie unterschiedlicher Ergebnisse zwischen den verschiedenen Materialien ist keine einheitliche Wirkung des Materials auf das Pflanzenwachstum zu ermitteln. Aus diesem Grund erfolgt im Weiteren keine Unterscheidung zwischen den trockenen und den frischen Materialien.

Insgesamt zeigt sich, dass die Frischgewichte im Vergleich zur Kontrolle der verschiedenen Materialien bei 10 Vol.-% Zugabe gegenüber den Ergebnissen bei 30 Vol.-% deutlich besser sind. (Vergl. mit Daten der *Tab. 6*) Weiterhin liegen die Ergebnisse der Frischgewichte bei 10 Vol.-% Zumischung dichter beieinander (siehe *Tab. 6*): 88 % der Materialien haben eine Gesamtpunktzahl von 20 bis 22 von 30 möglichen Punkten, was einem mittleren Frischgewicht der drei Testpflanzen im Vergleich zur Kontrolle von 67 – 73 % entspricht. Dahingegen beträgt die Gesamtpunktzahl bei 30 Vol.-% Zumischung weniger als 10, womit das mittlere Frischgewicht im Vergleich zur Kontrolle damit weniger als 33 % beträgt und damit deutliche Wachstumshemmungen angezeigt werden. Keimhemmung wurde nicht beobachtet.

Ein Einsatz als Substratzuschlagstoff wäre bei den gegebenen Prozessparametern in keinem Fall möglich, weder nach den Vorgaben der RHP noch der VDLUFA bzw. RAL-Gütesicherung.

Tab. 6: Bewertung der Frischgewichte im Vergleich zur Kontrolle bei 10 und 30 Vol.-%; Die maximal zu erreichende Gesamtpunktzahl beträgt jeweils 30. FG - Frischgewichte; n.a. - bedeutet, dass die Proben während des Biotestversuchs verpilzten, dadurch nicht Frischgewicht ermittelt wurde und hier mit 0 Punkten bewertet wird; Das Bewertungssystem ist im *Anhang B: Bewertungssystem* erläutert

Vers.- Nr.	Inputmaterial	Bewertung der FG bei 10 Vol.-%			Summe FG bei 10 Vol.-%	Bewertung der FG bei 30 Vol.-%			Summe FG bei 30 Vol.-%
		Chinakohl	Salat	Kohlrabi		Chinakohl	Salat	Kohlrabi	
[%-Punkte]									
1	Treibsel	5	7	10	22	1	3	1	5
2	Gärrückstand	5	6	7	18	2	1	3	6
3	Rindermist	7	8	7	22	2	2	2	6
4	Binsen	7	7	7	21	1	1	1	3
5	Rohrkolben	5	8	8	21	2	4	3	9
6	Grünschnitt, fein	6	6	8	20	3	2	2	7
7	Grünschnitt, Unterkorn	6	6	8	20	3	2	n.a.	5
8	Stroh	7	7	8	22	2	2	3	7

5.1.3 Analyseergebnisse des Produktes

Auf Basis der Analysen zu den Hauptnährstoffen und dem Salzgehalt nach den Methoden der VDLUFA können alle Materialien zu 40 Vol.-% zum Substrat gegeben werden, außer der Materialien 2 (carbon. Gärrest), 6 (carbon. Grünschnitt, fein) und 8 (carbon. Stroh), die nur zu 20 Vol.-% zugegeben werden können. (siehe *Tab. 8*) Das Material 3 (carbon. Rindermist) kann aufgrund des hohen Salzgehalts von mehr als 5 g/Liter Substrat gar nicht eingesetzt werden. Einschränkend wirken sich vor allem die hohen Kalium- und Phosphatgehalte aus.

Die Grenzwerte der RHP sind im Allgemeinen niedriger als die der RAL-Gütesicherung. Hierdurch ergibt sich, dass kein Material die Vorgaben der RHP einhält. Grund hierfür sind vor allem hohe Gehalte an Kaliumoxid sowie Phosphat bei den Hauptnährstoffen, Magnesium und Mangan bei den Spurenelement sowie Zink bei den Schwermetallen. *Tab. 7* gibt die Analyseergebnisse im Vergleich zu den Grenzwerten der RHP für Torf und Kompost wieder.

Aufgrund der zum Teil äußerst hohen Gehalte an Nährstoffen wurde auf Basis der Daten der Wasser-Extraktion die schnell verfügbare Düngewirkung der Materialien abgeschätzt. Die Gehalte liegen im Wesentlichen bei allen Parametern unterhalb von 1 Mass.-%. Hierdurch erscheint ein Einsatz nicht erstrebenswert. Eine Abschätzung der Langzeitdüngewirkung wurde nicht durchgeführt.

Physikalische Parameter wurden aufgrund von Schimmelbildung bei der physikalischen Analyse von einigen Materialien nicht weiter ermittelt. In der analysierten Probe bildeten sich während der physikalischen Analyse *Fusarium*, *Penicillium* spp., *Paecilomyces*, *Mucoraceen* und Hefen.

Tab. 7: Bewertung der chemischen Analysen nach den Methoden der RHP zur Auswahl der weiter zu betrachtenden Materialien im Arbeitspaket 3; Die maximal zu erreichende Gesamtpunktzahl beträgt 9.

Vers.- Nr.	Inputmaterial	Bewertung Grenzwerte im Vergleich zu Torf (2) und zu Kompost (1) nach					Summe chem. Analysen
		Wasser- Extraktion	BaCl- Extraktion	Spuren- elemente	Schwer- metalle	Mn- aktiv	
		[Punkte]					
1	Treibsel	0	0	0	0	1	1
2	Gärrückstand	0	0	0	0	1	1
3	Rindermist	0	0	0	0	1	1
4	Binsen	2	2	0	2	0	6
5	Rohrkolben	0	0	0	2	0	2
6	Grünschnitt, fein	0	0	0	2	1	3
7	Grünschnitt, Unterkorn	0	1	0	2	1	4
8	Stroh	0	0	0	0	1	1

Tab. 8: chemische Analyseergebnisse bzw. Nährstoffgehalte der Produkte der Eduktvariation nach CaCl₂-Extraktion bzw. CAL im Vergleich zu den Grenzwerten der RAL-Gütesicherung für Substratkompost (Typ 1: 40 Vol.-% Zumischung; Typ 2: 20 Vol.-% Zumischung); n.d. - Parameter konnte mit dem Standardanalyseverfahren für Substrate nicht analysiert werden, im Laufe des Arbeitspakets wurde das Analyseverfahren angepasst, sodass Daten ermittelt werden konnten.; n.e. – für diesen Parameter bestehen keine Grenzwerte

Vers.-Nr.	Zustand	pH-Wert (CaCl ₂)	Salzgehalt [g/Liter]	P ₂ O ₅ (CAL)	K ₂ O (CAL)	[mg/Liter]		
						Σ NO ₃ -N + NH ₄ -N	NH ₄ -N	NO ₃ -N
1	Frisch	4,7	0,88	75	94	6	< 1	6
	Trocken	4,8	1,46	108	152	15	2	13
2	Frisch	5,5	4,48	2.738	2.299	n.d.	216	n.d.
	Trocken	5,8	2,96	2.232	1.848	n.d.	136	n.d.
3	Frisch	4,9	5,30	910	3.710	n.d.	114	n.d.
	Trocken	5,1	5,67	570	3.360	n.d.	156	n.d.
4	Frisch	3,7	0,90	216	185	n.d.	65	n.d.
	Trocken	4,1	0,37	85	49	28	24	4
5	Frisch	4,4	1,68	288	322	51	38	13
	Trocken	5,3	1,52	280	480	17	6	11
6	Frisch	4,6	3,52	242	893	125	109	16
	Trocken	4,6	4,79	244	1.284	160	144	16
7	Frisch	4,3	2,38	192	1.666	29	19	10
	Trocken	5,7	2,14	84	2.000	14	10	5
8	Frisch	4,9	2,44	331	1.387	101	91	10
	Trocken	5,0	4,63	789	3.539	449	435	14
RAL Substratkompost (GZ 251) Typ 1		n.e.	2,5	< 1.200	< 2.000	< 300	n.e.	n.e.
RAL Substratkompost (GZ 251) Typ 2		n.e.	5,0	< 2.400	< 4.000	< 600	n.e.	n.e.

5.1.4 Fazit

Weder bei 10 noch bei 30 Vol.-% Zumischung zeigt sich ein eindeutiger Unterschied zwischen dem Einsatz von getrocknetem und frischem Material, wobei das Frischgewicht der Biotests tendenziell bei trockenerem Material größer ist. Auf Basis der volumenbezogenen Daten ergibt sich ein eduktspezifischer Einfluss auf die Umsetzung bzw. die pflanzenbauliche Eignung. Zu beachten ist, dass aufgrund des Volumenbezugs in der Substratherstellung keine Massekonzentrationen vermerkt wurden und hiermit kein Rückschluss der Phytotoxizität auf Basis der Massekonzentration ermittelt werden konnte.

Auf Basis der Punkteverteilung für die Biotests und die chemischen Analysen schneiden die halmgutartigen Materialien besser ab (siehe Tab. 9): bei 10 Vol.-% erreicht Binsen die höchste Punktzahl, gefolgt von Treibsel und Grünschnitt, Unterkorn; Gärrückstand erhält nur 19 Punkte und schneidet damit in Bezug auf die obere Punkteskala am schlechtesten ab. Bei 30 Vol.-% Zumischung erreicht Rohrkolben die meisten Punkte, wobei die Ergebnisse insgesamt mit maximal 11 Punkten von 39 sehr niedrig ausfallen. Nichtsdestotrotz könnte kein Material als Substratzuschlagstoff bei den gegebenen Prozessparametern nach den Vorgaben der RHP noch der RAL-Gütesicherung eingesetzt werden. Bezogen auf den Einsatz im Kultursubstrat nach den Vorgaben der RHP erweisen sich vor allem die hohen Nährstoffgehalte der Materialien als problematisch, aber auch die Schwermetalle mit Zink und die Spurenelemente mit Mangan.

Trotz der hohen Nährstoffgehalte in Bezug auf den Einsatz in Kultursubstraten erscheint der Einsatz als Düngemittel auf Basis der Daten der Wasserextraktion nicht lohnenswert: Der N-Gehalt liegt unterhalb von 0,4 %, der P-Gehalt unter 0,3 % und der K-Gehalt unter 2,7 %. Da die Eignung eines organischen Düngers nicht nur an Hand der wasserlöslichen Nährstoffgehalte ermittelt werden kann, müssen für eine abschließende Bewertung weitere Kennwerte erhoben werden.

Tab. 9: Zusammenfassende Bewertung der pflanzenbaulichen Parameter zur Auswahl der weiter zu betrachtenden Materialien im Arbeitspaket 3; die maximal zu erreichende Gesamtpunktzahl beträgt 39; FG - Frischgewichte

Vers.-Nr.	Inputmaterial	Summe FG bei 10 Vol.-% [Punkte]	Summe FG bei 30 Vol.-% [Punkte]	Summe chem. Analysen [Punkte]	Summe 10 Vol.-% [Punkte]	Summe 30 Vol.-% [Punkte]
1	Treibsel	22	5	1	23	6
2	Gärrückstand	18	6	1	19	7
3	Rindermist	22	6	1	23	7
4	Binsen	21	3	6	27	9
5	Rohrkolben	21	9	2	23	11
6	Grünschnitt, fein	20	7	3	23	10
7	Grünschnitt, Unterkorn	20	5	4	24	9
8	Stroh	22	7	1	23	8

5.2 Untersuchungen zum Einfluss der Anlage und des Verfahrens

5.2.1 Versuchsparameter

Zur Untersuchung des verfahrenstechnischen und anlagenspezifischen Einflusses wurden Versuche mittels hydrothormaler und vapothormaler Carbonisierung in der 2,3-Liter-Anlage und zum Vergleich der VTC Versuche in der 2,3-Liter-Anlage und der 70-Liter-Anlage durchgeführt. Außerdem wurde der Einfluss von organischer Säure auf den Umsetzungsvorgang und damit auf die Substrateignung in der 2,3-Liter-Anlage betrachtet. *Tab. 10* gibt einen Überblick über die durchgeführten Versuche. Als Inputmaterial diente pflanzlicher Gärrest, der ebenfalls im Arbeitspaket 2 verwendet wurde.

Nach der thermochemischen Konditionierung wurde das Material über 24 Stunden bei 105 °C getrocknet. Der Wassergehalt betrug anschließend weniger als 10 Mass.-%.

Aufgrund der unterschiedlichen Wärmeeintragsysteme variieren die Aufheizzeiten zwischen den Versuchen. So beträgt die Aufheizzeit in der 70-Liter-Anlage im Mittel 12 Minuten und bei den Versuchen in der 2,3-Liter-Anlage zwischen 41 und 75 Minuten.

Tab. 10: Darstellung der durchgeführten Versuche zur Untersuchung des Einflusses der Verfahrensführung bzw. der Anlage auf die Produkteigenschaften

Nr.	Inhalt	Anlage ⁴ [1]	Temperatur [°C]	Reaktionszeit [h]	Verfahren [1]
18	Gärrückstand	70	200	2	VTC
19	Gärrückstand	2,3	200	2	VTC
20	Gärrückstand	2,3	200	2	HTC
21	Gärrückstand, Essigsäure	2,3	200	2	HTC

5.2.2 Ergebnisse der Biotests

Zur Abschätzung eines Trends bei der Anlagen- und Verfahrensvariation wurden die Frischgewichte der verschiedenen Pflanzenarten arithmetisch gemittelt.

Bei Vergleich der Versuche bei 10 Vol.-% Zugabe zeigt sich, dass das trockene carbonisierte Material der 2,3-Liter-Anlage bei der Umsetzung mittels VTC mit einem mittleren Frischgewicht von 87 % am besten abschneidet, gefolgt von der HTC mit 79 %. (Siehe *Abb. 6*) Das Frischgewicht des VTC-Versuchs in der 70-Liter-Anlage (Vers.-Nr. 18) liegt mit 18 Prozentpunkten unter dem des VTC-Versuch in der 2,3-Liter-Anlage (Vers.-Nr. 19). Am schlechtesten schneidet der HTC-Versuch unter Zugabe von Essigsäure als Katalysator mit 64 % ab. (Siehe *Abb. 6*) Bei 30 Vol.-% Zugabe verringert sich bei allen Versuchen das Frischgewicht stark auf unter 30 %. (Siehe *Abb. 6* und *Tab. 11*) Die Pflanzen zeigen damit deutliche Wachstumshemmungen an. Das Material des HTC-Versuchs mit Zugabe von Essigsäure verpilzte dazu während der Durchführung der Biotests.

Die Keimrate beträgt bei den Versuchen ohne Zugabe von Essigsäure bei 10 und 30 Vol.-% Zugabe mehr als 90 % und hält damit die Vorgabe der RHP sowie der VDLUFA ein. Bei

⁴ Hierbei steht 70 für die 70-Liter-Anlage und 2,3 für die 2,3-Liter-Anlage.

Zugabe von Essigsäure zur Umsetzung in der HTC werden die Keimvorgaben bei 10 Vol.-% Zugabe des carbonisierten Materials beim Chinakohl und Kohlrabi eingehalten und beim Salat mit 46 % nicht, wodurch insgesamt die Vorgabe nicht eingehalten wird. Vollständig verpilzt war das Material bei Zugabe von Essigsäure bei einem Anteil von 30 Vol.-%.

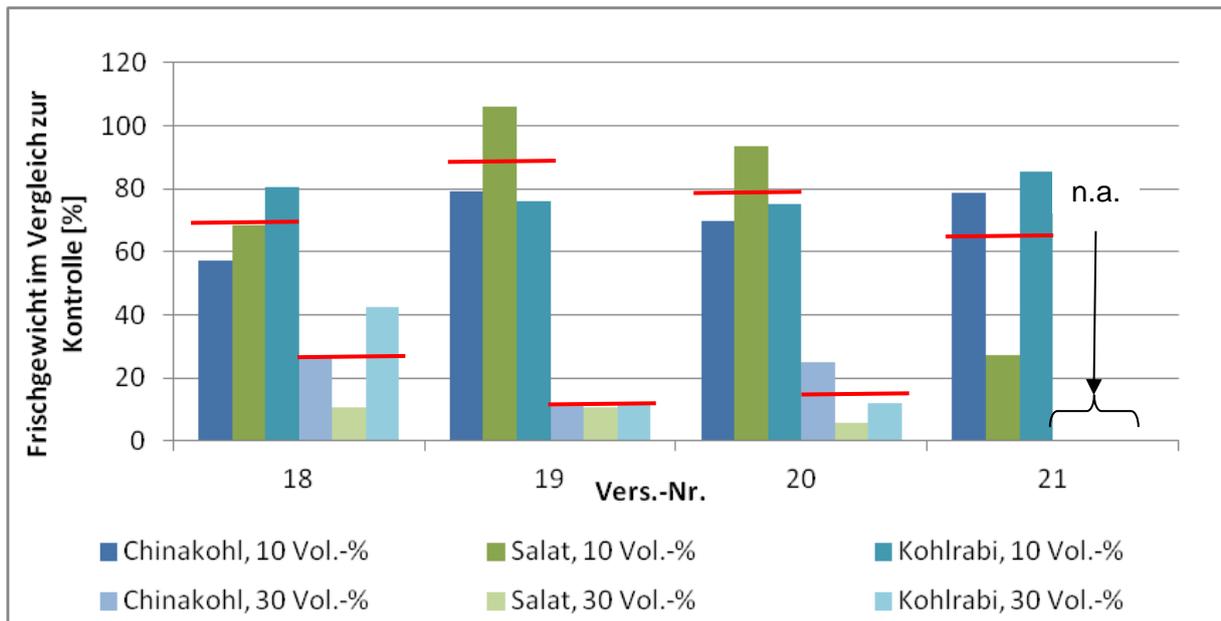


Abb. 6: Gegenüberstellung der Frischgewichte im Vergleich zur Kontrolle der verschiedenen Biotests mit den trockenen Proben bei einem Volumenanteil von 10 und 30 %; n.a. - bedeutet, dass die Proben während des Biotestversuchs verpilzten und dadurch nicht ausgewertet wurden; die rote Markierung gibt den Mittelwerte der drei Pflanzenarten wider

Tab. 11: Bewertung der Frischgewichte im Vergleich zur Kontrolle bei 10 und 30 Vol.-%; Die maximal zu erreichende Gesamtpunktzahl für die Frischgewichte beträgt jeweils 30. FG - Frischgewichte

Vers.-Nr.	Versuchsbezeichnung	Bewertung der FG bei 10 Vol.-%			Summe FG bei 10 Vol.-%	Bewertung der FG bei 30 Vol.-%			Summe FG bei 30 Vol.-%
		Chinakohl	Salat	Kohlrabi		Chinakohl	Salat	Kohlrabi	
		[Punkte]							
18	70 – Liter-Anlage, VTC	5	6	8	19	2	1	4	7
19	2,3 – Liter-Anlage, VTC	7	10	7	24	1	1	1	3
20	2,3 – Liter-Anlage, HTC	6	9	7	22	2	0	1	3
21	2,3 – Liter-Anlage, HTC sauer	7	2	8	17	0	0	0	0

5.2.3 Analyseergebnisse des Produktes

Gegenüber dem Ausgangsmaterial mit einem pH von 9 ist der pH-Wert beim carbonisierten Material niedriger: Beim HTC-Versuch mit Essigsäurezugabe beträgt der pH-Wert 4,7 und liegt bei den restlichen Versuchen mit 5,8 bis 6,6 etwas höher. (Siehe *Tab. 12*) Außer dem Material, welches unter Zugabe von Essigsäure umgesetzt wurde, weisen alle Materialien einen pH-Wert im allgemeinen, pflanzenverträglichen Bereich entsprechend den Vorgaben für Kultursubstrate (RAL-GZ_250/2) auf. Gegenüber dem Ausgangsmaterial mit 1,8 g/l ist der Salzgehalt in Folge der Carbonisierung gestiegen und bei der VTC in der 2,3-Liter-Anlage mit 3,2 g/l am größten. (Siehe *Tab. 12*) Weiterhin lässt sich feststellen, dass gegenüber dem Ausgangsmaterial der verfügbare Phosphor mit der Umsetzung zunimmt und der verfügbare Stickstoff insgesamt stark abnimmt: So beträgt die Summe an Stickstoff aus Ammonium und Nitrat weniger als 41 mg/Liter gegenüber 682 mg/Liter beim Ausgangsmaterial. (Siehe *Tab. 12*) Insgesamt wäre die Zugabe von 20 Vol.-% zum Substrat nach den Vorschriften der RAL-Gütesicherung auf Basis des Salzgehalts und der Nährstoffanalysen möglich.

Einschränkungen hinsichtlich der Verwendung nach den Vorschriften der RHP gibt es aufgrund zu hoher Gehalte an Phosphor, Magnesium, Mangan sowie Zink.

Die zusammenfassende Bewertung der Daten ist in *Tab. 13* dargestellt. Das Material aus dem HTC-Versuch weist gegenüber den anderen Materialien geringere Nährstoff- und Spurengehalte auf und erreicht damit in der zusammenfassenden Darstellung mit 4 von 7 möglichen Punkten die höchste Punktzahl. Im Vergleich dazu erreicht der VTC-Versuch in der 2,3-Liter-Anlage keinen Punkt und in der 70-Liter-Anlage nur 1 Punkt. Der saure HTC-Versuch erreicht null Punkte.

Insgesamt zeigt sich, dass bei der HTC gegenüber der VTC mehr bzw. überhaupt Mineralien ausgespült werden.

Aufgrund von Schimmelbildung bei anderen Versuchen des Arbeitspakets 2 wurden keine physikalischen Analysen durchgeführt.

Tab. 12: chemische Analyseergebnisse bzw. Nährstoffgehalte der Produkte der Anlagenvariation für trockenen carbonisierten Gärrückstand (Vers.-Nr. 18 – 21) nach CaCl₂-Extraktion bzw. CAL im Vergleich zu den Grenzwerten der RAL-Gütesicherung für Substratkompost; n.d. - Parameter konnte mit dem Standardanalyseverfahren für Substrate nicht analysiert werden, im Laufe des Arbeitspakets wurde das Analyseverfahren angepasst, sodass Daten ermittelt werden konnten; n.e. – es bestehen keine Grenzwerte für diesen Parameter

Vers.-Nr.	Versuchsbezeichnung	pH-Wert (CaCl ₂)	Salzgehalt [g/Liter]	P ₂ O ₅ (CAL)	K ₂ O (CAL)	Σ NO ₃ -N + NH ₄ -N [mg/Liter]	NH ₄ -N	NO ₃ -N
18	70 – Liter-Anlage, VTC	5,8	2,96	2.232	1.848	n.d.	136	n.d.
19	2,3 – Liter-Anlage, VTC	6,6	3,18	2.520	2.177	11	< 1	10
20	2,3 – Liter-Anlage, HTC	6,0	2,71	1.694	1.674	8	< 1	7
21	2,3 – Liter-Anlage, HTC sauer	4,7	2,40	1.240	1.227	41	19	22
Ausgangsmaterial		9,0	1,80	1.158	1.710	682	666	16
RAL Substratkompost (GZ 251) Typ 1		n.e.	2,5	< 1.200	< 2.000	< 300	n.e.	n.e.
RAL Substratkompost (GZ 251) Typ 2		n.e.	5,0	< 2.400	< 4.000	< 600	n.e.	n.e.

Tab. 13: Bewertung der chemischen Analysen der Anlagen- und Verfahrensvariation mit den Vorgaben der RHP für Torf und Kompost; Die maximal zu erreichende Gesamtpunktzahl beträgt 7

Vers.-Nr.	Versuchszeichnung	Bewertung der Grenzwerte im Vergleich zu Torf (2) und zu Kompost (1) nach				Summe chem. Analysen
		Wasser-Extraktion	BaCl-Extraktion	Spurenelemente	Mn-aktiv	
		[Punkte]				
18	70 – Liter-Anlage, VTC	0	0	0	1	1
19	2,3 – Liter-Anlage, VTC	0	0	0	0	0
20	2,3 – Liter-Anlage, HTC	2	1	0	1	4
21	2,3 – Liter-Anlage, HTC sauer	0	0	0	0	0

5.2.4 Fazit

Bei 10 Vol.-% Zugabe zur Mischung erzielt der HTC-Versuch ohne Zugabe von Essigsäure (Vers.-Nr. 20) mit insgesamt 26 von 39 möglichen Punkten das beste Ergebnis. Wie oben dargestellt, sind die chemischen Analyseergebnisse des HTC-Versuchs ohne Essigsäure gegenüber den anderen Versuchen besser, sodass er hier bei 10 Vol.-% Zumischung die höchste Gesamtpunktzahl erreicht. (Siehe *Tab. 14*) Mit 24 Punkten folgt der VTC-Versuch in der 2,3-Liter-Anlage (Vers.-Nr. 19), wobei die Ergebnisse der Biotests mit 24 von 30 Punkten um zwei Punkte besser sind als beim HTC-Versuch ohne Essigsäure (Vers.-Nr. 20). Der VTC-Versuch in der 70-Liter-Anlage (Vers.-Nr. 18) erreicht gegenüber dem VTC-Versuch in der 2,3-Liter-Anlage (Vers.-Nr. 19) eine um 4 Punkte geringere Gesamtpunktzahl. (Siehe *Tab. 14*) Dies ist auf die schlechteren Ergebnisse bei den Biotests mit 4 Punkten zurückzuführen. Der HTC-Versuch mit Essigsäurezugabe erreicht mit 17 Punkten die geringste Gesamtpunktzahl, die auf die geringen Frischgewichte bei den Biotests zurückzuführen sind.

Bei 30 Vol.-% Zumischung schneidet das Material der Vers.-Nr. 18 am besten ab. Der HTC- und VTC-Versuch der 2,3-Liter-Anlage schneiden hinsichtlich der Biotests identisch ab.

Tab. 14: Zusammenfassende Bewertung der verfügbaren Parameter; Die Frischgewichtsbewertung (FG) erfolgt auf Basis der Ergebnisse bei 10 und 30 Vol.-%. Die maximal zu erreichende Gesamtpunktzahl beträgt 37

Vers.-Nr.	Versuchszeichnung	Summe FG	Summe FG	Summe chem.	Summe Kriterien	Summe Kriterien
		10 Vol.-%	30 Vol.-%	Analysen	10 Vol.-%	30 Vol.-%
[1]		[Punkte]				
18	70 – Liter-Anlage, VTC	19	7	1	20	8
19	2,3 – Liter-Anlage, VTC	24	3	0	24	3
20	2,3 – Liter-Anlage, HTC	22	3	4	26	7
21	2,3 – Liter-Anlage, HTC sauer	17	0	0	17	0

5.3 Fazit des Arbeitspakets 2 und weiteres Vorgehen

Bei Zumischung von frischem und trockenem Material ergab sich bei den Biotests kein eindeutiger Unterschied. Aus diesem Grund werden die Materialien im nächsten Arbeitspaket nicht getrocknet.

Insgesamt fallen die chemischen Analysenergebnisse in Bezug auf die Grenzwerte der RHP sehr schlecht aus; die Grenzwerte einzelner Parameter werden nur selten von den carbonisierten Materialien eingehalten und insgesamt über alle Parameter von einem Material gar nicht. Nach den Grenzwerten der RAL-Gütesicherung für Substratkompost wäre die Zugabe von 20 Vol.-% zum Substrat möglich. Allerdings sind die Frischgewichte im Vergleich zur Kontrolle selbst bei 10 Vol.-% Zumischung um 25 % und mehr geringer, sodass hierdurch ein Einsatz ausgeschlossen wird.

Bezüglich des Anlagenvergleichs bietet die hydrothermale Carbonisierung bessere Möglichkeiten gegenüber der vapo-thermalen: Nährstoffe werden bei der HTC aus dem Material herausgelöst. Demgegenüber waren die Frischgewichte der Biotests bei 30 Vol.-% Zumischung des carbonisierten Materials im VTC-Versuch besser.

Zur besseren Bewertung des Nährstoffgehalts werden die Nährstoffe im nächsten Arbeitspaket nach der gleichen Methode wie Kompost und nicht wie Torf analysiert. Hierdurch ergeben sich bei der RHP höhere Grenzwerte. Weitere Informationen zu den Analysemethoden sind im *Anhang C: Substratspezifische Analysen* zu finden.

Insgesamt erscheint der Einsatz als organischer Dünger trotz hoher löslicher Nährstoffgehalte im Vergleich zu den Grenzwerten der RHP auf Basis einer ersten Abschätzung mit den Ergebnissen der Wasserextraktion nicht lohnenswert. Die Gehalte liegen im Wesentlichen unter 1 Ma.-%. Eine Bewertung der Langzeitdüngerwirkung wurde nicht durchgeführt. Für eine abschließende Bewertung sind weitere Daten zu erheben.

Hinsichtlich der Gesamtbewertung der verschiedenen Materialien im Screening schneiden die carbonisierten halmgutartigen Materialien wie die verschiedenen Landschaftspflegematerialien Binsen und Rohrkolben gegenüber den anderen bei 30 Vol.-% Zumischung besser ab. Aus diesem Grund wird für die Untersuchung des Temperatur- und Zeiteinflusses im nächsten Arbeitspaket eine Mischung aus verschiedenen Landschaftspflegematerialien verwendet.

6. Arbeitspaket 3: Eruiieren des Einflusses der Prozessparameter auf die Produkteigenschaften sowie Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit der Versuche

6.1 Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit

6.1.1 Versuchsparameter

Zur Untersuchung der Reproduzierbarkeit wurden drei Versuche mit den gleichen Reaktionsparametern durchgeführt. Von jedem Carbonisierungsversuch wurden Biotests in einer Dreifachbestimmung angesetzt. Auf Basis der Biotestergebnisse wird hier eine Aussage zur Reproduzierbarkeit getroffen. Als Versuchsparameter wurden 200 °C und 2 Stunden gewählt und als Inputmaterial pflanzlicher Gärrest.

In *Tabelle 15* sind die Kennwerte der aufgezeichneten Versuchsparameter der verschiedenen Versuche mit Gärrückstand zusammengestellt. Insgesamt zeigt sich, dass die Versuchsparameter alle sehr dicht beieinander liegen: Im Mittel betrug die mittlere Aufheizzeit 7,1 Minuten bei einer Standardabweichung von 1,0 Minuten, die mittlere Reaktionszeit 2,0 Stunden mit einer Standardabweichung von 0,0 Stunden sowie die mittlere Reaktionstemperatur 202,3 °C mit einer Standardabweichung von 0,3 °C.

Tab. 15: Versuchsdaten der Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit

Vers.-Nr. [1]	Aufheizphase T [min]	Reaktionsphase	
		T [h]	$\bar{\theta}$ [°C]
30.1	8,2	2,0	202,5
30.2	6,2	2,0	202,3
30.3	7,0	2,0	202,0
Mittelwert	7,1	2,0	202,3
Standardabweichung	1,0	0,0	0,3

6.1.2 Ergebnisse der Biotests

Die Biotests wurden innerhalb dieses Arbeitspakets als Dreifachbestimmung durchgeführt. Gegenüber den vorhergehenden Versuchsreihen wurde das Frischgewicht nicht auf eine einzelne Pflanze bezogen, sondern auf eine Schale.

Die Frischgewichte der verschiedenen Pflanzen aus den Biotests bei Einsatz von frischem Material liegen bei einem Anteil von 10 Vol.-% im Mittel über die drei Pflanzenarten und über die drei Versuche bei 86 % im Vergleich zur Kontrolle. (Siehe *Tab. 16*) Hierbei ist Chinakohl mit 82 % im Vergleich zur Kontrolle am empfindlichsten. Da das Frischgewicht bei keiner Probe weniger als 80 % betrug, sind die Vorgaben der RAL-Gütesicherung und auch der RHP eingehalten. Zu beachten ist, dass alle Proben aufgrund auftretenden Schimmelbildung anstatt 21 Tage nur 10 Tage im Gewächshaus standen. Blattnekrosen oder eine hellere Blattverfärbung war bei den Biotests nicht zu beobachten.

Gegenüber den Ergebnissen bei 10 Vol.-% Zugabe an carbonisiertem Material fallen die Ergebnisse bei 30 Vol.-% deutlich schlechter aus (siehe *Tab. 16*): Die Frischgewichte der verschiedenen Pflanzen aus den Biotests liegen im Mittel über alle Pflanzen bei 50 % im

Vergleich zur Kontrolle, wobei Salat mit 59 % am besten abschneidet und Kohlrabi mit 42 % am schlechtesten.

Die Keimrate beträgt bei allen Versuchen mehr als 94 %, somit wurde nach den Vorschriften der RHP keine Keimhemmung nachgewiesen, da diese nicht mehr als 10 % beträgt. (siehe Tab. 16)

Die Bewertung der Reproduzierbarkeit der Carbonisierungsversuche sowie der Biotests selbst erfolgt über den relativen Fehler des Frischmasseertrags beim Chinakohl, Kohlrabi und Salat. Hierfür wurde die Standardabweichung des Mittelwerts ohne besondere Sicherheit zur Berechnung des relativen Fehlers verwendet.

Bei 10 Vol.-% Zumischung des carbonisierten Materials liegen die relativen Fehler unterhalb von 10 %. Beim Chinakohl und Salat liegen diese sogar unterhalb derer der Kontrolle. Lediglich beim Kohlrabi ist der relative Fehler mit 6,3 % gegenüber der Kontrolle mit nur 2,1 % größer. Bei 30 Vol.-% Zumischung beträgt der maximale relative Fehler 12,4 % (beim Chinakohl). Gegenüber der Kontrolle sind die relativen Fehler bei Zumischung von carbonisiertem Material beim Salat und Kohlrabi zwar höher, liegen aber unterhalb von 8,5 %. Aufgrund des maximalen relativen Fehlers von 12,4 % wird hier die Aussage getroffen, dass die Versuche reproduzierbar sind.

Tab. 16: Gegenüberstellung der Frischgewichte und Keimrate der verschiedenen Pflanzen und einzelnen Carbonisierungsversuche zur Untersuchung der Reproduzierbarkeit bei einem Volumenanteil von 10 und 30 %

Vers.-Nr.	Chinakohl			Salat			Kohlrabi		
	Frischgewicht im Vergleich zur Kontrolle	Mittleres Frischgewicht pro Schale	Keimrate	Frischgewicht im Vergleich zur Kontrolle	Mittleres Frischgewicht pro Schale	Keimrate	Frischgewicht im Vergleich zur Kontrolle	Mittleres Frischgewicht pro Schale	Keimrate
Einheit	[%]	[g]	[%]	[%]	[g]	[%]	[%]	[g]	[%]
Kontrolle	-	2,61	-	-	0,79	-	-	2,43	-
Rel. Fehler [%]	-	7,3	-	-	5,1	-	-	2,1	-
Volumenanteil 10 %									
Mittelwert	82	2,13	100	92	0,73	100	85	2,07	99
Rel. Fehler [%]	/	3,8	/	/	2,7	/	/	6,3	/
Volumenanteil 30 %									
Mittelwert	49	1,29	98	59	0,47	100	42	1,02	96
Rel. Fehler [%]	/	12,4	/	/	8,5	/	/	2,9	/

6.1.3 Analyseergebnisse des Produktes

Die Bewertung der Reproduzierbarkeit der Versuche auf Basis des jeweiligen Analyseparameters erfolgt hier wie bei den Biotests über den relativen Fehler. Hierfür wurde ebenfalls die Standardabweichung des Mittelwerts ohne besondere Sicherheit zur Berechnung des relativen Fehlers herangezogen.

Es zeigt sich insgesamt, dass der relative Fehler der Analyseergebnisse bei vielen Parametern unterhalb von 10 % liegt und die Daten damit vergleichbar. Insgesamt betrachtet sind die Versuche damit reproduzierbar. Abweichungen hiervon gibt es bei den Analyseergebnissen von Natrium (nach Wasserextraktion) mit einem relativen Fehler von 14 %, von Bor mit 26 %, von Kalium (nach BaCl₂-Extraktion) mit 11 % und von Magnesium nach Wasserextraktion mit 21 %. (Siehe Tab. 17)

Untersuchungen zur Stickstoffimmobilisierung ergaben, dass das Material nicht stabil ist und 365 bis 809 mg N/Liter bindet. Zu vermerken ist, dass die drei Proben bis zur Analyse unterschiedlich lang gelagert wurden, der biologische Abbau hierdurch unterschiedlich weit voran geschritten war und damit die Ergebnisse in solch einer Spannweite auftreten. Ein Indiz hierfür ist, dass die Proben bei längerer Lagerung im Kühlhaus bei 3 °C ebenfalls verschimmelt sind, wenn sie nach dem Abkühlen mit Luft in Berührung gekommen sind.

Tab. 17: chemische Analyseergebnisse der Produkte zur Untersuchung der Reproduzierbarkeit

Parameter	pH	Salz- gehalt	P ₂ O ₅	K ₂ O	Σ NO ₃ -N + NH ₄ -N	Mn aktiv	K	Na	Ca	Mg	
Analyse nach	VDLUFA					RHP (für Kompost)					
Extraktionsmittel	CaCl ₂	H ₂ O	CAL		CaCl ₂	-	CAT				
Einheit	[1]	[g/Liter]	[mg/Liter]			[mg/kg TS]	[mg/Liter Substrat]				
Mittelwert	5,7	3,20	3.165	1.733	55	57	1.010	35	2.025	656	
Rel. Fehler [%]	0	3	7	4	7	5	11	0	2	21	
Parameter	pH	Leitwert	Σ NO ₃ -N + NH ₄ -N	P	K	Na	Ca	Mg	Cl	SO ₄ - S	
Analyse nach	RHP (für Kompost)										
Extraktionsmittel	Wasser										
Einheit	[1]	[mS/m]	[mg/Liter Substrat]								
Mittelwert	6,0	165	201	754	1075	42	40	721	148	64	
Rel. Fehler [%]	2	2	4	1	0	14	0	2	7	0	
Parameter	Fe	Mn	Zn	B	Cu						
Analyse nach	RHP (für Kompost)										
Einheit	[µg/Liter Substrat]										
Mittelwert	5.431	6.277	2.104	307	52						
Rel. Fehler [%]	2	5	2	26	10						

6.1.4 Fazit

Der relative Fehler der Frischgewichte der Biotests mit Kohlrabi, Chinakohl und Salat liegt bei 10 Vol.-% Zumischung des carbonisierten Materials unter 10 %. Gegenüber der Kontrolle ist der Fehler lediglich bei Versuchen mit Kohlrabi höher. Bei 30 Vol.-% Zumischung steigt der relative Fehler auf maximal 12,4 % (beim Chinakohl) an. Trotz dessen sind die Ergebnisse der einzelnen Carbonisierungsversuche nicht konträr zu einander, sodass von einer Reproduzierbarkeit der Versuche ausgegangen wird.

Zu bemerken ist, dass die Ergebnisse der Biotests innerhalb dieser Versuchsreihe gegenüber den Ergebnissen beim Eduktscreening deutlich unterschiedlich sind: Hier betragen die Frischgewichte im Mittel über alle drei Pflanzenarten lediglich 65 % im Vergleich zur Kontrolle bei 10 Vol.-% Zumischung gegenüber 86 % in dieser Versuchsreihe und 25 % bei 30 % Zumischung im Eduktscreening gegenüber 50 % in dieser Versuchsreihe. Bei der Auswertung der Biotests ist zum einen aufgefallen, dass die Substratmischungen mit carbonisiertem Material insgesamt feuchter waren gegenüber denjenigen aus dem Eduktscreening. Rückschlüsse auf bspw. unterschiedliche Nährstoffgehalte können aufgrund unterschiedlicher Analysemethoden im Eduktscreening und dieser Versuchsreihe für die Parameter nach RHP nicht erfolgen. So wurden im Eduktscreening die Methoden für Torf verwendet und hier die Methoden für Kompost. Auf Basis der Analysen nach den Methoden von VDLUFA hatte das Material innerhalb dieser Versuchsreihe etwa 500 mg/Liter mehr P_2O_5 , etwa 200 mg/Liter weniger K_2O bei einem vergleichbaren pH-Wert. Zum anderen ist bekannt, dass die Materialien bei den Analysen zur Stickstoffimmobilisierung nicht stabil waren und mit 365 bis 809 mg N/Liter eine hohe Stickstoffimmobilisierung aufweisen. Dies könnte den geringeren Biomasseaufwuchs nach 21 Tagen erklären.

In Bezug auf die Analyseergebnisse der einzelnen chemischen Parameter zeigt sich insgesamt, dass der relative Fehler bei vielen Parametern unterhalb von 10 % liegt; die Daten liegen damit dicht beieinander und die Versuche sind damit reproduzierbar. Abweichungen hiervon mit einem relativen Fehler von bis zu 58 % weisen Natrium, Magnesium, Bor, Kalium und Zink auf.

6.2 Untersuchungen zum Einfluss der Temperatur und Zeit bei Einsatz von Landschaftspflegematerial

6.2.1 Versuchsparameter

Als Inputmaterial wurde eine Mischung von Landschaftspflegematerialien verwendet, die von ehemalige Torfabbauf Flächen der Klasmann-Deilmann GmbH der Standorte Rehden, Vehneemoor und Bourtanger Moor stammt. Das Material setzt sich im Wesentlichen aus Pfeifengras und Binsen zusammen.

Zur Untersuchung des Einfluss von Temperatur und Reaktionszeit wurden die Materialien bei 3 verschiedenen Zeiten und je 3 verschiedenen Temperaturen thermochemisch umgesetzt: die Parameter sind 0,5 Stunden, 2 Stunden und 4 Stunden sowie 140°C, 180°C und 195°C. Im Unterschied zu den Voruntersuchung wurde als höchste Temperatur 195 °C anvisiert. Hintergrund dessen ist, dass hierdurch angestrebt wurde, lediglich die Hemicellulose zu hydrolysieren und nicht die Cellulose und sich damit Verbesserungen hinsichtlich der biologischen Eignung ergeben.

Im Vergleich zu den carbonisierten Materialien wurden Biotests mit dem Eingangsmaterial in die Untersuchung einbezogen. Das Landschaftspflegematerial wurde hierfür auf eine Länge von etwa 2 cm gekürzt. Die Biotests wurden innerhalb dieses Arbeitspakets als Dreifachbestimmung durchgeführt.

6.2.2 Ergebnisse der Biotests

Die Versuche mit konditioniertem und purem Landschaftspflegematerial standen 21 Tage im Gewächshaus. Nach 10 Tagen wurde Schimmelbildung festgestellt, die sich anschließend wieder zurückbildete. Die Versuche wurden parallel zu den Versuchen zur Reproduzierbarkeit des *Kapitel 6.1* durchgeführt.

Bei 10 Vol.-% Zumischung von carbonisiertem Landschaftspflegematerial ergibt sich innerhalb der Temperaturreihen kein signifikanter Einfluss durch die Reaktionszeit. (Siehe *Abb. 7*) Bei 180 °C und 195 °C ist der Frischmasseertrag bei Einsatz von purem Material gegenüber der Mischung, deren Material eine halbe Stunde umgesetzt wurde, signifikant größer. Weiterhin ist das Frischgewicht bei allen carbonisierten Materialien bei 10 Vol.-% Zumischung größer oder gleich im Vergleich zur Kontrolle. Bei 140 °C und 30 Vol.-% Zumischung an carbonisiertem Material ergibt sich in der Zeitvariation bei der hier verwendeten Sicherheit von 68 % kein Einfluss der Zeit auf den Frischmasseertrag. Demgegenüber ergibt sich eine Abhängigkeit ab einer Umsetzungstemperatur von 180°C. Jedoch sind diese nicht in jedem Fall mit der Zeit konsistent. So ist das Frischgewicht beim Chinakohl und Salat bei 180°C und 2 Stunden größer als bei den anderen beiden Zeiten der Temperaturreihe und beim Kohlrabi ist das Frischgewicht bei 195°C und 4 Stunden geringer als bei den anderen beiden Zeiten der Temperaturreihe. (siehe *Abb. 8*) Damit ist von keinem Einfluss der Reaktionszeit auf die Produkteigenschaften auszugehen.

Mit zunehmender Temperatur sinkt das Frischgewicht gegenüber dem Inputmaterial und der Kontrolle sowohl bei 10 als auch bei 30 Vol.-% Zumischung des carbonisierten Materials signifikant. (Siehe *Abb. 7* und *8*) Demgegenüber ist das Frischgewicht selbst bei 30 Vol.-%

Zumischung von purem Landschaftspflegematerial mit dem der Kontrolle vergleichbar oder sogar besser.

Die Vorgaben der RHP hinsichtlich des Frischgewichts werden bei 10 Vol.-% Zugabe in jedem Fall erfüllt und bei 30 Vol.-% lediglich von purem Landschaftspflegematerial. (Vergl. mit den Daten aus *Abb. 7 und 8*) Die Vorgaben zur Keimung werden sowohl bei 10 als auch bei 30 Vol.-% Zumischung von allen Materialien eingehalten.

Die Kressetests waren gegenüber der vorhergehenden Versuchsreihe weder bei 10 noch bei 30 Vol.-% Zumischung verpilzt. Bei 10 Vol.-% Zumischung betrug die Bonitur des Gasphasen- und Keimungstests in jedem Fall mehr als 4 und ist als gut bis sehr gut zu bewerten. Bei 30 Vol.-% Zumischung sind die Ergebnisse des Gasphasentests mit denen bei 10 Vol.-% Zumischung identisch. Lediglich bei 195°C Umsetzungstemperatur beträgt die Bonitur im Mittel 3,7 und ist damit mittelmäßig. Grund für die Boniturbewertung ist eine hellere Färbung der Kressekeimblätter. Beim Kressekeimungstest sind die Bonituren mit im Mittel 4,5 bei 195°C Reaktionstemperatur besser als die des Gasphasentests. Darüber hinaus ist die Bonitur des Keimungstests mit im Mittel 3,9 bei 180°C Umsetzungstemperatur schlechter als bei der Umsetzungstemperatur von 195°C mit 4,5. Bei 140°C und 195°C sind die Boniturergebnisse des Keimungstests im Wesentlichen identisch.

Eine Zumischung von 10 Vol.-% ist nach den Ergebnissen in jedem Fall möglich. 30 Vol.-% kommen lediglich vom Ausgangsmaterial sowie vom bei 140°C behandelten Material in Betracht.

Tab. 18: Zusammenstellung der Bonituren der Kressetests als Mittelwert aus der Bonitur der Wurzel und des Sprosses bei 10 und 30 Vol.-% Zumischung

Vers.-Nr.	Versuchsparameter		10 Vol.-%		30 Vol.-%	
	Θ	Zeit	Gasphasen-test	Keimungs-test	Gasphasen-test	Keimungs-test
Einheit	[°C]	[h]	[1]	[1]	[1]	[1]
50	195	4,0	5,0	4,8	3,3	4,5
51	195	2,0	5,0	5,0	3,5	4,5
52	195	0,5	5,0	5,0	4,3	4,5
Mittelwert			5,0	4,9	3,7	4,5
53	180	4,0	4,8	4,8	4,5	4,8
54	180	2,0	4,8	5,0	5,0	3,3
55	180	0,5	5,0	4,3	4,8	3,5
Mittelwert			4,9	4,7	4,8	3,9
56	140	4,0	5,0	5,0	5,0	4,8
57	140	2,0	5,0	5,0	5,0	4,5
58	140	0,5	5,0	5,0	5,0	5,0
Mittelwert			5,0	5,0	5,0	4,8
Ausgangsmaterial			4,8	4,3	5,0	4,5

Abb. 7: Darstellung des Frischgewichts bei 10 Vol.-% Zumischung in Abhängigkeit von der Reaktionszeit bei unterschiedlichen Temperaturen mit den jeweiligen Standardabweichungen ohne Beachtung einer besonderen Sicherheit; Bei 5 h sind die Kontrollen aufgetragen

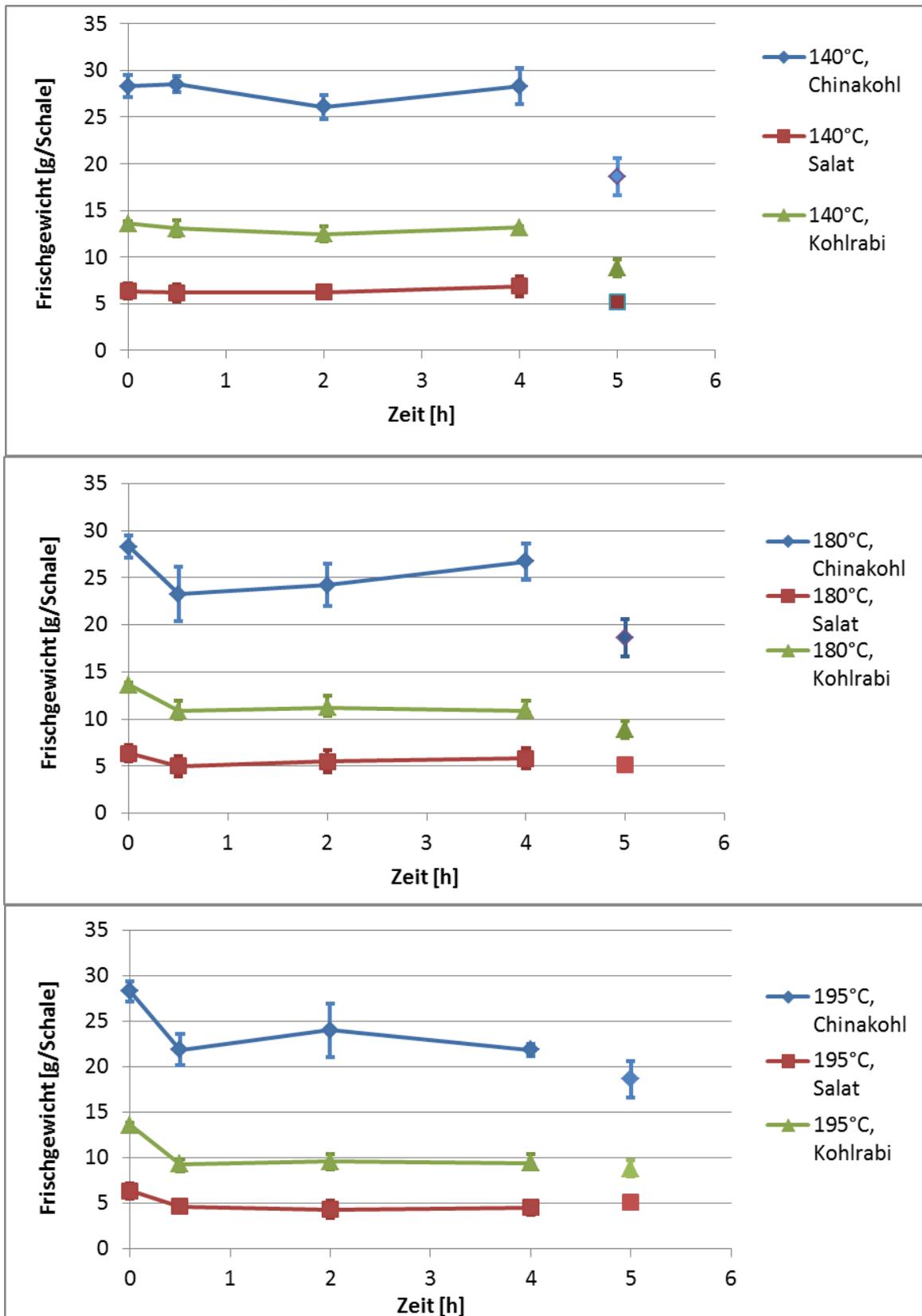
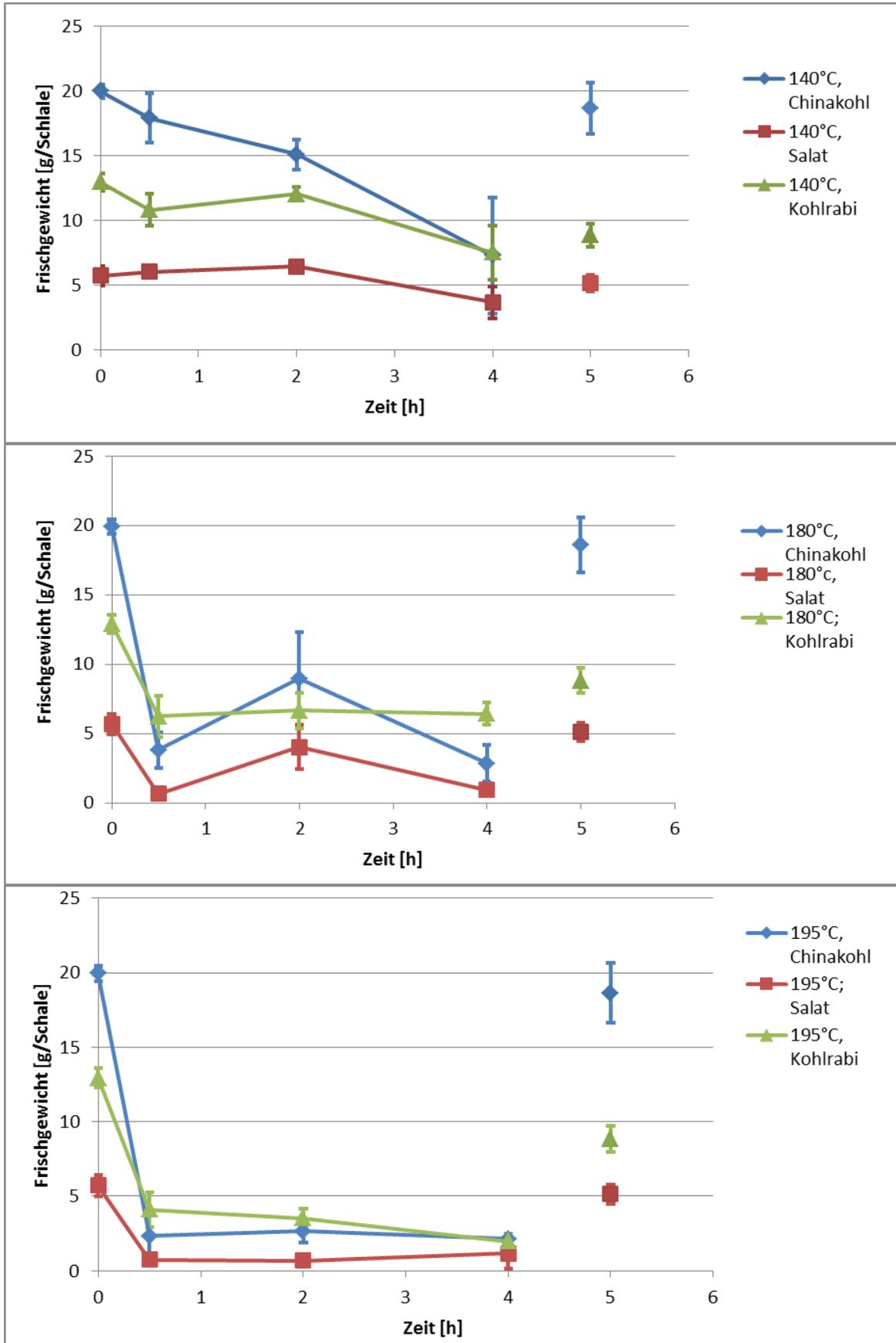


Abb. 8: Darstellung des Frischgewichts bei 30 Vol.-% Zumischung in Abhängigkeit von der Reaktionszeit bei unterschiedlichen Temperaturen mit den jeweiligen Standardabweichungen ohne Beachtung einer besonderen Sicherheit; Bei 5 h sind die Kontrollen aufgetragen



6.2.3 Analyseergebnisse des Produktes

Aufgrund der oben dargestellten Überschreitung des Grenzwerts der RHP für Kompost von einzelnen chemischen Analyseparametern erfolgt hier nur eine Gegenüberstellung der Daten der Versuche mit den Grenzwerten der RAL-Gütesicherung.

Der pH-Wert der carbonisierten Materialien liegt mit Werten unterhalb von 5 außerhalb des pflanzenverträglichen Bereichs und müsste damit im Einsatzfall nach Zumischung zum Torf auf einen Bereich zwischen 5 und 5,8 angepasst werden. Gegenüber dem Ausgangsmaterial nimmt der pH-Wert durch die thermochemische Konversion ab. Der Salzgehalt steigt demgegenüber und nimmt mit zunehmender Reaktionstemperatur und Reaktionszeit zu. Ebenfalls nimmt der Gehalt an Kaliumdioxid und Phosphat mit steigender Reaktionstemperatur zu und liegt ab Temperaturen von 180°C deutlich oberhalb des Werts des Eingangsmaterials; dahingegen nimmt der Gehalt an Ammoniumstickstoff ab. (Vergl. mit Daten der *Tab. 19*)

Nach der thermochemischen Konversion können die Materialien auf Basis der Grenzwerte von Typ 1 der RAL-Gütesicherung zu 40 Vol.-% dem Substrat zugegeben werden. (Vergl. mit Daten der *Tab. 19*)

Untersuchungen zur Stickstoffimmobilisierung und Bodenatmung wurden nicht durchgeführt, da das Material trotz Lagerung im Kühlhaus verschimmelt war, bevor Analysen durchgeführt werden konnten.

Tab. 19: chemische Analyseergebnisse bzw. Nährstoffgehalte der Produkte der Temperatur- und Zeitvariation von Landschaftspflegematerial nach CaCl₂-Extraktion bzw. CAL im Vergleich zu den Grenzwerten der RAL-Gütesicherung für Substratkompost; n.e. – für diesen Parameter bestehen keine Grenzwerte

Vers.-Nr.	Versuchsparameter		pH-Wert [CaCl ₂]	Salzgehalt [g/Liter]	P ₂ O ₅ (CAL)	K ₂ O (CAL)	NH ₄ -N
	Θ [°C]	Zeit [h]					
50	195	4,0	4,2	1,74	186	680	8
51	195	2,0	4,0	1,71	202	612	7
52	195	0,5	3,8	1,37	267	617	4
53	180	4,0	3,9	1,44	162	379	10
54	180	2,0	3,8	1,02	142	319	3
55	180	0,5	3,8	1,09	227	397	3
56	140	4,0	4,5	0,42	62	138	8
57	140	2,0	4,7	0,55	62	236	22
58	140	0,5	5,1	0,59	48	279	18
Ausgangsmaterial			5,8	0,60	33	281	24
RAL Substratkompost (GZ 251) Typ 1			n.e.	2,5	< 1.200	< 2.000	n.e.
RAL Substratkompost (GZ 251) Typ 2			n.e.	5,0	< 2.400	< 4.000	n.e.

6.2.4 Fazit

Trotz guter bzw. besserer Ergebnisse beim Frischgewicht bei Einsatz von 10 Vol.-% carbonisiertem Landschaftspflegematerial gegenüber der Kontrolle zeigen sich auch bei 30 Vol.-% Zumischung der unterschiedlich carbonisierten Materialien Wachstumshemmungen bei 180°C und 190°C Umsetzungstemperatur. Weiterhin ist mit steigender Umsetzungstemperatur eine Reduktion des Frischgewichts zu verzeichnen. Ein eindeutiger Einfluss der Umsetzungszeit auf die Biotests ergibt sich nicht. Dahingegen ist das Frischgewicht bei Verwendung von purem Landschaftspflegematerial selbst bei 30 Vol.-% Zumischung mit dem der Kontrolle vergleichbar. Die Keimrate betrug sowohl beim carbonisierten als auch beim puren Material in jedem Fall mehr als 90 % und ist damit gartenbaulich unproblematisch. In Bezug auf den Kressegasphasentest werden bei 195 °C Umsetzungstemperatur toxische Effekte angezeigt und beim Kressekeimungstest bei 180 °C. Ein Einsatz des carbonisierten Materials im Substrat ist insgesamt nicht möglich.

Hinsichtlich der Nährstoffe lässt sich festhalten, dass der Salzgehalt im Material mit zunehmender Umsetzungstemperatur zunimmt. Der Kaliumgehalt steigt deutlich an, wohingegen der Gehalt an Ammoniumstickstoff abnimmt. Der Gehalt an Orthophosphat beträgt ab einer Umsetzungstemperatur von 180°C das 6-fache des Ausgangsgehalts.

Mit Blick auf den Einsatz im Substrat ergeben sich trotz der zum Teil stark zunehmenden Nährstoffgehalte weder beim carbonisierten noch beim puren Landschaftspflegematerial Einschränkungen. Auf Basis dessen sind sogar Zumischungen von 40 Vol.-% nach RAL-Gütesicherung möglich.

6.3 Untersuchungen zum Einfluss der Temperatur und Zeit bei Einsatz von pflanzlichem Gärrest

Die Versuche wurden mit pflanzlichem Gärrückstand durchgeführt. Der Gärrückstand stammt aus der selben Biogasanlage wie derjenige aus dem Arbeitspaket 2.

Zur Untersuchung des Einfluss von Temperatur und Reaktionszeit wurden die in *Tab. 20* dargestellten Versuche durchgeführt. Im Vergleich zu den carbonisierten Materialien wurden darüber hinaus Biotests mit dem jeweiligen Eingangsmaterial in die Versuche miteinbezogen.

Die Biotests wurden innerhalb dieses Arbeitspakets als Dreifachbestimmung durchgeführt. Aufgrund von Schimmelbildung auf den Substraten konnten allerdings nicht alle Ansätze über 21 Tage im Gewächshaus stehen.

Tab. 20: Darstellung der durchgeführten Versuche mit Gärrückstand (Vers.-Nr. 30 – 40) bei verschiedenen Zeiten und Temperaturen

Vers.-Nr. [1]	Eingesetztes Material [1]	Temperatur [°C]	Reaktionszeit [h]
30	Gärrückstand pflanzlich ⁵	200	2,0
31	Gärrückstand pflanzlich	195	4,0
32	Gärrückstand pflanzlich	195	2,0
33	Gärrückstand pflanzlich	195	0,5
34	Gärrückstand pflanzlich	180	4,0
35	Gärrückstand pflanzlich	180	2,0
36	Gärrückstand pflanzlich	180	0,5
37	Gärrückstand pflanzlich	140	4,0
38	Gärrückstand pflanzlich	140	2,0
39	Gärrückstand pflanzlich	140	0,5
40	Gärrückstand pflanzlich	0	0,0

⁵ Mittelwert aus den Versuchen zur Untersuchung der Reproduzierbarkeit

6.3.1 Versuchsparmeter

Im Folgenden sind die Kennwerte der aufgezeichneten Versuchsparmeter der verschiedenen Versuche zusammengestellt. Vergleichend sind hier und im Folgenden die Werte aus dem Versuch zur Reproduzierbarkeit bei den Versuchen mit Gärrückstand (Vers.-Nr. 31 – 39) aufgeführt.

Tab. 21: Versuchsdaten der Untersuchungen zum Einfluss der Temperatur und Zeit bei Einsatz von Gärrückstand

Nr. [1]	Aufheizphase		Reaktionsphase		
	t [min]	Δp [bar]	t [h]	\bar{p} [bar]	$\bar{\theta}$ [°C]
30	7,1	15,0	2,0	14,9	202,3
31	8,2	12,4	4,0	13,0	196,3
32	4,3	16,2	2,0	13,2	196,7
33	4,5	12,1	0,5	13,4	197,8
Mittelwert	5,7				196,9
Standardabweichung	2,2				0,8
34	4,1	9,8	4,0	9,3	183,0
35	8,3	9,5	2,0	9,2	182,4
36	8,2	9,0	0,5	8,9	180,6
Mittelwert	6,9				182,0
Standardabweichung	2,4				1,2
37	24,0	2,7	4,0	2,7	139,8
38	10,7	2,6	2,0	2,7	141,3
39	16,2	2,6	0,5	2,9	139,6
Mittelwert	17,0				140,2
Standardabweichung	6,7				0,9

6.3.2 Ergebnisse der Biotests

Die Standzeit der Mischungen mit carbonisiertem Gärrückstand (Vers.-Nr. 30 – 40) im Gewächshaus aufgrund von Schimmelbildung betrug teilweise nur 10 Tage. Aufgrund von lediglich 10 Tagen im Gewächshaus anstatt 21 Tagen sind die Frischgewichte insgesamt sehr gering. Trotzdem sind aber schon hier zum Teil relevante Unterschiede zur Kontrolle oder auch zu vorhergehenden Versuchen zu erkennen, womit hieraus Informationen für weitere Untersuchungen gewonnen werden können und somit die Daten im Folgenden näher betrachtet werden.

Bei 10 Vol.-% Zumischung sind die Frischgewicht aller Proben mit carbonisiertem Material nach 10 Tagen aufwuchs innerhalb der Pflanzenart nicht signifikant voneinander unterschiedlich. Lediglich der Aufwuchs von Chinakohl bei Einsatz von bei 195°C umgesetzten Gärrückstand weist ein signifikant niedrigeres Frischgewicht mit steigender Reaktionszeit auf. (siehe Tab. 22) Die Frischgewichte betragen im Vergleich zur Kontrolle über alle Proben einer Pflanzenart und alle Temperaturvariationen gemittelt für Chinakohl 78 %, für Salat 97 % und für Kohlrabi 86 %. Chinakohl reagiert damit am empfindlichsten auf den carbonisierten Gärrest. Im Vergleich zur Kontrolle ist das Frischgewichte der Proben bei Verwendung von carbonisierterem Material außer bei Salat signifikant geringer. Außer der Schimmelbildung wurden keine anderen Schadbilder beobachtet.

Das Frischgewicht des Chinakohls des Vers.-Nr. 36 aus Tab. 23 ist nach 21 Tagen im Gewächshaus vergleichbar mit dem der Kontrolle. Ebenfalls vergleichbar mit der Kontrolle

sind die Vers.-Nr. 38 (140°C; 2,0 Stunden) und 40 (Ausgangsmaterial). In Voruntersuchung zum Temperatur- und Zeitverhalten betrug das Frischgewicht im Vergleich zur Kontrolle bei dem Versuch über 0,5 Stunden bei 180°C lediglich 68 % und ist damit gegenüber dieser Versuchsreihe deutlich geringer; Bei beiden Versuchen war das Material nicht verschimmelt. Kohlrabi und Salat weisen bei dem Versuch Nr. 39 mit den Prozessparametern 140°C und 0,5 Stunden, die über 21 Tage aufwuchsen, gegenüber der Kontrolle ein leicht reduziertes Frischgewicht auf: 18 % bei Salat und 12 % bei Kohlrabi.

Bei 30 Vol.-% Zumischung und 10 Tagen aufwuchs sinkt das Frischgewicht bei allen drei Pflanzenarten signifikant mit steigender Zeit. (siehe Tab. 24) Beim Salat ist das Frischgewicht bei 140°C nicht signifikant unterschiedlich. Weiterhin sinkt das Frischgewicht mit steigender Temperatur signifikant und ist insgesamt gegenüber der Kontrolle geringer. (siehe Tab. 24)

Bei den Proben, die 21 Tage im Gewächshaus standen, ist das Frischgewicht signifikant geringer gegenüber der Kontrolle, wobei das Material mit den Prozessparametern 140°C und 2 Stunden beim Chinakohl 75 % Frischgewicht im Vergleich zur Kontrolle besitzt und das Ausgangsmaterial beim Kohlrabi nur 47 %. (siehe Tab. 25)

Die Vorgaben der RHP hinsichtlich der Keimrate werden von allen Proben sowohl bei 10 als auch bei 30 Vol.-% Zumischung mit mehr als 94 % eingehalten. (siehe nachfolgende Tabellen)

Tab. 22: Gegenüberstellung der Frischgewichte und Keimrate der verschiedenen Pflanzen und einzelnen Carbonisierungsversuche zur Untersuchung des Einflusses von Temperatur und Zeit bei Einsatz von Gärrest bei einem Volumenanteil von 10 % für die Versuche mit einer Dauer der Biotests von 10 Tagen

Vers.-Nr.	Versuchsparameter		Chinakohl			Salat			Kohlrabi		
	Θ	Zeit	Mittleres Frischgewicht pro Schale	Standardabweichung	Keimrate	Mittleres Frischgewicht pro Schale	Standardabweichung	Keimrate	Mittleres Frischgewicht pro Schale	Standardabweichung	Keimrate
Einheit	[°C]	[h]	[g]	[g]	[%]	[g]	[g]	[%]	[g]	[g]	[%]
Mittelwert 30	200	2,0	2,13	0,08	100	0,73	0,02	100	2,07	0,13	99
Kontrolle			2,61	0,19		0,79	0,04		2,43	0,05	
31	195	4,0	1,93	0,16	100	0,73	0,04	100	2,11	0,06	100
32	195	2,0	1,99	0,29	97	0,75	0,12	100	2,22	0,18	100
33	195	0,5	2,25	0,08	100	0,78	0,05	100	2,19	0,10	100
34	180	4,0	2,04	0,23	100	0,76	0,04	100	2,15	0,11	100
35	180	2,0	1,88	0,17	100	0,76	0,04	100	2,01	0,20	97
36	180	0,5				0,81	0,02	97	1,98	0,03	100
37	140	4,0				0,77	0,02	100			
38	140	2,0				0,84	0,03	100	1,88	0,10	100
40	0	0,0				0,72	0,08	100			

Tab. 23: Gegenüberstellung der Frischgewichte und Keimrate der verschiedenen Pflanzen und einzelnen Carbonisierungsversuche zur Untersuchung des Einflusses von Temperatur und Zeit bei Einsatz von Gärrest bei einem Volumenanteil von 10 % für die Versuche mit einer Dauer der Biotests von 15 und 21 Tagen

Vers.-Nr.	Versuchsparameter		Chinakohl				Salat				Kohlrabi			
	Θ	Zeit	Dauer der Biotests	Mittleres Frischgewicht pro Schale	Standardabweichung	Keimrate	Dauer der Biotests	Mittleres Frischgewicht pro Schale	Standardabweichung	Keimrate	Dauer der Biotests	Mittleres Frischgewicht pro Schale	Standardabweichung	Keimrate
Einheit	[°C]	[h]	[d]	[g]	[g]	[%]	[d]	[g]	[g]	[%]	[d]	[g]	[g]	[%]
Kontrolle			21	23,96	1,20		21	8,84	0,25		21	13,04	0,72	
36	180	0,5	21	21,24	3,31	100								
37	140	4,0	15	5,96	0,90	100					15	4,94	0,36	100
38	140	2,0	21	20,56	3,37	100								
39	140	0,5	15	6,44	1,00	100	21	7,28	0,60	100	21	11,44	0,78	100
40	0	0,0	21	22,32	1,10	100					15	4,31	0,48	100

Tab. 24: Gegenüberstellung der Frischgewichte und Keimrate der verschiedenen Pflanzen und einzelnen Carbonisierungsversuche zur Untersuchung des Einflusses von Temperatur und Zeit bei Einsatz von Gärrest bei einem Volumenanteil von 30 % für die Versuche mit einer Dauer der Biotests von 10 Tagen

Vers.-Nr.	Versuchsparameter		Chinakohl			Salat			Kohlrabi		
	Θ	Zeit	Mittleres Frischgewicht pro Schale	Standardabweichung	Keimrate	Mittleres Frischgewicht pro Schale	Standardabweichung	Keimrate	Mittleres Frischgewicht pro Schale	Standardabweichung	Keimrate
Einheit	[°C]	[h]	[g]	[g]	[%]	[g]	[g]	[%]	[g]	[g]	[%]
Mittelwert 30	200	2,0	1,29	0,16	98	0,47	0,04	100	1,02	0,03	96
Kontrolle			2,61	0,19		0,79	0,04		2,43	0,05	
31	195	4,0	1,06	0,17	94	0,38	0,04	100	1,05	0,03	100
32	195	2,0	1,29	0,06	100	0,39	0,07	100	1,06	0,08	94
33	195	0,5	1,65	0,09	100	0,56	0,02	100	1,57	0,08	100
34	180	4,0	1,30	0,16	100	0,46	0,05	100	1,07	0,13	94
35	180	2,0	1,29	0,35	97	0,56	0,03	100	1,31	0,21	97
36	180	0,5	1,67	0,08	100	0,55	0,10	100	1,68	0,05	100
37	140	4,0				0,61	0,03	100			
38	140	2,0				0,66	0,03	100	1,64	0,12	100
39	140	0,5				0,59	0,06	100	1,62	0,06	97
40	0	0,0				0,57	0,07	100			

Tab. 25: Gegenüberstellung der Frischgewichte und Keimrate der verschiedenen Pflanzen und einzelnen Carbonisierungsversuche zur Untersuchung des Einflusses von Temperatur und Zeit bei Einsatz von Gärrest bei einem Volumenanteil von 30 % für die Versuche mit einer Dauer der Biotests von 15 und 21 Tagen

Vers.-Nr.	Versuchsparameter		Chinakohl				Kohlrabi			
	Θ	Zeit	Dauer der Biotests	Mittleres Frischgewicht pro Schale	Standardabweichung	Keimrate	Dauer der Biotests	Mittleres Frischgewicht pro Schale	Standardabweichung	Keimrate
Einheit	[°C]	[h]	[d]	[g]	[g]	[%]	[d]	[g]	[g]	[%]
Kontrolle			21	23,96	1,20		21	13,04	0,72	
37	140	4,0	15	5,29	0,93	97	15	4,36	0,11	100
38	140	2,0	21	18,08	1,02	100				
39	140	0,5	15	4,52	0,19	100				
40	0	0,0	15	3,85	0,32	100	21	6,12	0,52	100

Tab. 26: Zusammenstellung der Bonituren der Kressetests als Mittelwert aus der Bonitur der Wurzel und des Sprosses bei 10 und 30 Vol.-% Zumischung

Vers.-Nr.	Versuchsparameter		10 Vol.-%		30 Vol.-%	
	Θ	Zeit	Gasphasen-test	Keimungs-test	Gasphasen-test	Keimungs-test
Einheit	[°C]	[h]	[1]	[1]	[1]	[1]
31	195	4,0	4,8	5,0	3,8	3,0
32	195	2,0	4,5	4,8	4,3	3,0
33	195	0,5	5,0	4,8	4,0	3,0
Mittelwert			4,8	4,9	4,0	3,0
34	180	4,0	5,0	5,0	4,8	3,0
35	180	2,0	4,5	5,0	3,8	3,0
36	180	0,5	4,8	5,0	2,5	4,0
Mittelwert			4,8	5,0	3,7	3,3
37	140	4,0	5,0	4,8	2,3	3,3
38	140	2,0	5,0	5,0	4,5	4,0
39	140	0,5	5,0	4,3	4,5	4,0
Mittelwert			5,0	4,7	3,8	3,8
40	0	0	4,5	5,0	5,0	4,5

Hinsichtlich der Bonitur der Kressetests (siehe Tab. 26) zeigt sich, dass gegenüber den vorhergehenden Versuchsreihen beim Gasphasentest nur die Substratoberfläche verschimmelt war und nicht die Kresse selbst. Bei 10 Vol.-% Zumischung sind die Gasphasentests mit einer mittleren Bonitur von 4,8 bei 195°C sowie 180°C geringfügig besser als das Ausgangsmaterial mit 4,5 und bei 140°C mit 5,0 am besten. Außer bei der Temperatur 140°C sind die mittleren Bonituren des Keimungstests geringfügig besser gegenüber dem Gasphasentest. Die Bonitur des Gasphasentests ist aufgrund vereinzelter hellerer Blaufärbung der Kresse selbst niedriger. Bei 30 Vol.-% Zumischung sind die Bonituren insgesamt mit

Ausnahme des Eingangsmaterials schlechter, was auf eine geringere Höhe der Kresse beim Keimungstest und eine Gelbfärbung der Kresseblätter beim Gasphasentest zurückzuführen ist. Beim Gasphasentest schneiden die Proben der Temperaturreihe 180°C und 140°C schlechter ab als diejenigen der Temperaturreihe 195°C. Beim Keimungstests ergibt sich dahingegen eine schlechtere Bonitur mit steigender Temperatur, wobei die Ergebnisse der Temperaturreihe 180 und 195°C bei höheren Umsetzungszeiten identisch sind.

6.3.3 Analyseergebnisse des Produktes

Aufgrund der im *Kapitel 5.1.3* dargestellten Überschreitung des Grenzwerts für Kompost von einzelnen chemischen Analyseparametern wird die Untersuchung der Temperatur- und Zeitabhängigkeit im Folgenden auf diese Parameter begrenzt. Mit einbezogen werden die Ergebnisse zu den Hauptnährstoffen nach Wasserextraktion.

Der Einfluss der Temperatur wird über den Vergleich der Daten untereinander mit den gemittelten Werten der jeweiligen Zeitvariation der Temperatur bestimmt. Die Untersuchung zum Einfluss der Zeit auf den Gehalt erfolgt zum einen durch den Mittelwert der Zeitvariation bei einer Temperatur im Zusammenhang mit dem relativen Fehler des jeweiligen Parameters aus dem Versuch zur Reproduzierbarkeit, der hierzu auf die anderen Ergebnisse übertragen wird, sowie über das Bestimmtheitsmaß des linearen Zusammenhangs.

Der pH-Wert nimmt mit steigender Reaktionstemperatur und -zeit ab, wobei bei den Temperaturen 140 und 180°C ein sehr starker linearer Zusammenhang mit der Zeit besteht (Bestimmtheitsmaß > 0,9). Bei 195°C besteht mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,47 nur ein mittlerer linearer Zusammenhang. Weiterhin ergibt sich zwischen 180°C und 195°C gemittelt über die Temperatur nur ein geringer Unterschied von 0,3. Zwischen 200°C und 195°C besteht bei 2 Stunden Umsetzungszeit kein signifikanter Unterschied.

In Bezug auf die Nährstoffgehalte ergibt sich ein differenziertes Bild: Grundsätzlich nimmt der Gehalt an Stickstoff im Vergleich zum Eingangsmaterial (Vers.-Nr. 40) mit der Temperatur und Zeit ab, wohingegen der Phosphor-, Kalium- und Magnesiumgehalt zunimmt:

Der Stickstoff liegt wie beim Eingangsmaterial der Carbonisierung (Vers.-Nr. 40) zu mindestens 95 % als Ammonium-Verbindung vor, da die Nitrat-N-gehalte bei allen Proben außer der Vers.-Nr. 36 sowie dem Inputmaterial (Vers.-Nr. 40) unterhalb der Bestimmungsgrenze von 7 mg/Liter liegen. Demgegenüber sinkt der Gesamtstickstoffgehalt mit steigender Reaktionstemperatur und sinkt ebenfalls mit der Zeit, wobei bei 195°C ein starker linearer Zusammenhang (Bestimmtheitsmaß: 1,00) besteht und bei 180 ein mittlerer bzw. bei 140°C ein schwacher. Mit Blick auf die Grenzwerte der RHP ergibt sich beim Stickstoff ein positives Bild, da der Gehalt mit zunehmender Temperatur und Zeit sinkt. So kann der N-Gehalt bei Umsetzung des Gärrests bei 180°C (Bezug Mittelwert) auf die Hälfte reduziert werden.

Der Phosphor-, Kalium- und Magnesiumgehalt nimmt mit zunehmender Temperatur und Zeit zu, wobei der Einfluss beim Phosphor und Magnesium bedeutender ist als beim Kalium: Bei Umsetzungstemperaturen von 180 und 195°C besteht in jedem Fall ein starker linearer Zusammenhang. Hinsichtlich der Grenzwerte ergibt sich für Phosphor und Magnesium

aufgrund der Zunahme des Gehalts mit der Temperatur und Zeit kein positiver Einfluss auf die Eignung als Substratzuschlagstoff durch die Prozessparameter, sodass selbst bei 140°C Umsetzungstemperatur und der geringsten Umsetzungszeit der Grenzwert nicht eingehalten wird. Der Gehalt an Kalium steigt zwar mit der Temperatur und Zeit, bleibt aber selbst bei hohen Temperaturen und Zeiten unterhalb des Grenzwerts.

Grundsätzlich besteht bei allen Spurenelementen ein Zusammenhang mit der Zeit, wobei der Eisengehalt mit der Temperatur und Zeit sinkt und die Gehalte an Mangan und Zink steigen. Der lineare Zusammenhang ist hierbei mit einem Bestimmtheitsmaß von $> 0,5$ für das Zeitverhalten von Eisen bei allen Temperaturen stark ausgeprägt. Die negative Steigung ist mit 200 $\mu\text{g/Liter}$ bei 140°C und 253 bei 195°C deutlich geringer als bei 180°C mit 775. Mangan weist im oberen Temperaturbereich mit einer Steigung von im Mittel 893 $\mu\text{g/Liter}$ außerdem eine starke Zunahme auf. Das Bestimmtheitsmaß beträgt bei jeder Temperaturreihe von Mangan mehr als 0,5. Dahingegen besteht bei der Temperaturreihe 195°C für Zink nur ein mittlerer Zusammenhang zwischen dem Zinkgehalt und der Zeit (Bestimmtheitsmaß 0,28). Insgesamt nimmt der Mangangehalt mit der Behandlung an sich und der Zeit zu: Bei der Temperaturreihe 180°C und 140°C steigt der Mangangehalt mit einem sehr starken Zusammenhang mit der Zeit (Bestimmtheitsmaß 0,91 bzw. 0,93). Dahingegen sinkt das Bestimmtheitsmaß bei der Temperaturreihe 195°C auf 0,51. In Bezug auf die Grenzwerte zeigt sich, dass der Mangangehalt gegenüber dem Eingangsmaterial (Vers.-Nr. 40) durch die Carbonisierung nicht reduziert und damit der Grenzwert in keinem Fall eingehalten werden kann. Der Zinkgehalt wird demgegenüber bei niedriger Temperatur gegenüber dem Eingangsmaterial reduziert, nimmt aber bei längerer Umsetzungszeit im oberen Temperaturbereich zu, sodass hier die Grenzwerte nicht eingehalten werden können. Der Eisengehalt kann demgegenüber bei Umsetzungstemperaturen von 180 °C, außer bei 0,5 Stunden Umsetzungszeit, und höher gegenüber dem Eingangsmaterial reduziert werden und hält den Grenzwert ein.

Bzgl. der Ergebnisse nach CAT-Extraktion ergibt sich für Kalium kein signifikanter Unterschied in der Zeitvariation sowie zwischen den Temperaturen; allerdings ist der Gehalt des Eingangsmaterials um das 7-fache geringer. Weiterhin besteht auf Basis der relativen Fehler der einzelnen Elemente bei der Temperaturreihe 195°C im Vergleich zu denen des Reproduzierungs-Versuchs (Vers.-Nr. 30) keinen signifikanten Unterschied zwischen den Werten. Der Magnesiumgehalt ist bei 140°C Umsetzungstemperatur ebenfalls über die Zeit nicht signifikant verschieden. Grundsätzlich ergibt sich aber, dass der Magnesiumgehalt mit der Temperatur steigt und weder das Eingangsmaterial noch die carbonisierten Materialien den Grenzwert von Kompost einhalten. Der Gehalt an Kalzium nimmt bei 140 °C mit der Zeit bei einem Bestimmtheitsmaß von 0,91 ab und ist auch signifikant geringer als beim Eingangsmaterial. Mit Erhöhung der Umsetzungstemperatur nimmt der Gehalt an Calcium zwar zu, ist aber immer noch signifikant geringer als beim Eingangsmaterial. Hinsichtlich des Grenzwertes liegt der Calciumgehalt allerdings in jedem Fall mit wenigstens dem 4,8-fachen oberhalb des Grenzwertes für Kompost.

Beim carbonisiertem Gärrest wurden folgende Pilze festgestellt: Moderfäulepilz, die höherpolymere Zellwandkohlenhydrate bis hin zur Zellulose zersetzen, sowie Köpfchenschimmel, die leicht verfügbare Kohlenhydrate zersetzen.

Tab. 27: chemische Analyseergebnisse bzw. Nährstoffgehalt der Produkte nach Wasserextraktion im Vergleich zu den Grenzwerten nach RHP für Kompost bei 20 Vol.-% Zumischung als Substratzuschlagstoff im Bereich Consumer mit den Nährstoffniveaus 4 und 5 für Kompost zur Untersuchung des Einflusses von Temperatur und Zeit bei Einsatz von Gärrest; Das Bestimmtheitsmaß gibt Auskunft über den Linearen Zusammenhang eines Parameters mit der Zeit innerhalb einer Temperaturreihe.

Vers.-Nr.	Versuchsparameter		pH [1]	Leitwert [mS/m]	Σ NO ₃ -N + NH ₄ -N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	P	K	Mg
	Θ [°C]	Zeit [h]								
[mg/Liter Substrat]										
30 (Mittelwert)	200	2,0	6,0	165	201	194	< 7	754	1075	721
Rel. Fehler [%]			1,7	2,4	4	4	n.a.	1	0	2
31	195	4,0	6,3	169	203	196	< 7	705	1.017	693
32	195	2,0	6,0	163	252	245	< 7	704	1.036	644
33	195	0,5	7,4	118	287	280	< 7	288	821	231
Mittelwert			6,6	150	247	240	n.a.	566	958	523
Rel. Fehler [%]			11	19	17	18	n.a.	43	12	49
Bestimmtheitsmaß			0,47	0,77	1,00			0,68	0,60	0,76
34	180	4,0	6,1	154	231	224	< 7	662	938	608
35	180	2,0	6,9	147	315	308	< 7	595	899	498
36	180	0,5	7,7	114	273	266	7	299	860	170
Mittelwert			6,9	138	273	266	n.a.	519	899	425
Rel. Fehler [%]			12	15	15	16	n.a.	37	4	54
Bestimmtheitsmaß			0,99	0,82	0,32			0,83	0,99	0,87
37	140	4,0	8,0	124	399	392	< 7	333	919	158
38	140	2,0	8,2	111	364	357	< 7	265	782	109
39	140	0,5	8,6	122	434	427	< 7	215	919	61
Mittelwert			8,3	119	399	392	n.a.	271	873	109
Rel. Fehler [%]			4	6	9	9	n.a.	22	9	44
Bestimmtheitsmaß			0,93	0,05	0,18			1,00	0,00	0,99
40	0	0,0	9,0	125	532	525	7	150	880	24
Kompost Niveau 4			n.e.	< 80	< 270	n.e.	< 190	< 190	< 1.600	< 70
Kompost Niveau 5			n.e.	80 - 140	< 270	n.e.	< 230	< 190	< 1.600	< 70

Tab. 28: Spurenelemente in den Produkten im Vergleich zu den Grenzwerten nach RHP für Kompost als Substratzuschlagstoff im Bereich Consumer zur Untersuchung des Einflusses von Temperatur und Zeit bei Einsatz von Gärrest; Gehalte wurden mit der Methode für Kompost ermittelt; Das Bestimmtheitsmaß gibt Auskunft über den Linearen Zusammenhang eines Parameters mit der Zeit innerhalb einer Temperaturreihe

Vers.-Nr.	Versuchsparameter		Fe	Mn	Zn
	Θ [°C]	Zeit [h]			
			[µg/Liter Substrat]		
30 Mittelwert	200	2,0	5.431	6.277	2.104
Rel. Fehler [%]			2	5	2
31	195	4,0	5.245	5.682	1.897
32	195	2,0	5.134	6.423	2.583
33	195	0,5	6.194	2.361	850
Mittelwert			5.524	4.822	1.777
Rel. Fehler [%]			11	45	49
Bestimmtheitsmaß			0,58	0,51	0,28
34	180	4,0	5.134	5.819	2.845
35	180	2,0	5.636	4.831	1.635
36	180	0,5	7.952	2.553	883
Mittelwert			6.241	4.401	1.788
Rel. Fehler [%]			24	38	55
Bestimmtheitsmaß			0,82	0,91	1,00
37	140	4,0	6.724	3.212	1.177
38	140	2,0	6.557	2.635	1.145
39	140	0,5	7.477	2.498	1.373
Mittelwert			6.919	2.782	1.232
Rel. Fehler [%]			7	14	10
Bestimmtheitsmaß			0,51	0,93	0,55
40	0	0,0	6.220	1.153	1.504
RHP Kompost			< 6.600	< 800	< 1.900

Tab. 29: Analyseergebnisse der Produkte nach CAT-Extraktion im Vergleich zu den Grenzwerten nach RHP für Kompost bei 20 Vol.-% Zumischung im Bereich Consumer zur Untersuchung des Einflusses von Temperatur und Zeit bei Einsatz von Gärrest; Gehalte wurden mit der Methode für Kompost ermittelt; Das Bestimmtheitsmaß gibt Auskunft über den linearen Zusammenhang eines Parameters mit der Zeit innerhalb einer Temperaturreihe

Vers.-Nr.	Versuchsparameter		K	Ca	Mg
	Θ [°C]	Zeit [h]			
			[mg/Liter Substrat]		
30 Mittelwert	200	2,0	1.010	2.025	656
Rel. Fehler [%]			11	2	21
31	195	4,0	938	2.005	632
32	195	2,0	997	1.985	693
33	195	0,5	1.036	2.065	668
Mittelwert			990	2.018	664
Rel. Fehler [%]			5	2	5
Bestimmtheitsmaß					
34	180	4,0	938	2.025	608
35	180	2,0	n.a.	2.306	207
36	180	0,5	821	1.805	377
Mittelwert			880	2.045	397
Rel. Fehler [%]			9	12	51
Bestimmtheitsmaß				0,14	0,41
37	140	4,0	919	1.604	279
38	140	2,0	978	1.684	352
39	140	0,5	938	1.865	401
Mittelwert			945	1.718	344
Rel. Fehler [%]			3	8	18
Bestimmtheitsmaß				0,91	
40	0	0,0	137	2.145	207
RHP Kompost			< 1.600	< 360	< 70

6.3.4 Fazit

Zur Untersuchung des Einflusses von Temperatur und Zeit auf die Substrateigenschaften des carbonisierten Gärrückstand lässt sich auf Basis der Daten von 10 Tagen Aufwuchs festhalten, dass die Reaktionszeit und Temperatur bei 10 Vol.-% Zumischung außer beim Chinakohl mit einer Umsetzungszeit von 195°C keinen Einfluss auf den Frischmasseertrag hat, aber bei 30 Vol.-% Zumischung. So zeigt sich, dass der Frischmasseertrag mit zunehmender Temperatur und Umsetzungszeit sinkt. Insgesamt zeigt sich ebenfalls, dass die Frischgewichte von Chinakohl und Kohlrabi bei 10 Vol.-% Zumischung sowohl unbehandelt als auch carbonisiert im Vergleich zur Kontrolle geringer sind. Nach 21 Tagen Aufwuchs im Gewächshaus weist dahingegen der Versuch mit einer Prozessparametern 0,5 Stunden und 180°C sowie das Ausgangsmaterial und der Versuch bei 140°C und 2 Stunden Reaktionszeit ein mit der Kontrolle vergleichbares Frischgewicht für Chinakohl auf, wobei das carbonisierte Material in dieser Versuchsreihe ein besseres Ergebnisse als in den Vorversuchen mit 68% Frischgewicht im Vergleich zur Kontrolle aufweist. Bei 30 Vol.-% Zumischung sinkt das Frischgewicht bei allen drei Pflanzenarten signifikant mit steigender Zeit. Weiterhin sinkt das Frischgewicht mit steigender Temperatur signifikant und ist insgesamt gegenüber der Kontrolle geringer. Die Keimung ist mit mindestens 94% Keimrate nicht gehemmt. Hinsichtlich der Gasphasentests war in dieser Versuchsreihe die Kresse gegenüber der letzten Versuchsphase selbst nicht verpilzt, dafür aber das Substrat. Die Reproduzierbarkeit der Carbonisierungsversuche ist bei gleichzeitigem Ansetzen der Biotests gegeben, aber von einer Versuchsphase zur anderen nicht.

Bei carbonisiertem Gärrückstand liegt der Stickstoff im Wesentlichen mit wenigstens 95 Mass.-% als Ammoniumstickstoff vor. Der Stickstoffgehalt nimmt mit der Reaktionstemperatur und der Zeit ab, liegt aber bei den Versuchen mit Gärrückstand lediglich bei den Versuchen mit 195°C unterhalb des Grenzwerts der RHP.

Der Gehalt an Phosphor, Kalium und Magnesium nimmt bei den Versuchen mit Gärrückstand mit zunehmender Temperatur und Zeit zu. Dadurch werden die Grenzwerte der RHP für Phosphor und Magnesium in jedem Fall nicht eingehalten und für Kalium dahingegen trotz des Anstiegs des Gehalts mit Temperatur und Zeit im Wesentlichen.

Bei den Spurenelementen nimmt der Gehalt an Eisen mit zunehmender Temperatur und Zeit ab. Der Gehalt an Zink und Mangan nimmt dahingegen zu. Die Gehalte an Zink und Mangan können durch die Carbonisierung nicht verbessert werden und halten damit die Grenzwerte der RHP nicht ein. Der Eisengehalt kann aufgrund der Reduzierung während der Carbonisierung bei Temperaturen von 180°C und höher eingehalten werden.

Hinsichtlich der Daten aus der CAT-Extraktion ergibt sich für Kalium kein Einfluss auf den Gehalt durch Temperatur und Zeit, wohingegen der Gehalt an Magnesium und Calcium mit zunehmender Temperatur zunimmt und in keinem Fall den Grenzwert der RHP einhält.

6.4 Fazit des Arbeitspaketes 3 und weiteres Vorgehen

Der Einsatz von 10 Vol.-% Zumischung an carbonisiertem Material ist auf Basis der Frischmasseerträge möglich. Dahin gegen sind bei 30 Vol.-% Zumischung deutliche Wachstumshemmungen zu verzeichnen. Dazu sinkt das Frischgewicht mit der Temperatur deutlich und mit der Zeit leicht. Weiterhin bestehen Probleme mit Schimmel, die vor allem bei dem carbonisiertem Gärrest aufgetreten sind, aber auch beim Landschaftspflegematerial. Bei den Versuchen mit Gärrest ist aufgefallen, dass das Frischgewicht zwischen zwei Versuchsreihen bei vergleichbaren Herstellungsbedingungen des carbonisierten Material stark voneinander abweichen. Die Keimrate war bei keinem Versuch auffallend reduziert. Weiterhin werden bei höheren Umsetzungstemperaturen in den Kressetests zum Teil toxische Effekte angezeigt wie Gelbfärbung der Blätter.

Positive Ergebnisse konnten beim Einsatz der Ausgangsmaterialien erzielt werden.

Da Einbußen beim Frischmasseertrag aufgrund von Schimmelbildung nicht ausgeschlossen werden können, ebenso wie toxische Effekte auf die Pflanze, wurde in der nächsten Versuchsreihe versucht, das Potenzial zur Bildung von Schimmel zu reduzieren.

7. Reduzierung des Potenzials zur Bildung von Schimmel

7.1 Versuchsdurchführung

Aufgrund der Hygenisierungsbedingungen bei der thermochemischen Konversion ist davon auszugehen, dass das carbonisierte Material selbst völlig steril ist. Hierdurch besteht die Möglichkeit, dass es durch ubiquitäre Schimmelsporen besiedelt wird. Aufgrund keiner natürlichen Konkurrenzsituation im Substrat wie demgegenüber bspw. im Kompost, breiten sich diese Sporen bzw. diejenigen davon im carbonisierten Material aus, die für sich optimale Wachstumsbedingungen vorfinden. Um die optisch ausgeprägte Ausbildung von bestimmten Organismen einzudämmen, wurden verschiedene Ansätze geprüft.

Zum einen wurde versucht, die Schimmelbildung durch Veränderung der Verfahrensparameter selbst zu reduzieren. Hierzu wurde das Material nicht über 2 Stunden bei einer konstanten Temperatur behandelt, sondern nach den ersten 30 Minuten für die verbleibende Zeit von 90 Minuten bei 150°C umgesetzt. Außerdem wurde ein Versuch mit Versuchsparametern von 4 Stunden und 240°C durchgeführt. Zum anderen wurden weitere verfahrenstechnische Schritte nach der Carbonisierung untersucht. Eine Option besteht darin, dass durch den Einsatz von Kompost eine natürliche Konkurrenzsituation im Substrat hergestellt wird und damit die Schimmelbildung verhindert werden kann. Die Bildung von Schimmelsporen und Fruchtkörpern ist von hygienisiertem Torf selbst ebenfalls bekannt. Die Verhinderung dieses Phänomens erfolgt durch sofortige Mischung von hygienisiertem und nicht hygienisiertem Torf. Es wurde ebenfalls geprüft, ob sich eine Lagerung des Materials positiv auf die Biotests auswirkt und ob die phytotoxischen Komponenten wasserlöslich sind. Hierzu wurden 3 Liter des feuchten carbonisierten Materials auf einem Sieb mit einem Milchfilter der Firma Meltech bei einer Schütthöhe von 6 cm mit 2 Mal 3 Litern Leitungswasser übergossen. Das Material wurde anschließend solange stehen gelassen, bis kein Wasser mehr abtropfte. Das Retentat wurde dann als Zuschlagstoff für die Biotests verwendet und das Permeat frisch und nach Lagerung als Gießwasser verwendet.

Aufgrund der bei den Versuchen mit Gärrest im größerem Maß aufgetretenden Schimmelbildung gegenüber denen mit Landschaftspflegematerial wurden die Versuche hier mit Gärrest durchgeführt. *Tabelle 30* gibt einen Gesamtüberblick über die durchgeführten Versuche und die Versuchsbezeichnung.

Neben den Standarduntersuchungsparametern wurden speziell Versuche zur Verpilzung durchgeführt. Die Durchführung des Verpilzungstests ist im *Anhang C* beschrieben.

Tab. 30: Zusammenstellung der Versuche und deren Besonderheiten

Bez. [1]	Material [1]	VTC Prozessparameter		Besonderheiten für Biotests [1]
		Zeit [h]	Temperatur [°C]	
VG 1	Carb. Gärrest und Kompost	2	195	Zumischung von 30 Vol.-% frischem und gelagertem carb. Material und 10 Vol.-% Kompost
VG 2	Carb. Gärrest	2	195	Zumischung von 30 Vol.-% frischem und gelagertem carb. Material und 10 Vol.-% Kompost
VG 3	Gewaschener carb. Gärrest	2	195	Zumischung von 30 Vol.-% frischem und gelagertem gewaschenen carb. Material
VG 4	Permeat/Waschwasser von VG 3	0	0	Biotests wurden nur mit dem frischen und gelagerten Permeat/Waschwasser gegossen
VG 5	Hygienisierter Torf	0	0	Als Kontrolle
VG 6	Carb. Gärrest	2	195	Zumischung von 10 und 30 Vol.-% carb. Material; Anpassung des N-Niveaus
VG 7	Carb. Gärrest und Biochar	2	195	Zumischung von 30 Vol.-% carb. Material und 5 Vol.-% Biochar; Anpassung des N-Niveaus
VG 8	Nur Biochar	0	0	Zumischung von 5 Vol.-% Biochar; Anpassung des N-Niveaus
VG 9	Carb. Gärrest	0,5; 1,5	195; 150	Zumischung von 10 und 30 Vol.-% carb. Material
VG 10	Carb. Gärrest	4	240	Zumischung von 30 Vol.-% carb. Material

7.2 Ergebnisse der Biotests

Die Frischgewichte der Biotests liegen bei 30 Vol.-% Zumischung der verschiedenen Materialien (VG 1, 2 und 3) im Vergleich zur Kontrolle bei unter 40 %. (siehe *Abb. 9*) Es werden hierdurch deutliche Wachstumshemmungen angezeigt. Für die Durchführung der Biotests erfolgte keine Stickstoffanpassung der verschiedenen Proben auf ein Niveau. Selbst bei Verwendung des Wassers aus dem Waschvorgang des carbonisierten Materials zum Gießen der Pflanzen sind Hemmungen festzustellen: so beträgt das Frischgewicht beim Chinakohl weniger als 75 % im Vergleich zur Kontrolle. (siehe *Abb. 9*) Die Ergebnisse der Biotests mit dem gelagerten Material sind mit denen des frischen vergleichbar. Lediglich beim Chinakohl ergeben sich signifikant bessere Ergebnisse beim gelagerten Material.

Trotz der Zumischung von Kompost zu dem carbonisierten Material und Torf konnte die Ausbildung von Schimmel nicht verhindert werden. (siehe *Abb. 10*) Ebenfalls wurde kein positiver Effekt durch die Auswaschung von Komponenten aus dem carbonisierten Material erwirkt. (siehe *Abb. 10*)

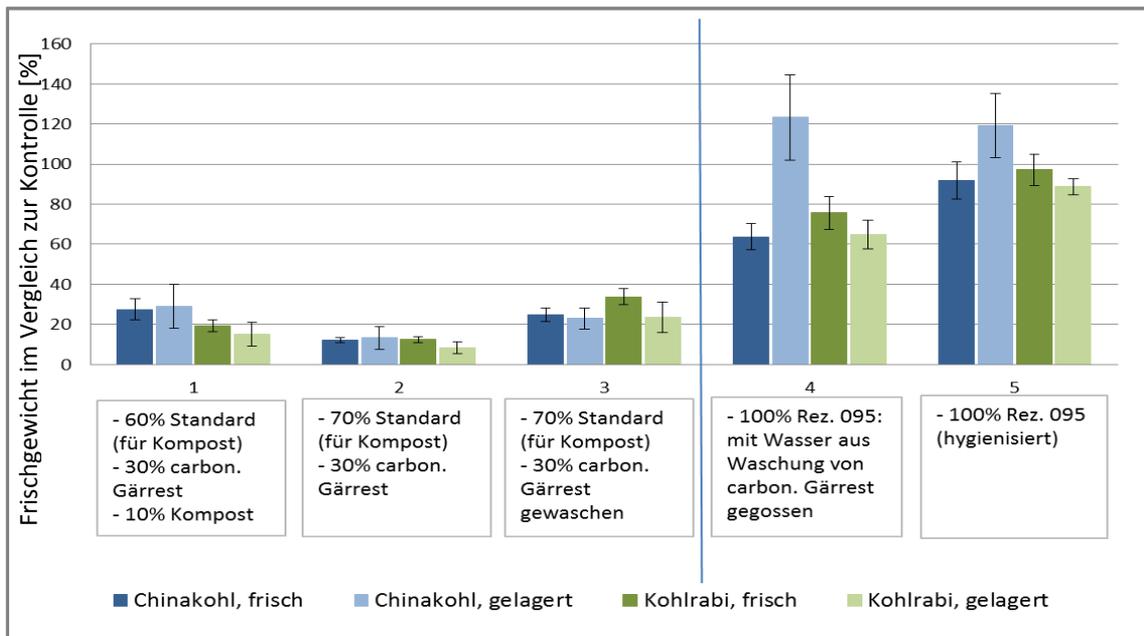


Abb. 9: Darstellung der Frischgewichte innerhalb der Versuchsreihe „Reduzierung des Potenzials zur Bildung von Schimmel“ mit Darstellung der Standardabweichung; unterhalb der Versuchsgliedbezeichnung (VG) 1 – 5 sind die jeweiligen Zusammensetzungen festgehalten; frisch steht für Material, welches 1 Tag nach der thermochemischen Konversion verwendet wurde, und gelagert für jenes, welches 2 Wochen gelagert wurde.



Abb. 10: Ergebnisse des Verpilzungstests mit den folgenden Mischungen bei Einsatz von frischem carbonisiertem Material (v.l.n.r.): VG 1, VG 2, VG 3 und VG 5.

Bei den weiterführenden Versuche konnten beim Standard-Carbonisierungsversuch (VG 6) durch die Anpassung des Stickstoffniveaus auf 200 mg/l keine vergleichbaren Ergebnisse mit der Kontrolle beim Frischgewicht erzielt werden. Obwohl das Frischgewicht des Chinakohls im Vergleich zur Kontrolle bei jedem Stickstoffniveau über 80 % beträgt, kann das Material nicht als Zuschlagstoff eingesetzt werden, da das Frischgewicht beim Salat wiederum weniger als 40 % beträgt. Darüber hinaus brachte auch die Zumischung von Biochar zum carbonisierten Material und Torf (VG 7) keine Verbesserung, wohingegen bei Zugabe von Biochar selbst (VG 8) und bei 200 mg N/l mit der Kontrolle vergleichbare Ergebnisse erzielt werden konnten. Auch durch die Änderung der Prozessführung auf eine Temperaturrampe bei der VTC (VG 9) und die Konversion bei sehr hohen Umsetzungstemperaturen (VG 10) wurden keine vergleichbaren Frischgewichte mit denen der Kontrolle erreicht. Hohe Temperaturen bewirken deutliche Wachstumshemmungen. Die Frischgewichte des VG 9 betragen 76 und 73 % im Vergleich zur Kontrolle bei 10 Vol.-% Zumischung und halten damit insgesamt auch gerade bzw. nicht die Vorgaben der VDLUFA ein.

Insgesamt zeigt sich auch in dieser Versuchsreihe, dass die Frischgewicht mit zunehmender Dosierung des carbonisierten Materials deutlich reduziert werden. Darüber hinaus wurden beim Salat auch deutliche Keimhemmungen festgestellt, die mit höherer Zumischung des carbonisierten Materials zunahmen. Insgesamt wurde innerhalb dieser Versuchsreihe auch ermittelt, dass die Keimung bei Zugabe von carbonisiertem Material beim Salat gegenüber dem Vergleich um bis zu 8 Tage verzögert war. Hierdurch ergibt sich automatisch eine Reduktion der Frischmasse. Beim Chinakohl wurde keine Keimhemmung festgestellt. Weiterhin konnte durch die Veränderung der Prozessführung keine Änderung der Schimmelbildung bewirkt werden. (siehe *Tab. 31*)

Bei Zugabe von 10 Vol.-% carbonisiertem Material besteht kein Unterschied hinsichtlich des verfügbaren Stickstoffs zwischen der Kontrolle und den Mischungen. Dahin gegen bei 30 Vol.-% bis zu 100 mg/Liter, die allerdings bei Angleichung des verfügbaren Stickstoffs nicht zu einem höherem Frischgewicht gegenüber der Kontrolle geführt haben. (Vergl. mit Daten von VG 6.30)

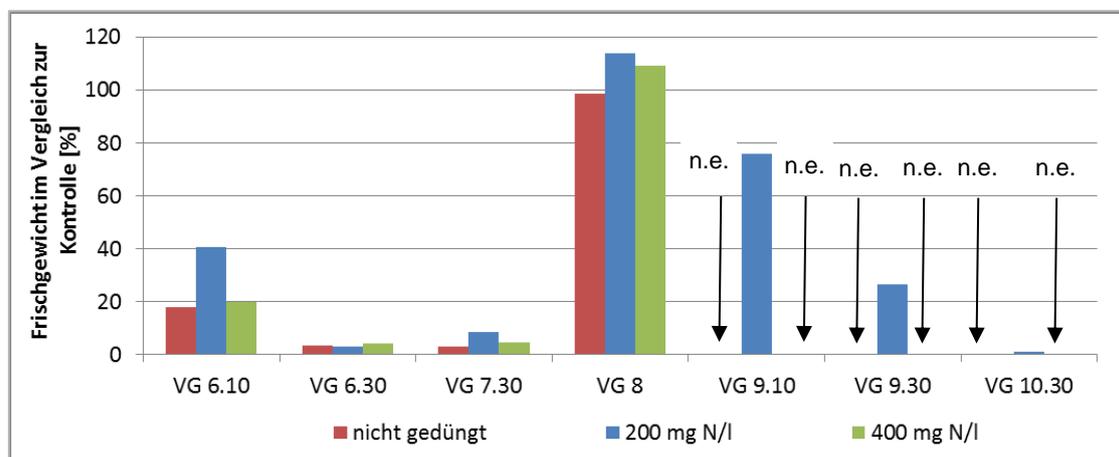


Abb. 11: Frischgewicht der oberirdischen Biomasse im Vergleich zur Kontrolle bei Verwendung von Salat als Versuchspflanze bei z.T. unterschiedlichen Stickstoffgehalten; n.e. – wurde aufgrund von zu wenig Probe nicht durchgeführt

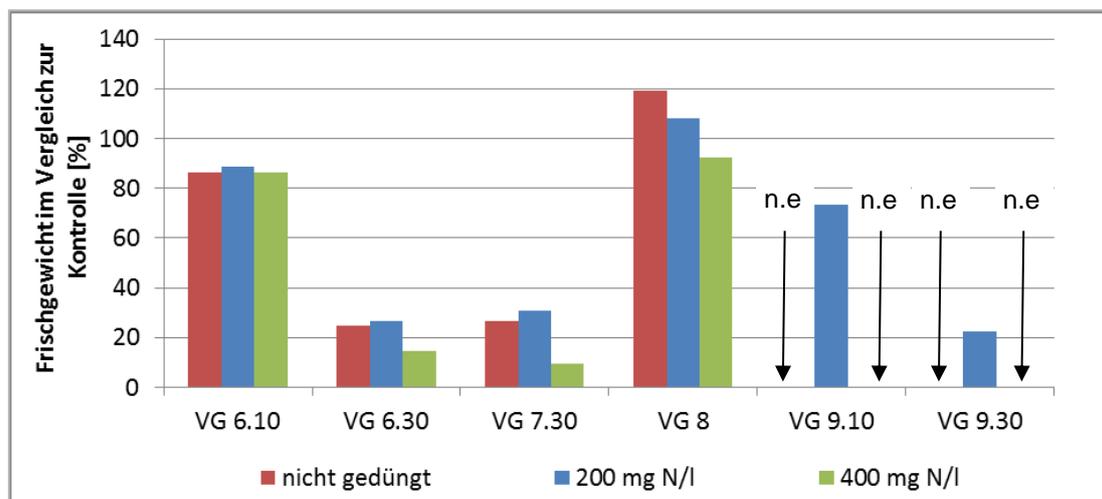
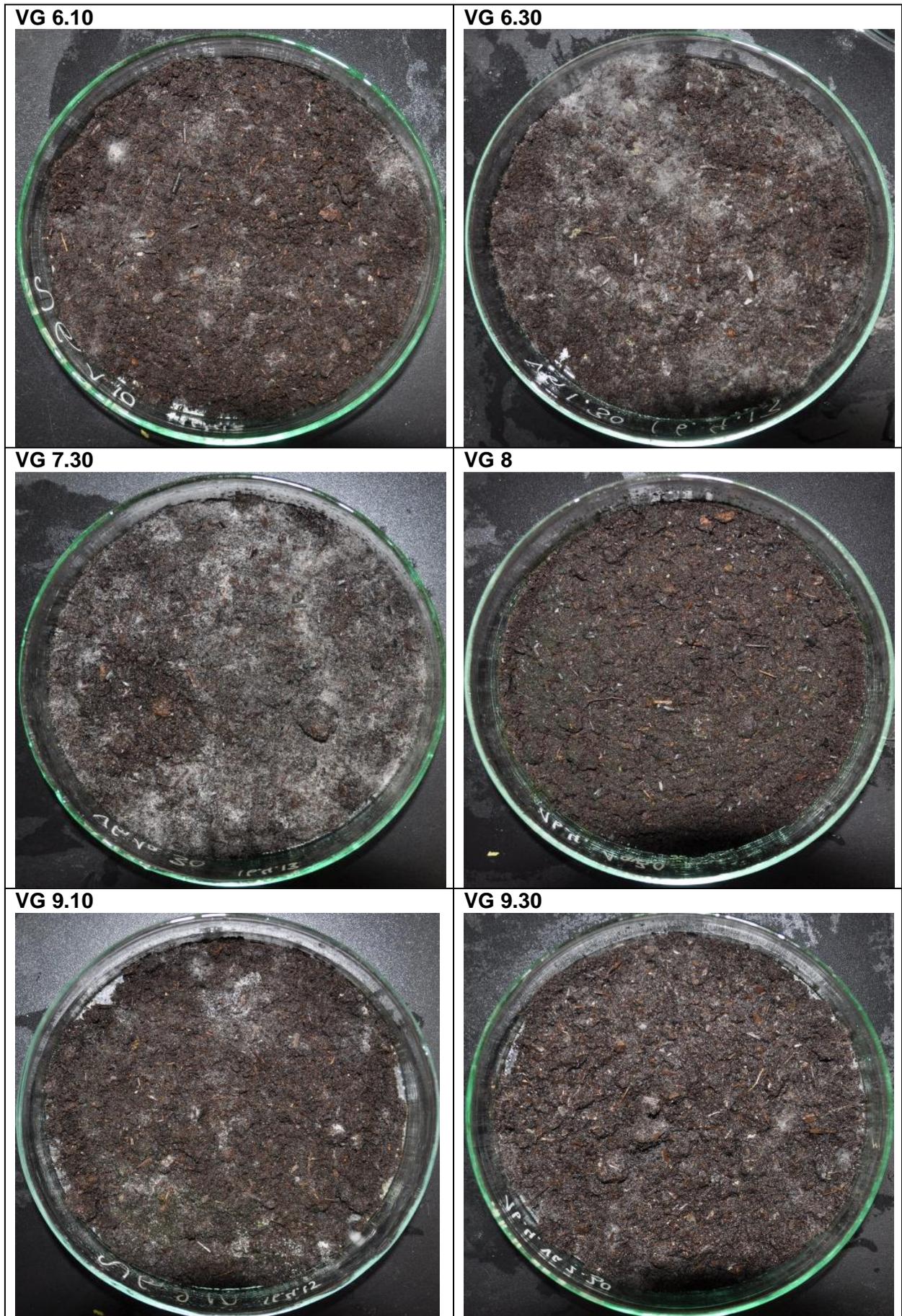


Abb. 12: Frischgewicht der oberirdischen Biomasse im Vergleich zur Kontrolle bei Verwendung von Chinakohl als Versuchspflanze bei unterschiedlichen Stickstoffgehalten; n.e. – wurde aufgrund von zu wenig Probe nicht durchgeführt

Tab. 31: Darstellung der Verpilzung aller Proben nach 21 Tagen im Klimaschrank ohne Düngung



7.3 Fazit

Weder durch die Zumischung von Torf noch von Kompost konnte die Bildung von Schimmel unterbunden werden. Auch bei Carbonisierung nach einem Temperaturprofil oder bei sehr hohen Temperaturen bzw. durch Zumischung von Biochar zum carbonisierten Material und Torf ergibt sich keine Besserung.

Eine Ursache für das reduzierte Frischgewicht beinhaltet die bis zu 8 Tage verzögerte Keimung. Dies wurde insbesondere bei Salat beobachtet. Dieser Effekt nimmt mit der Zunahme des Volumenanteils an carbonisiertem Material zu. Positive Effekte auf den Frischmasseertrag durch Angleichung bzw. Aufstockung des Stickstoffniveaus bestehen nicht.

Aufgrund dessen, dass die Bildung von Schimmel beim carbonisierten Material nicht unterbunden werden konnte, wurden im Folgenden Untersuchungen zur Bewertung der energetischen Verwertung durchgeführt. Zusätzlich wurden mit dem unbehandelten Material aufgrund der positiven Ergebnisse im *Kapitel 6* weitere Versuche zur Substitution von Torf in Kultursubstrat durchgeführt.

8. Versuche mit unbehandeltem Landschaftspflegematerial als Substratzuschlagstoff

Aufgrund der positiven Ergebnisse im *Kapitel 6.2* mit unbehandeltem Landschaftspflegematerial hinsichtlich des Frischmasseertrags wurden weitere Versuche mit purem Material durchgeführt. Es handelt sich um zwei Materialien: Heide aus der Glücksburger Heide sowie eine Materialmischung aus Rohrglanzgras und mehrjährigem Grasschnitt von Rügen. Die Mischung aus Rohrglanzgras und Grasschnitt wird im Folgenden als Landschaftspflegemischung bezeichnet. Die Landschaftspflegemischung wurde Anfang September 2013 geerntet und die Heide Mitte September 2013.

8.1 Versuchsdurchführung

Aufgrund der zu vermutenden Problematik von Stickstoffimmobilisierung während der Wachstumsphase von Kulturpflanzen wurde das Material unterschiedlich vorbehandelt. Im ersten Schritt wurde das geerntete Material auf eine Länge von etwa 4 cm zerkleinert und anschließend in einem Retruder aufgefaseret. Nachfolgend wurden die Biotests und Analysen durchgeführt.

Die Zerkleinerung erfolgte bei der Landschaftspflegemischung mittels einem konventionellen Strohballenhäcksler, der früher zur Herstellung von Einstreu für Hühnerställe eingesetzt wurde: Model taarup 807S mit Schwenkhals. (Siehe *Abb. 13*) Die Heide wurde mit dem Gartenhäcksler Viking GE365 (*Abb. 14*) zerkleinert, der mit einem Multicut Messersatz ausgestattet war.



Abb. 13: Strohballenhäcksler zur Zerkleinerung der in Rundballenform angelieferten Landschaftspflegemischung auf etwa 4 cm sowie Darstellung des Schneidwerkzeugs (kleines Bild links)



Abb. 14: Gartenhäcksler der Firma Viking zur Zerkleinerung der Heide (links) sowie Darstellung der in Quadern angelieferten Heide (rechts)

Anschließend wurde das Material mittels Retruder aufgefaserter, um das spezifische Schüttgewicht weiter zu reduzieren. Hierbei wurden entsprechend der *Tab. 20* drei verschiedene Einstellungen gewählt. Mit den unterschiedlichen Parametern wurden unterschiedliche Strukturzusammensetzungen im Material erzeugt. Die Strukturzusammensetzung ist als Korngrößenverteilung in *Abb. 15* als Balkendiagramm und in *Abb. 16* als Siebfraction dargestellt.

Die Korngrößenverteilung wurde nach DIN 13040 durchgeführt. Abweichend davon wurden folgende Parametereinstellungen gewählt: Siebdauer 2 min, Amplitude 1 mm/g und Intervall aus. Mit Heide wurde aufgrund von Schwierigkeiten bei der Versuchsdurchführung nur eine Material produziert.

Tab. 32: Parametereinstellung an der Auffaserungsanlage für Landschaftspflegemischung (Einstellung 1 bis 3) und Heide (Einstellung 4)

Einstellung	Einheit	1	2	3	4
Einstellung Retruder					
Öffnung Schieber	mm	40	70	70	80
Umdrehung Retruder	u/min	1500	1500	1500	1500
Förderleistung					
LPM bzw. Heide (roh)	Ma.-%	40	44	38	48
Humintorf (roh)	Ma.-%	0	0	15	0
Wasser	Ma.-%	60	56	47	52

Die Fraktion > 31,5 mm der Landschaftspflegemischung wurde durch die Auffaserung stark reduziert bzw. war anschließend kein Bestandteil mehr. Dahingegen blieb der Anteil der Fraktionen 1 – 2 mm und 2 – 4 mm relativ konstant vom Ausgangsmaterial zu den drei Einstellungen. Unterschiede bestehen bei der feinsten Fraktion von < 1 mm, die mit der Auffaserung zunahm, und den Fraktionen > 4 mm, die bis 16 mm zunahmen und über 31,5 mm abnahmen. (Siehe *Abb.15*) Ein Einfluss des Humintorfs auf die

Korngrößenverteilung des Materials der Einstellung 3 ist nicht erkennbar. Die Fraktionen der verschiedenen Einstellungen 1 bis 3 selbst sind in *Abb. 16* abgebildet.

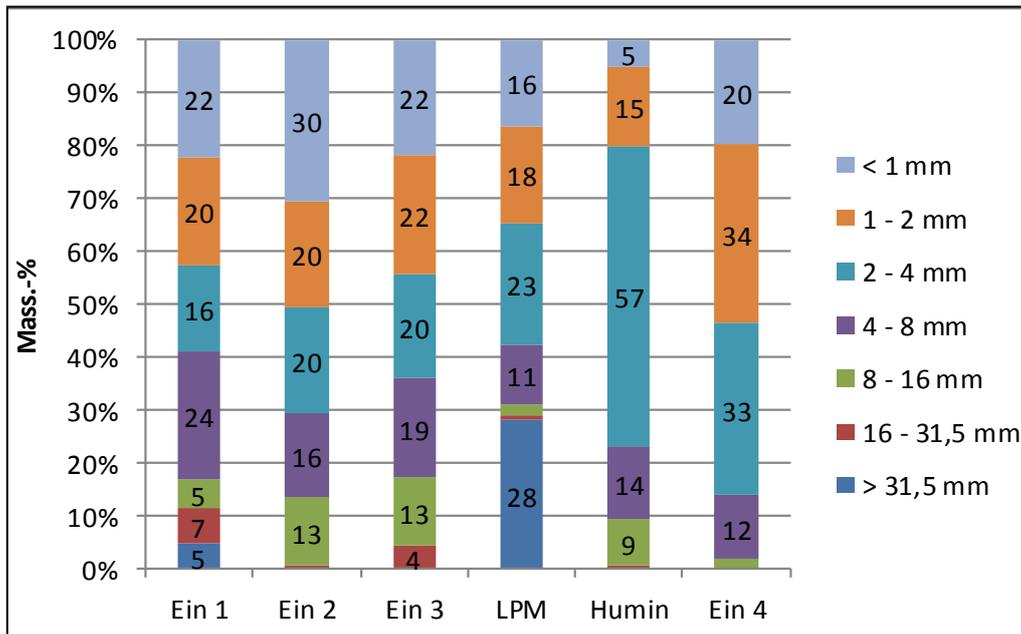


Abb. 15: Korngrößenverteilung der Materialien bei Einsatz von Landschaftspflegemischung (Ein 1 bis 3) und deren Ausgangsmaterialien sowie der aufgefaserter Heide (Ein 4) mit Angabe der Massenanteile > 3 Ma.-%

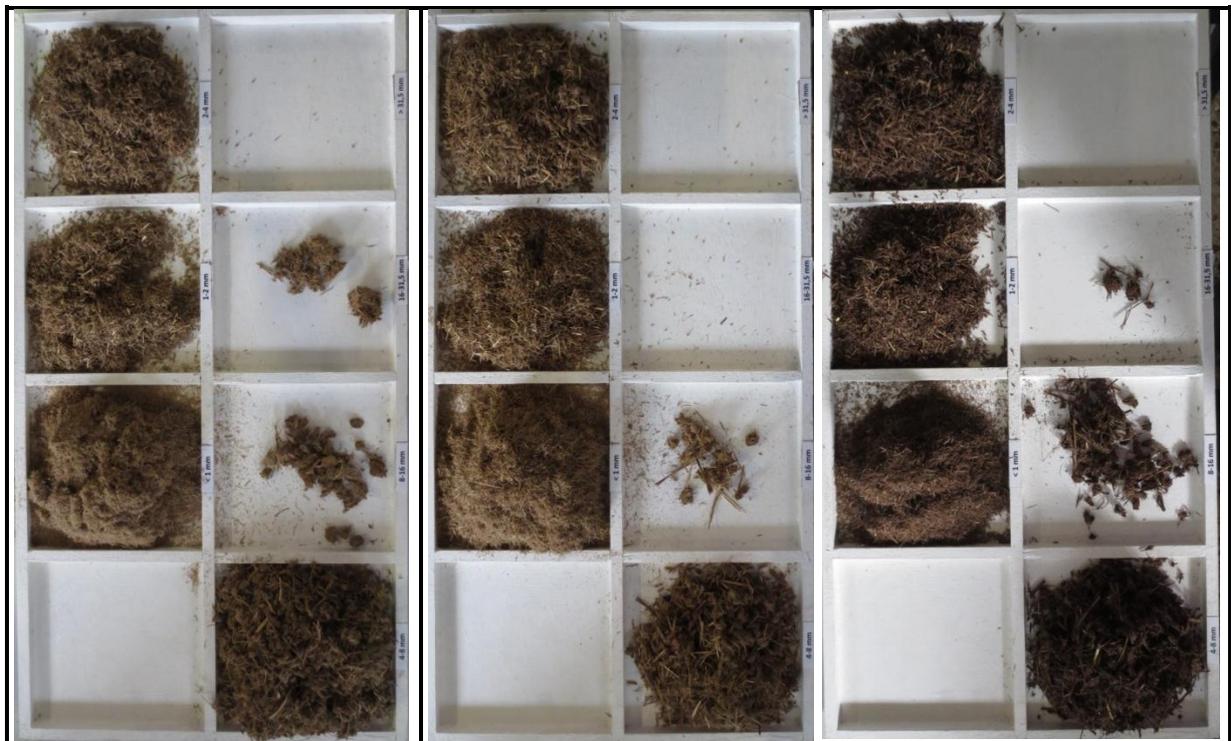


Abb. 16: Darstellung der verschiedenen Fraktionen der Korngrößenverteilung der drei hergestellten Materialien aus Landschaftspflegemischung (v.l.n.r.): Ein 1, Ein 2 und Ein 3. Fraktionen (v.o.l.n.r.u.): 2 – 4 mm, 1 – 2 mm, < 1 mm, leer, > 31,5 mm, 16 – 31,5 mm, 8 – 16 mm, 4 – 8 mm.

Gegenüber der aufgefaseren Landschaftspflegemischung verteilt sich die aufgefaserete Heide im Wesentlichen mit 87 Ma.-% auf die Fraktionen < 4 mm. (Siehe *Abb. 15*) Weiterhin zeigt sich anhand der optischen Darstellung der Siebfraktionen, dass die Heide bei Verwendung des gleichen Ausgangsvolumen nicht so gut aufgefaseret werden konnte wie die Landschaftspflegemischung. (Vergl. *Abb. 17* mit *Abb. 16*).

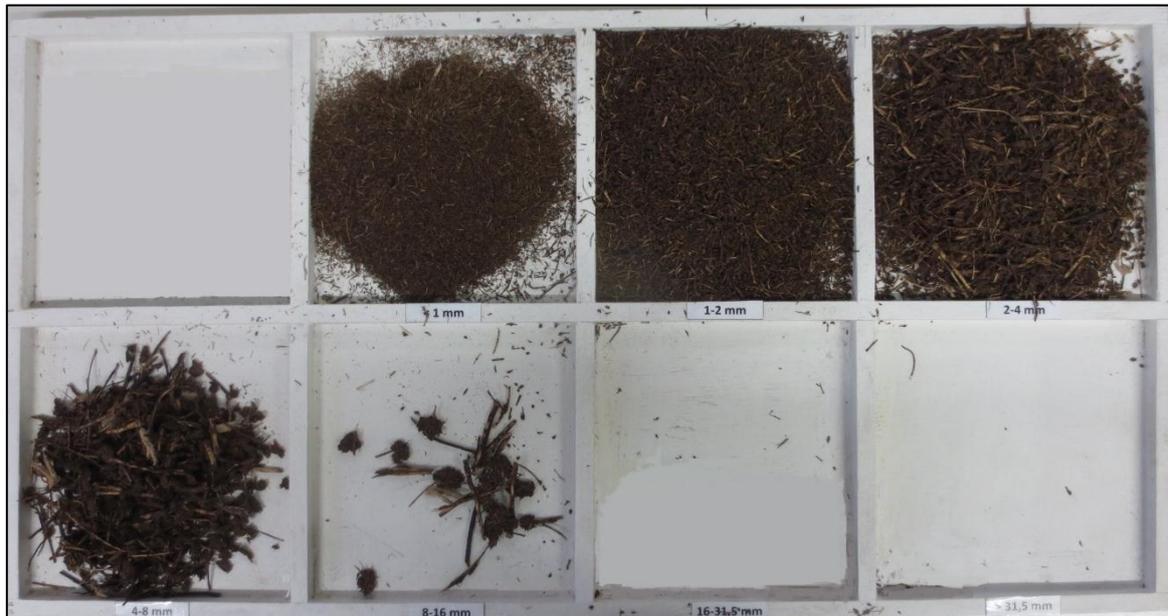


Abb. 17: Darstellung der verschiedenen Fraktionen der Korngrößenverteilung der aufgefaseren Heide (v.o.l.n.r.u.): leer, < 1 mm, 1 – 2 mm, 2 – 4 mm, 4 – 8 mm, 8 – 16 mm, 16 – 31,5 mm, > 31,5 mm.

8.2 Ergebnisse der Biotests

Um eine Stickstoffimmobilisierung als Grund für Wachstumshemmungen auszuschließen, wurden die Proben unterschiedlich gedüngt. Bei den Versuchen mit der Landschaftspflegemischung wurde die Kontrolle ebenfalls unterschiedlich stark gedüngt. Ein Unterschied im Frischmasseertrag ergibt sich hierdurch bei der Kontrolle nicht. (Siehe *Abb. 18* und *19*) Aus diesem Grund erfolgt im Folgenden der Vergleich mit der Kontrolle bei den Versuchen mit Landschaftspflegemischung auf Basis der Spanne der beiden Ergebnisse bei Chinakohl bzw. Salat. Bei den Versuchen mit Heide wurde die Kontrolle nicht extra gedüngt. Die Düngung erfolgte jeweils 8 Tage nach Aussaat.

Zur Landschaftspflegemischung

Abbildung 18 gibt wieder, dass das Frischgewicht von Chinakohl bei Zumischung von 10 Vol.-% unabhängig von der Düngung mit der Kontrolle vergleichbar ist. Das Frischgewicht beträgt in jedem Fall mehr als 90 %. Zu erkennen ist weiterhin, dass das Frischgewicht bei 10 Vol.-% Zumischung und einem Stickstoffniveau von 800 mg/l gegenüber den anderen beiden Dünge­stufen reduziert ist.

Bei 30 Vol.-% Zumischung ist der Unterschied bei den Frischmasseerträgen des Chinakohls entsprechend *Abbildung 18* zwischen den einzelnen Dünge­stufen deutlich unterschiedlicher: Der Frischmasseertrag steigt mit zusätzlicher Stickstoffdüngung signifikant gegenüber der Standarddüngung. Eine zusätzliche Düngung von 400 auf 800 mg/l reduziert dahingegen bei allen drei Proben den Frischmasseertrag, wobei der Unterschied nur bei Ein 2.30 nicht signifikant ist. Durch die zusätzliche Düngung kann der Frischmasseertrag von 46 bis 53 % im Vergleich zur Kontrolle bei Standarddüngung auf über 80 % gesteigert werden.

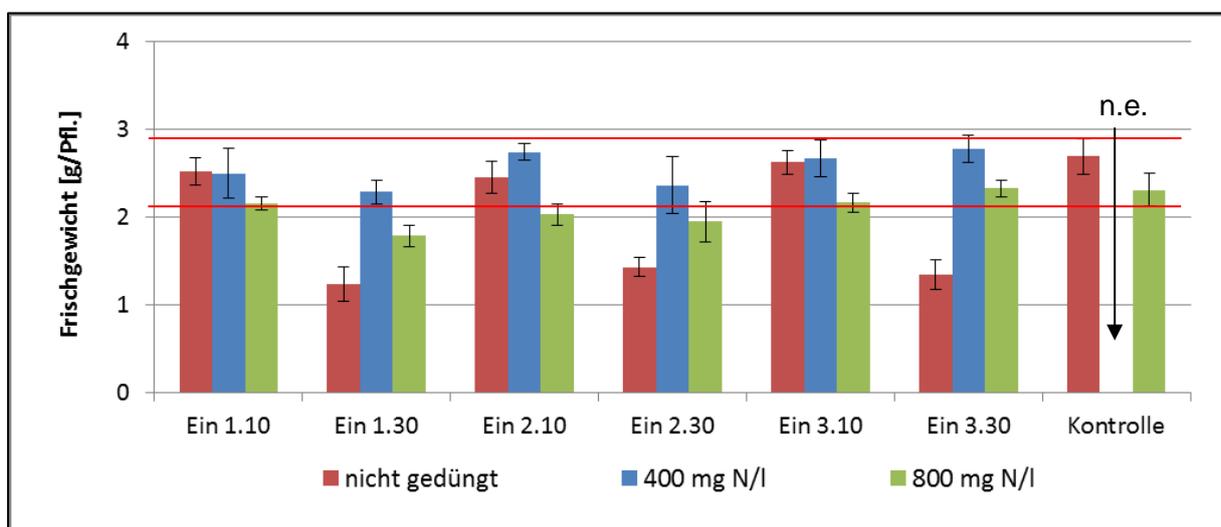


Abb. 18: Frischgewichte des Chinakohls bei Einsatz der unterschiedlich vorbehandelten Landschaftspflegemischung und verschiedenen Dünge­stufen; n.e. – wurde nicht durchgeführt

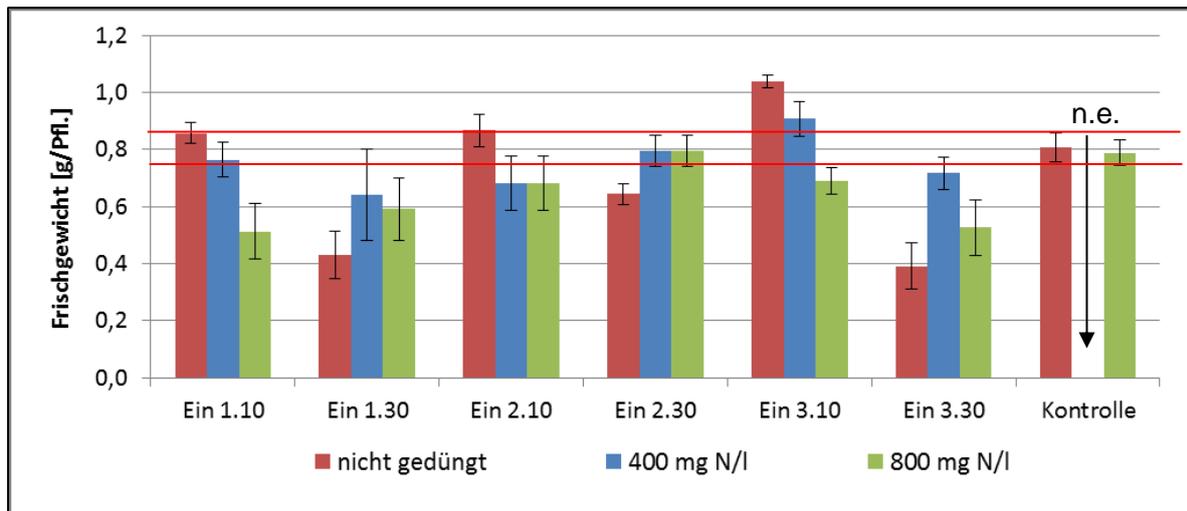


Abb. 19: Frischgewichte des Salats bei Einsatz der unterschiedlich vorbehandelten Landschaftspflegemischung und verschiedenen Dünge­stufen; n.e. – wurde nicht durchgeführt

Abbildung 19 zeigt, dass das Frischgewicht von Salat bei Zumischung von 10 Vol.-% ohne Düngung mit der Kontrolle vergleichbar ist bzw. besser. Das Frischgewicht beträgt in jedem Fall absolut mehr als 100 % im Vergleich zur Kontrolle. Gegenüber den Ergebnissen beim Chinakohl sinkt die Frischmasse mit der Düngung. Die Vorgaben der VDLUFA zum Frischmasseertrag werden nur nicht von dem Material Ein 1.10 und Ein 3.10 mit einer Dünge­stufe von 800 mg/l erreicht.

Bei 30 Vol.-% Zumischung ist der Unterschied bei den Frischmasseerträgen des Salats entsprechend Abbildung 19 wie bei 10 Vol.-% Zumischung zwischen den einzelnen Dünge­stufen verschieden. Der Frischmasseertrag steigt außer bei Ein 1.30 mit zusätzlicher Stickstoffdüngung bei einem Niveau von 400 mg/l signifikant gegenüber der ungedüngten Variante. Zur nächsten Dünge­stufe von 800 mg/l bleibt der Frischmasseertrag konstant bzw. sinkt bei Ein 3.30 signifikant. Durch die erste zusätzliche Dünge­stufe kann der Frischmasseertrag auf über 80 % im Vergleich zur Kontrolle gesteigert werden, wobei dies bei Ein 2.30 schon ohne Düngung erzielt werden konnte.

Insgesamt zeigt sich, dass durch den Stickstoffausgleich der Einsatz im Kultursubstrat auf Basis der Frischmasseerträge mit 10 und 30 Vol.-% möglich ist. Aufgrund der hohen Standardabweichung ist kein Unterschied in den Frischmasseerträgen auf die Parametereinstellungen am Retruder zurückzuführen. (siehe Abb. 18 und 19)

Auf Basis der Stickstoffimmobilisierungswerte können dahingegen alle drei Materialien nicht im Substrat eingesetzt werden. Die Immobilisierungswerte liegen bei allen Materialien über 372 mg/l. Zwischen den drei Materialien besteht weiterhin ein Unterschied: Das Material der Einstellung 1 weist mit 754 mg/l Substrat die höchste Stickstoffimmobilisierungsrate auf, gefolgt von 419 des Materials der Einstellung 2 und 372 des Materials der Einstellung 3. Damit besteht zum einen ein Unterschied zwischen den beiden Retrudereinstellungen bei Einsatz von purem Material sowie kein Unterschied durch die Zugabe von Humintorf. Der Unterschied zwischen der Einstellung 2 und 3 ist rechnerisch auf die unterschiedlichen Masseanteile in der Mischung zurückzuführen. Ein Unterschied zwischen den Materialien der

Einstellung 1 und 2 ergibt sich ebenfalls bei der Sauerstoffaufnahme. So wurden bei Einstellung 1 0,52 mg O₂/ kg organische Masse veratmet und bei Einstellung 2 nur 0,21. Damit zeigt sich grundsätzlich, dass die Parameter der Einstellung 2 besser sind als die der Einstellung 1. Bei Zugabe von Humintorf beträgt die Sauerstoffaufnahme 0,26 und ist damit von dem Material der Einstellung 2 nicht verschieden. Damit ist der Trend der Sauerstoffaufnahme sowie auch die Stickstoffimmobilisierung identisch. Weiterhin bestätigen sich, dass der vor allem beim Chinakohl beobachtete verminderte Frischmasseertrag bei 30 Vol.-% Zumischung auf eine Stickstoffimmobilisierung zurückzuführen ist. (Siehe Tab. 33)

Tab. 33: Daten zum Sauerstoffverbrauch und zur N-Bindung als Indikatoren für die biologische Aktivität und Stabilität des Materials; für Heide wurden keine Daten ermittelt, da ein Vergleich aufgrund des zeitlichen Versatzes der Versuche mit Heide und Landschaftspflegemischung nicht gegeben ist und für Heide nur ein Material hergestellt werden konnte; die angegebenen Daten stammen aus einem Vorversuch, bei dem Heide mittels Hammerschlagmühle aufgefaserter wurde

	Sauerstoffaufnahme [mg O ₂ /kg org. Masse/h]	N-Bindung [mg N/l Substrat]
Ein 1	0,52	- 754
Ein 2	0,21	- 419
Ein 3	0,26	- 372
Heide	n.e.	- 169

Die Keimrate betrug sowohl beim Salat als auch beim Chinakohl in jedem Versuchsglied mehr als 90 %. Die Vorgaben der VDLUFA sind damit eingehalten.

Die Bonitur der Kressetests beträgt sowohl beim Gasphasentest als auch beim Keimungstest bei 10 Vol.-% Zumischung mehr als 4,5 von maximal 5. Dahingegen sinkt die Bonitur bei 30 Vol.-% deutlich auf 3 bei Ein 1 und auf 2 bei Ein 2. (Siehe Tab. 34) Bei Zusatz von Humintorf zur Auffaserung bleibt die Bonitur von 4,5 demgegenüber zur Zumischung von 10 Vol.-% konstant. Damit wäre eine Zumischung von 10 Vol.-% in jedem Fall möglich und bei 30 Vol.-% nur bei Nutzung von Ein 3.

Die tatsächliche Masse an trockenem Material der Landschaftspflegemischung ist in allen drei hergestellten Mischungen vergleichbar. Damit ist der bestehende Unterschied beim Kressegasphasentest auf die Zumischung von Humintorf zum Material zurückzuführen.

Tab. 34: Zusammenstellung der Bonituren der Kressetests als Mittelwert aus der Bonitur der Wurzel und des Sprosses bei 10 und 30 Vol.-% Zumischung

Vers.- Bez. [1]	Gasphasen- test [1]	Keimungs- test [1]
Ein 1.10	4,5	5,0
Ein 1.30	3,0	4,5
Ein 2.10	4,5	4,8
Ein 2.30	2,0	5,0
Ein 3.10	4,5	5,0
Ein 3.30	4,5	5,0
Ein 4.30	4,0	4,5

Zur Heide

Die Versuche mit Heide wurden nur mit 30 Vol.-% Zumischung durchgeführt.

Abbildung 20 zeigt, dass das Frischgewicht von Chinakohl bei 30 Vol.-% Zumischung unabhängig von der Düngung nicht mit der Kontrolle vergleichbar ist. (Siehe Abb. 20, links) Das Frischgewicht erreicht maximal 42 % im Vergleich zur Kontrolle. Weiterhin ergibt sich statistisch kein Unterschied durch die Düngung. Ebenso verhält es sich beim Salat (Siehe Abb. 20, rechts) Ebenfalls besteht kein Unterschied zur Kontrolle. Allerdings ist der Mittelwert des Frischmasseertrags im Vergleich zur Kontrolle mit 69 % stark reduziert. Grund hierfür können die aufgetretenen Schadensbilder an den Pflanzen sein. (siehe abb. 21 und 22)

Die Vorgaben der VDLUFA und RHP hinsichtlich des Frischmasseertrags werden damit nicht eingehalten.

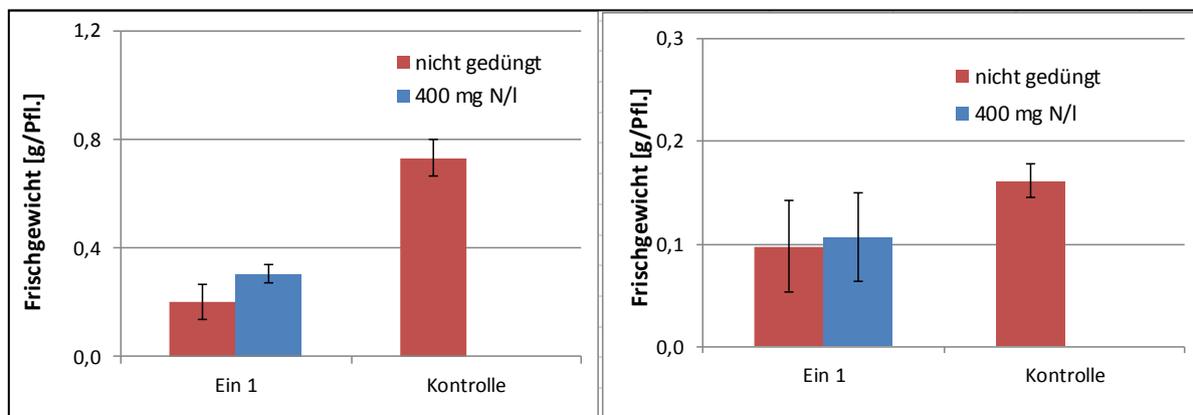


Abb. 20: Frischgewichte des Chinakohls (links) und des Salats (rechts) bei Einsatz von aufgefaserter Heide mit verschiedenen Düngestufen bei 30 Vol.-% Zumischung

Die Keimrate betrug am Ende des Versuchs sowohl beim Chinakohl als auch beim Salat mehr als 90 %. Die Vorgaben der VDLUFA sind damit grundsätzlich eingehalten. Allerdings wurde beim Salat eine Verzögerung festgestellt. So betrug die Keimrate nach 6 Tagen nur 78 % und nach 8 Tagen 98%. Anschließend wurde die Probe aufgedüngt. Die Saat der Kontrolle ist schon nach 6 Tagen vollständig aufgegangen.

Gegenüber den Versuchen mit der Landschaftspflegemischung wurde die Kontrolle und die Düngestufe 1 (Bezeichnung: nicht gedüngt) bei den Versuchen mit Heide ebenfalls gedüngt. Grund hierfür ist, dass durch Analysen festgestellt wurde, dass das eingesetzte Standardsubstrat keinen Stickstoff aufwies. Das Stickstoffniveau betrug nach der Düngung 200 mg/l Substrat. Die aufgetretenen Schadensbilder könnten damit auf die nachträgliche Flüssigdüngung bzw. den Kontakt des Düngers mit den Blättern der Pflanzen zurückzuführen sein. Da die Saat bei der Kontrolle früher aufgegangen ist, waren die Keimlinge bei der Düngung schon etwas größer, sodass diese nicht mit dem Dünger in Kontrakt traten und damit kein Schaden auftrat.

In Vorversuchen wurde bei den Testpflanzen Salat und Kohlrabi ebenfalls ein Keimungsverzug festgestellt, beim Chinakohl nicht. So betrug die Keimrate nach drei Tagen beim Kohlrabi 58 % zu 75 % bei der Kontrolle sowie beim Salat 67 % zu 79 % bei der

Kontrolle. Weiterhin waren die Frischgewichte trotz keiner Schadensbilder wie in der oben dargestellten Versuchsreihe im Vergleich zur Kontrolle um 30 % beim Salat und 50 % beim Kohlrabi reduziert. Parallele Versuche zur direkten Bestimmung der Stickstoffimmobilisierung ergaben eine Bindung an Stickstoff von 169 mg/l Substrat. (Siehe Tab. 33) Aus diesem Grund sollte in einer weiteren Versuchsreihe die Immobilisierung durch Aufdüngung ausgeglichen werden. Aufgrund der dargestellten Probleme kann damit insgesamt keine Aussage zur Reduzierung der Stickstoffimmobilisierung durch Auffaserung des Materials auf Basis der Frischgewichte getroffen werden.



Abb. 21: Schadensbild beim Salat bei Zumischung von aufgefaserter Heide zum Substrat; Die Saat ist aufgegangen, allerdings sind ein Großteil der Keimlinge sowohl bei der Probe (obere Reihe) als auch bei der Kontrolle (untere Reihe) nicht über das Keimblattstadium hinaus gewachsen



Abb. 22: Schadensbild beim Chinakohl bei Zumischung von aufgefaserter Heide zum Substrat; die Kontrolle (linke Reihe) weist keine Probleme auf. Die Blätter der Probe (rechte Reihe) zeigen weiße Ränder auf und sind zum Teil eingerollt.

Die Bonitur der Kressetests beträgt sowohl beim Gasphasentest als auch beim Keimungstest mehr als 4,5 von maximal 5. Damit wäre eine Zumischung von 30 Vol.-% möglich.

8.3 Ergebnisse weiterer Analysen

Die Grenzwerte der RHP sind deutlich niedriger als die der RAL-Gütesicherung. So hält aufgrund des hohen Mangan-Gehalts bei den Spurenelementen kein hergestelltes Material die Vorgaben der RHP ein. (Siehe *Tab. 35*) Hierbei übersteigt die Landschaftspflegemischung den Grenzwert um das 2-Fache und die aufgefaserter Heide diesen um das 10-Fache. Bei den anderen Kriterien besteht keine Einschränkung. Demgegenüber werden die Grenzwerte für die Nährstoffe nach RAL-Gütesicherung für eine Zumischung von 40 Vol.-% eingehalten. (Siehe *Tab. 36*)

Tab. 35: Bewertung der chemischen Analysen nach den Methoden der RHP; Die maximal zu erreichende Gesamtpunktzahl beträgt 5 bzw. für Heide 4.

Vers.-Nr.	Bezeichnung	Bewertung Grenzwerte im Vergleich zu Kompost (1) nach					Summe chem. Analysen
		Wasser-Extraktion	CAT-Extraktion	Spurenelemente	Schwermetalle	Mn-aktiv	
		[Punkte]					
1	Ein 1	1	1	0	1	1	4
2	Ein 2	1	1	0	1	1	4
3	Ein 3	1	1	0	1	1	4
4	Ein 4	1	1	0	1	n.a.	4

Tab. 36: Chemische Analyseergebnisse bzw. Nährstoffgehalte der Produkte der Eduktvariation nach CaCl₂-Extraktion bzw. CAL im Vergleich zu den Grenzwerten der RAL-Gütesicherung für Substratkompost (Typ 1: 40 Vol.-% Zumischung; Typ 2: 20 Vol.-% Zumischung); n.e. – für diesen Parameter bestehen keine Grenzwerte

Vers.-Nr.	Bezeichnung	pH-Wert (CaCl ₂)	Salzgehalt [g/Liter]	P ₂ O ₅ (CAL)	K ₂ O (CAL)	Σ NO ₃ -N + NH ₄ -N [mg/Liter]		
						NH ₄ -N	NO ₃ -N	
1	Ein 1	5,9	1,3	208	305	2	2	< 1
2	Ein 2	6,4	1,4	208	605	2	2	< 1
3	Ein 3	5,1	1,2	126	576	2	2	< 1
4	Ein 4	4,5	0,7	90	698	9	6	3
	Typ 1	n.e.	2,5	< 1.200	< 2.000	< 300	n.e.	n.e.
	Typ 2	n.e.	5,0	< 2.400	< 4.000	< 600	n.e.	n.e.

Darüber hinaus wurden Verpilzungstests durchgeführt. Bei allen Materialien trat sichtbar Schimmel auf, wobei dieser bei purem Material und Ein 3 am deutlichsten auftrat. (Siehe *Abb. 20* und *21*) Aufgrund der Schimmelbildung kann keine Variante als Zuschlagstoff eingesetzt werden.



Abb. 23: Darstellung der Ergebnisse des Verpilzungstests bei Zugabe von aufgefaserter Heide (Ein 4)

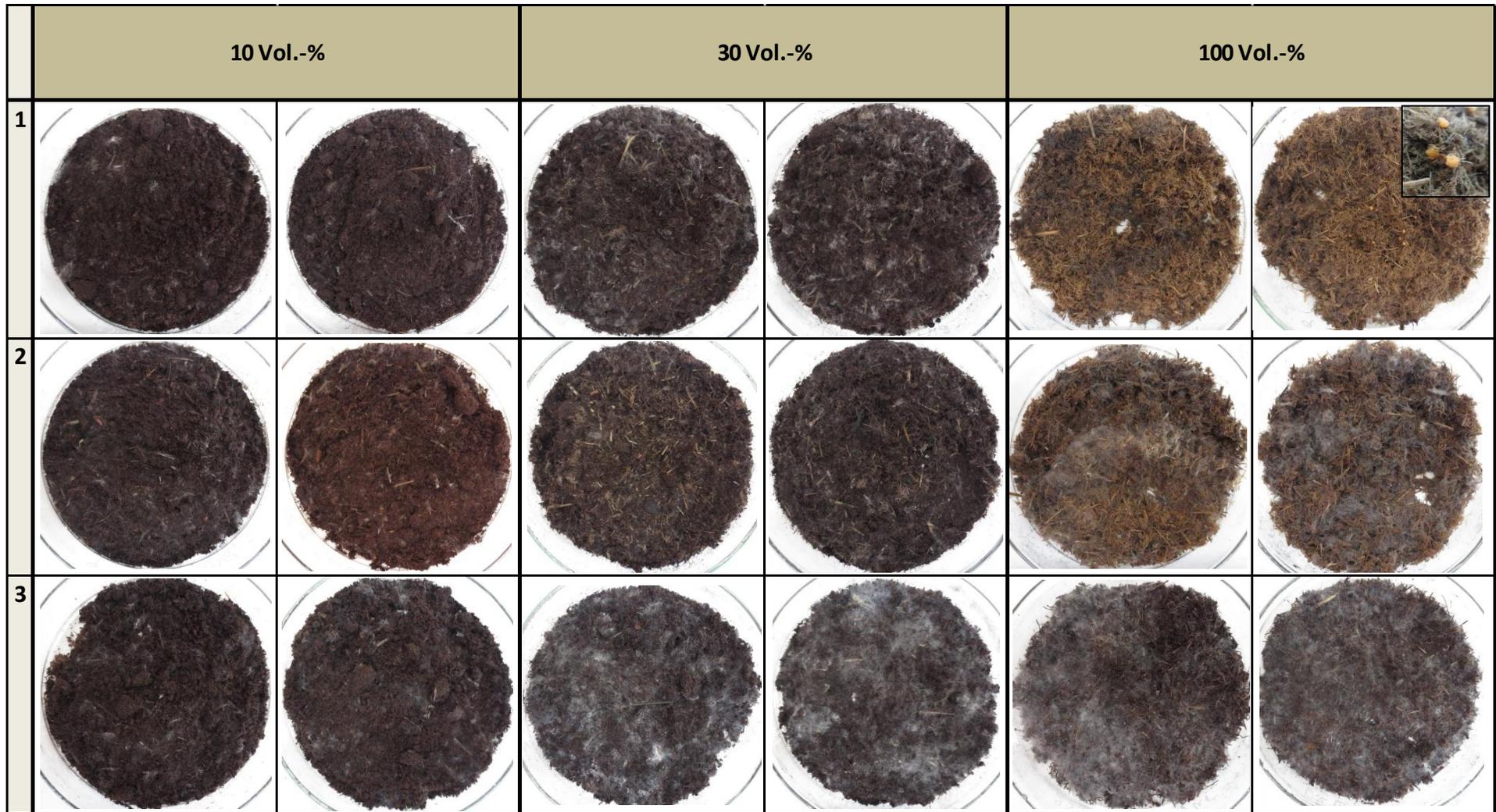


Abb. 24: Darstellung der Ergebnisse des Verpilzungstests bei Zugabe von aufgefaserter Landschaftspflegemischung; in der linken Spalte sind die Versuchsnummern (Einstellungen) angegeben

8.4 Fazit

Grund für die hier durchgeführten Untersuchungen waren die sehr guten Ergebnisse in den verschiedenen Untersuchungen bei Einsatz von purem Landschaftspflegematerial im *Kapitel 6.2*. Diese konnten mit vergleichbarem Material, die hier als Landschaftspflegemischung bezeichnet wurde, bestätigt werden. So konnten vergleichbare und auch bessere Frischmasseerträge zur Kontrolle erzielt werden. Weiterhin war die ermittelte Stickstoffimmobilisierung bei 10 Vol.-% Zumischung nicht beeinträchtigend und konnte bei 30 Vol.-% Zumischung durch zusätzliche Düngung kompensiert werden. Ein Einfluss der Parametereinstellungen am Retruder auf den Frischmasseertrag wurde nicht ermittelt. Dahingegen konnten durch die Vorbehandlung im Retruder positive optische und haptische Effekte beim Material erzielt werden. Durch die Zugabe von Humintorf konnte darüber hinaus noch die Farbe des Materials an die typische Farbe von Substrat angepasst werden. Physikalische Versuche wurden aufgrund des Schimmelrisikos nicht durchgeführt. Hinsichtlich der Kressephasentests wurden bei 30 Vol.-% Zumischung bei den puren aufgefaseren Materialien (Ein 1 und Ein 2) toxische Effekte beobachtet, die bei Ein 3 nicht auftraten. Beim Kressekeimungstest traten keine negativen Effekte auf. Dahingegen verschimmelten alle Materialien im Verpilzungsversuch, spiegeln damit die festgestellte hohe Sauerstoffzehrung wieder und geben damit an, dass die Materialien nicht im Substrat eingesetzt werden können.

Aus Vorversuchen ist bekannt, dass Heide eine Stickstoffimmobilisierung von 167 mg/l Substrat aufweist. Die Frischmasseerträge waren ohne Aufdüngung bei 30 Vol.-% Zumischung stark reduziert, sodass ein Einsatz im Substrat nach den Richtlinien der VDLUFA oder auch der RHP nicht möglich ist.

Die Vorbehandlung der Heide mit dem Retruder war zum einen hinsichtlich der Auffaserung schwierig, sodass nur ein Material hergestellt werden konnte gegenüber dreien bei der Landschaftspflegemischung. Zum anderen konnte das Material nicht ausreichend aufgefaserter werden. Die Landschaftspflegemischung wies hier bessere Ergebnisse auf. Weiterhin wurden sowohl im Vorversuch als auch im Versuch selbst beim Salat ein Keimungsverzug von zwei Tagen ermittelt. Der Frischmasseertrag war wie bei den Vorversuchen im gleichen Maße reduziert. Gegenüber den Vorversuchen erfolgte jedoch bei jeder Probe eine Düngung. Anschließend traten Schadbilder an den Pflanzen auf, die wahrscheinlich auf die Düngung zurückzuführen sind. Die Pflanzen wuchsen entweder gar nicht weiter (Salat) oder die Blätter hatten weiße Ränder und waren leicht eingerollt (Chinakohl). Aufgrund der Ausbildung toxischer Effekte bei den nachfolgenden Biotests durch evtl. Düngung kann keine Aussage zur Kompensation der Stickstoffimmobilisierung und damit zum Einsatz im Substrat getroffen werden. Die Kresstests waren positiv. Allerdings verschimmelte das Material im Verschimmelungstest und ist damit nicht im Substrat einsetzbar.

Sowohl Heide als auch die Landschaftspflegemischung sind hinsichtlich der Nähr- und Spurenstoffe nach den Vorgaben der RHP aufgrund hoher Mangengehalte nicht einsetzbar. Nach den Vorgaben der RAL-Gütesicherung können alle hergestellten Materialien zu 40 Vol.-% zugemischt werden.

Insgesamt zeigt sich aber, dass die Materialien derzeit im Substrat aufgrund der Neigung zur Verschimmelung nicht eingesetzt werden können und eine reine Auffaserung des Materials diesbezüglich nicht effektiv ist.

9. Energetische Bewertung des carbonisierten Materials

Aufgrund der Ergebnisse der vorgenannten Kapitel und der eingeschränkten Nutzungsmöglichkeiten hinsichtlich der Torfsubstitution wird die Heide und Landschaftspflegematerial respektive die hieraus hergestellten Biokohlen auf ihre Brennstoffeigenschaften untersucht.

„Für die energetische Nutzung von Biokohle als Brennstoff sind vor allem die Elementarzusammensetzung sowie die brennstoffchemischen und physikalisch-mechanischen Eigenschaften von Bedeutung. So haben zum Beispiel die Partikelgröße sowie die Form und Dichte des Brennstoffs einen direkten Einfluss auf den Transport und die Logistik. Die meisten Kenngrößen gelten auch als Merkmale für die Brennstoffqualität, da sie die thermochemische bzw. schadstoffbildenden Prozesse beeinflussen. Insbesondere die aschebildenden Elemente wie Si, K, Mg und Na sind hier von Interesse. Weitere wichtige Einflussgrößen sind die Energiedichte, das Abbrandverhalten, die Verbrennungstemperatur, die Rauchgasmenge usw.; die wesentlichen Parameter sind hier der Brennwert und der Wassergehalt. [...] [(14, 15)]

Vergleiche der natürlichen Kohlen mit den künstlichen Kohlen zeigten, dass die chemischen Eigenschaften je nach Prozessbedingung und Edukten den der natürlichen Kohlen ähnlich sind. [...] [(16)] Jedoch sind die physikalischen Eigenschaften der Braun- oder Steinkohle nicht in der Biokohle zu finden, da diese durch mechanische Einflüsse entstanden sind. [...] [(17, 18)]

Das Produkt aus der Carbonisierung ist zum jetzigen Zeitpunkt kein standardisierter und genormter Brennstoff. Die Eigenschaften der Biokohle sind zudem stark abhängig von der Prozessführung und der eingesetzten Biomasse. Daher ist eine analytische Bewertung unabdingbar. Insbesondere das Ascheschmelzverhalten und eine Betrachtung der aschebildenden Elemente könnte Aufschluss über die Eignung der Biokohle als Brennstoff im Co-Firing bzw. als Substitut für fossile Energieträger geben.

Durch die hydro- bzw. vapo-thermale Carbonisierung ist zu erwarten, dass einige dieser Punkte durch die verfahrenstechnische Betriebsführung sowie durch das Vorhandensein von Wasser während der Reaktion verbessert oder auch verschlechtert werden. Insbesondere ist zu erwarten, dass der Gehalt an wasserlöslichen Alkali- und Erdalkalimetallen gesenkt wird, wodurch die korrosiven Eigenschaften sowie das Ascheschmelzverhalten des Produktes gegenüber dem des Eduktes verbessert ist.

Die Brennstoffaschen haben hinsichtlich des Verhaltens ihrer anorganischen Bestandteile bei Verbrennungs- und Vergasungsprozessen beträchtliche Unterschiede. Von besonderer Bedeutung sind hierbei die Menge der Asche sowie der Gehalt der enthaltenen Mineralien. [...] [So] gibt es Elemente wie Calcium und auch Magnesium, die im Verbrennungsprozess den Schmelzpunkt erhöhen, und welche wie Kalium und Natrium, die diesen senken. [...] [(15, 19, 20, 21, 22)]

Da die chemische Zusammensetzung keinen sicheren Rückschluss auf das Ascheschmelzverhalten zulässt, wurden die Untersuchungen mit Hilfe eines physikalischen

Verfahrens (DIN 51730 September 2007) durchgeführt. Als Analysegerät diente das Gerät AF 700 der Firma Leco. Dieses Gerät arbeitet auf Grundlage des Video-Verfahrens, bei dem der Schmelzverlauf durch Aufnahmen von Schattenbildern des Probekörpers bei bestimmten Temperaturen ermittelt wird.

Die optische Analyse ist insbesondere bei den von uns verwendeten biogenen Stoffen von Nöten, da es keinen definitiven Ascheschmelzpunkt gibt. Viel mehr sintern und erweichen die Aschen beim Erwärmen und schmelzen je nach chemischer Zusammensetzung über einen entsprechenden Temperaturbereich, bevor sie zum vollständigen Fluss kommen.“ (entn. aus(23))

Hinsichtlich der Auswahl einer geeigneten Feuerungstechnik für die Verbrennung von Biokohle lässt sich keine allgemeingültige Aussage treffen. Die Komponenten Brennstoff, Feuerung und entstehende Produkte sind untrennbar miteinander verbunden. Außerdem wirken sich ebenfalls rechtliche und wirtschaftliche Aspekte auf diese aus. *Abbildung 25* und *26* geben einen Überblick über die verfügbare Technik im Feuerungsanlagenbereich und deren Anfordeurngen an den Brennstoff.

Feuerungssystem	Max. Anlagengröße	Aschegehalt	Ascheschmelzpunkt	Brennstofffeuchte
Wirbelschichtfeuerung	250MW	<30%	800-900°C	<50%
Rostfeuerung-Planrost	10MW	geringe Aschegehalte von Vorteil	hohe Temp. in Rostnähe	<20%
Rostfeuerung-Schubrost	100MW	<50%	geringe Anforderungen	5-60%
Rostfeuerung-Wanderrostfeuerung	150MW	-	hohe Temp. in Rostnähe	hohe Feuchtegehalte möglich
Schräg- und Sattelrostfeuerung	2MW	üblich 3-10%	hohe Temp. in Rostnähe	<20%
Rostfeuerung- Heizautomat	2MW	üblich 3-10%	hohe Temp. in Rostnähe	<20%
Rostfeuerung- Unterschubfeuerung	5MW	3-5%	1100-1400°C	<20%
Rostfeuerung- Schüttelrostfeuerung	30MW	-	1100-1500°C	<20%
Staubfeuerung - Trocken	1000MW	-	möglichst hoch	-
Staubfeuerung -Nass	1000MW	-	keine Anforderungen	-

Abb. 25: Gegenüberstellung konventioneller Technologien und ihrer Anforderungen an den Brennstoff (entn. aus (20))

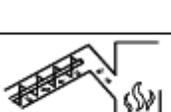
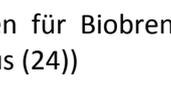
Prinzip	Variante	Typ	Schema	Nennwärmeleistung	Brennstoffe
Unterschubfeuerung				ab 10 kW (bis 2,5 MW)	Holzhackschnitzel, Holzpellets
				ab 35 kW	Holzhackschnitzel, Holzpellets
Feuerungen mit seitlichem Einschub (Schnecke/Kolben)	als Rostfeuerung	starrer Rost, z.T. mit Ascheräumer oder Kipprost		ab 15 kW bis 60 MW	Holzhackschnitzel, Holzpellets, Späne, Rinde
		bewegter Rost (Vorschubrost)		ab 40 kW bis 450 kW	Holzhackschnitzel, Holzpellets
	Walzenrostfeuerung		ab 25 kW bis 800 kW	Holzhackschnitzel, Holzpellets (>15 kW) Halmgut, Körner (bei Wasserkühlung)	
	als Schubbodenfeuerung (ohne Rost)				
Abwurf- feuerung	mit Rost	Kipprostfeuerung		ab 15 kW bis 30 kW	Holzpellets, evtl. Präzisions- hackgut
		Schalenbrenner		ab 6 kW bis 30 kW	Holzpellets
	ohne Rost	Tunnelbrenner		ab 10 kW	Holzpellets
		Sturzbrandbrenner		ab 14 kW bis 60 kW	Holzpellets, Scheitholz, Holzhackschnitzel (ab 20 kW)

Abb. 26: Verschiedene Feuerungsvarianten für Biobrennstoffe und deren Leistungsbereich sowie eingesetzten Brennstoff (entn. aus (24))

9.1 Ergebnisse der brennstoffspezifischen Untersuchung

Als Inputmaterial wurde eine Mischung von Landschaftspflegematerialien verwendet, die von ehemalige Torfabbauflächen der Klasmann-Deilmann GmbH der Standorte Rehden, Vehnemoor und Bourtanger Moor stammt. Das Material setzt sich im Wesentlichen aus Pfeifengras und Binsen zusammen.

Zur Untersuchung des Einflusses von Temperatur und Reaktionszeit wurde das Material bei 3 verschiedenen Zeiten und 2 verschiedenen Temperaturen thermochemisch umgesetzt: die Parameter sind 0,5 Stunden, 2 Stunden und 4 Stunden sowie 180°C und 195°C. (Siehe Tab. 37) Weiterhin wurde Heide aus der Glücksburger Heide als Edukt verwendet und mit 200°C 2 Stunden carbonisiert.

Tab. 37: Übersicht über die verwendenden Versuchsparameter und Edukte

	Reaktions- temperatur [°C]	Reaktions- zeit [h]	Masse- erhalt (wf) [%]	C-Effizienz (wf) [%]
Landschaftspflegematerial	180	0,5	87,7	94,1
Landschaftspflegematerial	180	2	77,7	87,4
Landschaftspflegematerial	180	4	76,2	89,1
Landschaftspflegematerial	195	0,5	74,2	81,7
Landschaftspflegematerial	195	2	65,2	74,7
Landschaftspflegematerial	195	4	64,5	72,4
Heide	200	2	69,4	77,4

Sowohl der Masseerhalt als auch die C-Effizienz nehmen mit steigender Reaktionszeit ab. (Siehe Tab. 37, Abb. 27) Weiterhin ist ein deutlicher Unterscheid zwischen den Reaktionstemperaturen zu erkennen: So ist bei 0,5 h Reaktionszeit und einer Reaktionstemperatur von 195°C der Massenerhalt um 13,1 Prozentpunkte und die C-Effizienz um 12,4 niedriger gegenüber den Versuchen bei 180°C. (Siehe Tab. 37, Abb. 27) Die bei der Heide gewählten Reaktionsbedingungen führen zu einem Massenerhalt von 69,4% bei einer C-Effizienz von 77,4%. Im Vergleich zum Landschaftspflegematerial, welches bei 195 °C umgesetzt wurde, sind die Kennwerte höher. Hiermit zeigt sich ein unterschiedlicher Masseerhalt und eine unterschiedliche C-Effizienz bei den beiden Materialien. Hierbei sind die Ergebnisse der Heide positiver zu bewerten, da mehr Masse für die energetische Verwendung vorhanden ist bei gleichzeitigem höheren Anteil an gebundenem Kohlenstoff.

Die Definition der beiden Kennwerte ist in Gleichung 1 und 2 dargestellt.

Gleichung 1: Masseerhalt
$$m_{erh.,wf} = \frac{m_{Edukt,wf}}{m_{Produkt,wf}} \times 100\%$$

Gleichung 2: C-Effizienz
$$C_{eff.,wf} = \frac{m_{C_{Edukt,wf}}}{m_{C_{Produkt,wf}}} \times 100\%$$

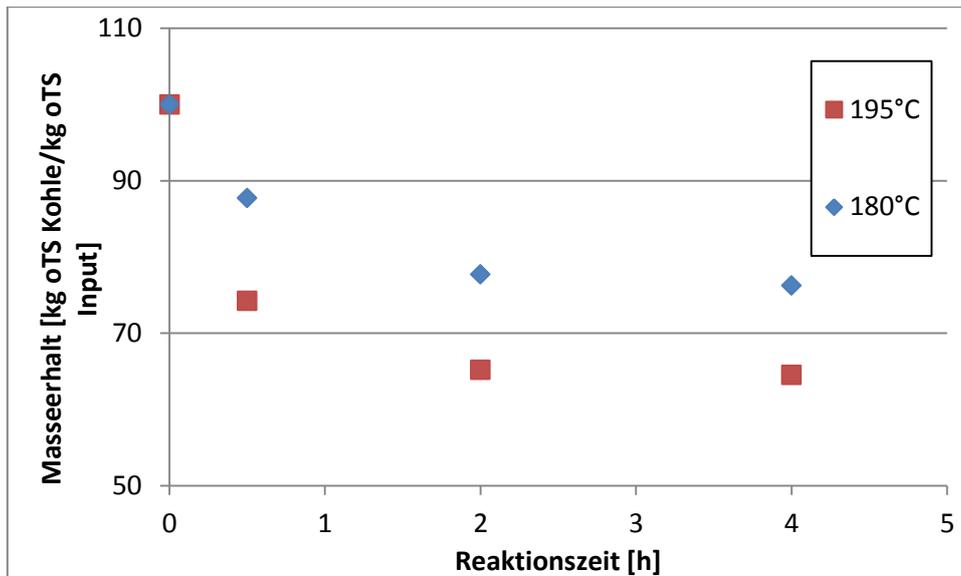


Abb. 27: Darstellung des Massenerhalts des carbonisierten Landschaftspflegematerials in Abhängigkeit von der Reaktionszeit und Temperatur

Der Anteil an flüchtigen Bestandteilen nimmt wie der Massenerhalt mit steigender Reaktionszeit und Temperatur ab. (siehe *Abb. 28*) Dies ist im Kontext mit dem van Krevelen-Diagramm im wesentlichen auf den Abbau von Sauer- und Wasserstoff zurückzuführen, was damit zu einem Verlauf entlang der natürlichen Inkohlung führt. Hierdurch steigt prozentual der Kohlenstoffanteil an. (Siehe *Abb. 29*)

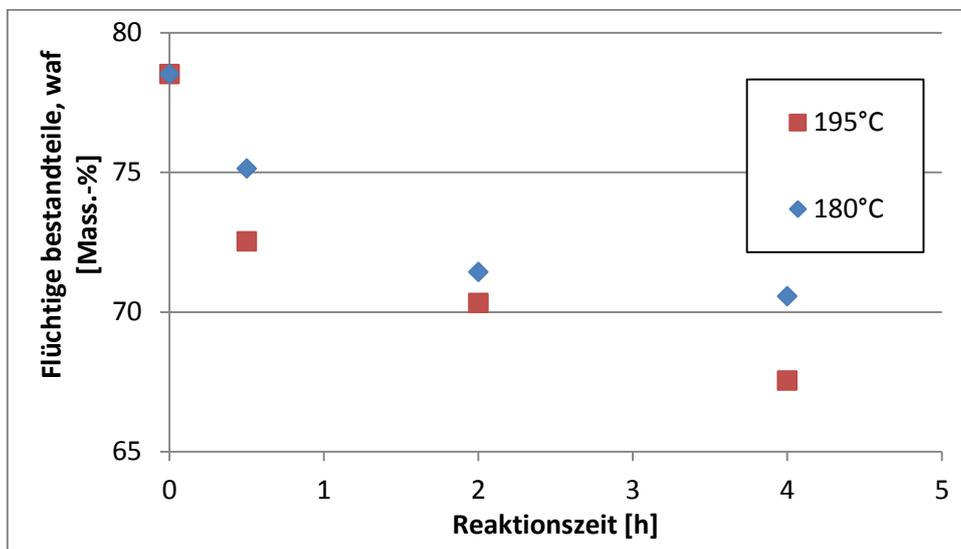


Abb. 28: Darstellung des Gehaltes an flüchtigen Bestandteilen des carbonisierten Landschaftspflegematerials in Abhängigkeit von der Reaktionszeit und Temperatur

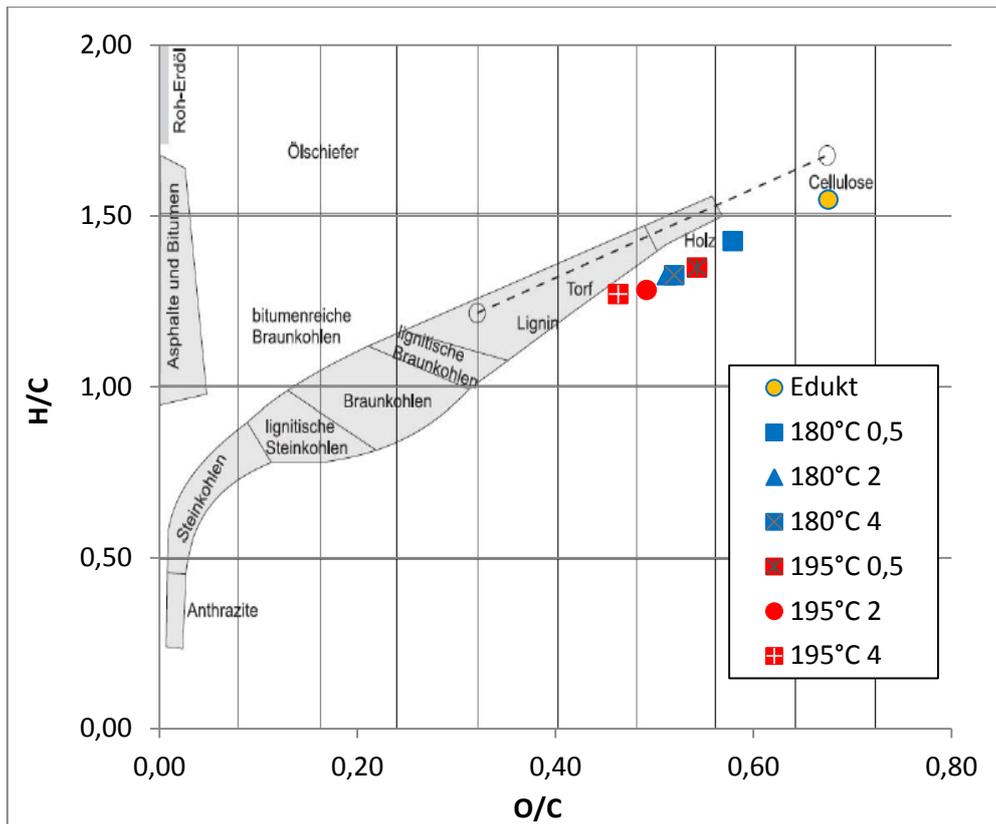


Abb. 29: Darstellung der molaren Verhältnisse der hergestellten Materialien im van Krevelen Diagramm

Ein weiteres wichtiges Kriterium zur Bewertung verschiedener Brennstoffe ist der Brennwert bzw. Heizwert. Der Heizwert selbst nimmt mit zunehmender Reaktionszeit und Temperatur zu. Dies liegt am Abbau von weniger kalorischen Inhaltsstoffen und, wie weiter oben beschrieben, an der prozentualen auf die gesamte Masse bezogenen Erhöhung des Kohlenstoffanteils. Weiterhin erfolgt die größte Heizwertsteigerung innerhalb der ersten 30 Minuten. (Siehe *Abb. 30*) Insgesamt steigt dieser mit zunehmender Reaktionszeit sowie Reaktionstemperatur an, wobei die Heizwertsteigerung bei 180 °C Umsetzungstemperatur mit der Zeit größer ist als bei 195 °C Umsetzungstemperatur.

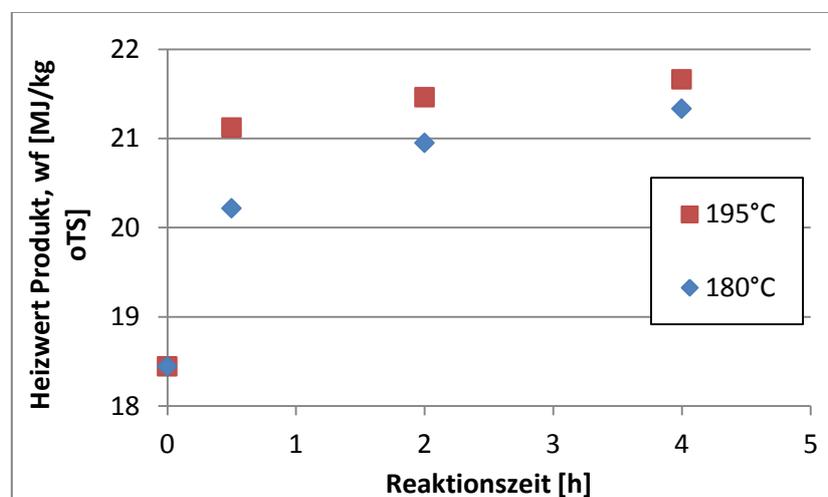


Abb. 30: Darstellung des Heizwerts des carbonisierten Landschaftspflegematerials in Abhängigkeit von der Reaktionszeit und Temperatur

Auch der Aschegehalt steigt tendenziell mit der Reaktionszeit und mit der Temperatur, wobei nach 0,5 Stunden Reaktionszeit kein Unterschied besteht und im Vergleich zum Edukt lediglich der Aschegehalt des Versuchs mit 4 Stunden Reaktionszeit und 195 °C einen signifikant höheren Aschegehalt aufweist. (Siehe *Abb. 31*) Allerdings ist die Steigerung des Aschegehalts im Vergleich zur Reduktion des Masseerhalts deutlich geringer. So steigt der Aschegehalt lediglich nach 4 Stunden auf maximal 3,6 % und damit um 0,7 Prozentpunkte, wohingegen der Masseerhalt sich bei 4 Stunden um 36 Prozentpunkte reduziert. Es zeigt sich damit, dass Asche durch die Verfahrensführung im Material reduziert wird. Hinsichtlich der Brennstoffeigenschaften bedeutet dies trotzdem Grundsätzlich eine Verschlechterung der Eigenschaften, wobei der hier dargestellte Aschegehalt von maximal 3,6 % ein akzeptabler Wert im Vergleich zu anderen biogenen oder fossilen Brennstoff ist und zu mindest hinsichtlich der Menge der Asche keine Beeinträchtigung der Feuerungsanlage zu erwarten ist.

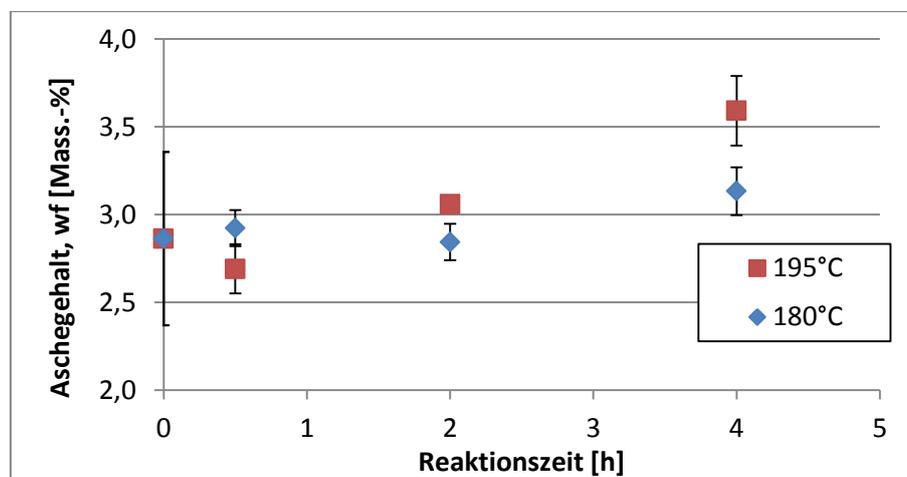


Abb. 31: Darstellung des Aschegehalts des carbonisierten Landschaftspflegematerials in Abhängigkeit von der Reaktionszeit und Temperatur

Da die chemische Zusammensetzung keinen sicheren Rückschluss auf das Ascheschmelzverhalten zulässt, wurden weitere Untersuchungen mithilfe eines physikalischen Verfahrens nach DIN 51730 durchgeführt. In *Abbildung 32* sind die verschiedenen Punkte des Ascheschmelzverhaltens dargestellt.

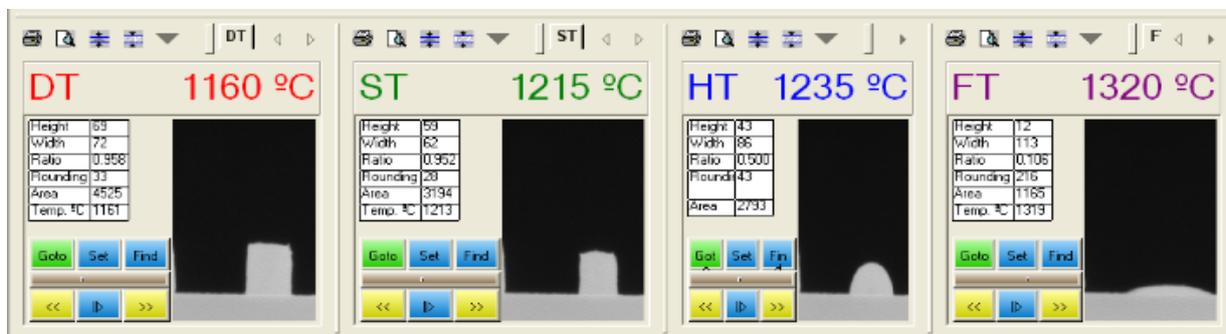


Abb. 32: Aufnahmen zum Ascheschmelzverhalten von Proben mit dem Analysegerät der Firma Leco. Darstellung von links nach rechts: Erweichungs- (DT)-, Sphärische (ST), Halbkugel- (HT) und Fließtemperatur (FT)

Alle Proben zeigen hinsichtlich der Sinter-, Erweichungs- und sphärischen Temperatur ähnliche Ergebnisse auf. Es besteht im Wesentlichen kein signifikanter Unterschied zwischen den Proben. Lediglich einzelne Temperaturen sind bei einzelnen Proben geringer oder höher. Aber im Ganzen ergibt sich keine Abhängigkeit von der Temperatur und Reaktionszeit sowie ein Unterschied zum Eingangsmaterial. (Siehe *Abb. 33*)

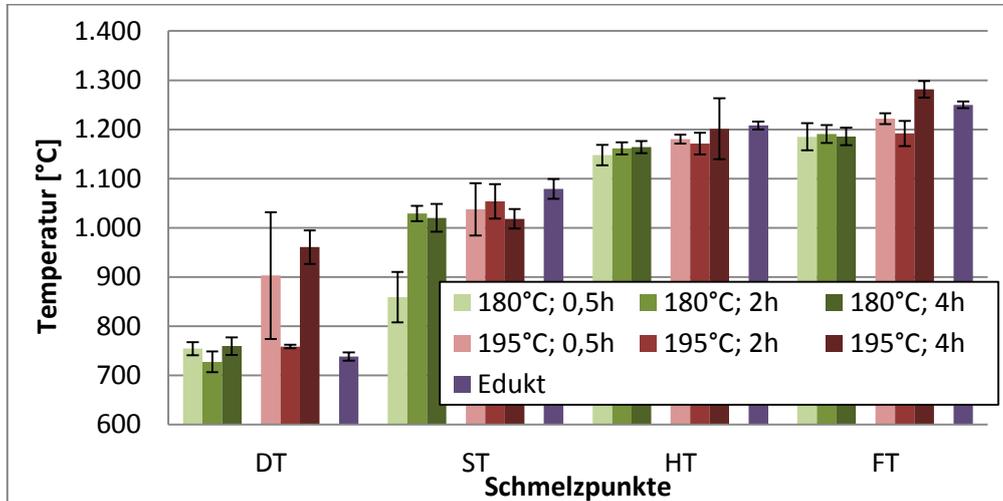


Abb. 33: Darstellung des Ascheschmelzverhaltens des carbonisierten Landschaftspflegematerials in Abhängigkeit von der Reaktionszeit und Temperatur

Im Folgenden wird näher auf die Zusammensetzung der anorganischen Komponenten der carbonisierten Heide eingegangen. Die Brennstoffaschen haben hinsichtlich des Verhaltens ihrer anorganischen Bestandteile bei Verbrennungs- und Vergasungsprozessen beträchtliche Unterschiede. Von besonderer Bedeutung sind hierbei die Menge der Asche sowie der Gehalt der enthaltenen Mineralien. Elemente wie Kalzium, Silizium und auch Magnesium erhöhen den Schmelzpunkt, wohingegen Kalium und Natrium diesen senken (15, 19, 20, 21, 22). Die Auswirkungen der Verbindungen sind in *Tabelle 38* zusammengestellt sowie der Einfluss auf die Verbrennungsführung, Emissionen und Ascheverwertung mittels Wirkkategorie dargestellt.

Tab. 38: Ascheverbindungen und ihr Einfluss auf die Verbrennungsführung (A), Emissionen (B) und Ascheverwertung (C) (19)

Verbindung	Wirkkategorie	Beschreibung der Auswirkungen
Al ₂ O ₃	A	Erhöht Ascheschmelzpunkt, Verschmutzung, Verschlackung
CaO	A	Verändert den Ascheschmelzpunkt, Hauptascheelement (Holz)
F	B	HF-Emissionen, N ₂ O-Emissionen
K ₂ O	A,B,C	Erniedrigt Ascheschmelzpunkt, KCl-Emission, Korrosion, Verschmutzung, Verschlackung durch Bildung von Alkalisilikaten, Hauptascheelement (Stroh)
MgO	A	Erhöht Ascheschmelzpunkt
Mn	C	Verwertbarkeit der Verbrennungsrückstände
Na ₂ O	A	Erniedrigt Ascheschmelzpunkt, Korrosion, Verschmutzung, Verschlackung durch Bildung von Alkalisilikaten
Pb	C	Verwertbarkeit der Verbrennungsrückstände, Emissionsgrenzwerte
SiO ₂	A	Erhöht Ascheschmelzpunkt, Verschmutzung, Verschlackung, Hauptaschebildungselement
V ₂ O ₅	C	Verwertbarkeit der Verbrennungsrückstände
Zn	C	Verwertbarkeit der Asche

K_2O , CaO und SiO_2 stellen die wesentlichen Elemente der Biokohleaschen dar. (Siehe *Tab. 39*) Weiterhin kann festgestellt werden, dass K_2O und CaO bei dem VTC-Prozess im Produkt angereichert und der Anteil an SiO_2 reduziert wird. Im Vergleich zu anderen Brennstoffen lässt sich feststellen, dass der Gehalt an SiO_2 in der carbonisierten Heide dem der Steinkohle nahe kommt. Aufgrund der Gehalte an Al_2O_3 , CaO und der hohen Gehalte an K_2O entspricht die Zusammensetzung der Asche der erhaltenen Biokohle eher einem Biobrennstoff als einer fossilen Kohle.

Tab. 39: Bestimmung der Aschezusammensetzung von behandelter und unbehandelter Heide nach dem Borataufschluss

Ma.-%	Edukt	Produkt	Braunkohle [19]	Steinkohle [19]	Fichte [19]	Stroh (20)
Al_2O_3	2,3	1,6	8,05	27,83	2,59	0,59
CaO	13,1	15,3	31,19	5,21	37,06	9,47
Fe_2O_3	0,91	1,1	5,03	9,93	6,73	1,17
K_2O	14,4	15,6	0,10	3,54	9,52	18,07
MgO	4,0	5,6	4,02	2,75	5,38	1,79
Na_2O	0,4	0,9	0,10	1,18	1,97	0,20
P_2O_5	3,4	4,5	0,00	0,49	3,42	2,25
SO_3	2,6	4,1	40,24	4,42	3,21	0,98
SiO_2	53,8	47,8	11,07	43,46	29,61	65,43

Die Carbonsierung führt zu einer geringfügigen Erhöhung der Elemente Calcium, Magnesium und Phosphor bei einer gleichzeitigen geringfügigen Reduktion von Aluminium, Silizium und Titan. Trotzdem ist die Aschezusammensetzung des Eduktes mit der des Produktes vergleichbar. (Siehe *Tab. 40*)

Wie schon beim Landschaftspflegematerial führt die Carbonisierung auch bei der Heide zu keiner wesentlichen Veränderung des Ascheschmelzverhaltens. (Siehe *Abb. 34*) Dies ist ebenfalls aufgrund der Ergebnisse der Aschezusammensetzung nicht verwunderlich. Lediglich die Schmelztemperatur des Produkts I ist gegenüber dem Edukt deutlich geringer. Bei den anderen Punkten bestehen auch Unterschiede, die aber aufgrund der Einfachbestimmung beim Produkt I nicht als relevant zu betrachten sind.

Tab. 40: Ergebnisse des Mikrowellendruckaufschlusses der unbehandelten und behandelten Asche der Heide

Parameter	Edukt		Produkt	
	Anteil wf [mg/kg TS]	Anteil an der Asche [%]	Anteil wf [mg/kg]	Anteil an der Asche [%]
Aluminium	440	2	260	1
Barium	68	0	63	0
Blei	2	0	3	0
Calcium	3.220	16	4.050	20
Chrom ges.	2	0	1	0
Kobalt	< 1	0	< 1	0
Eisen	260	1	260	1
Kalium	4.560	22	4.990	24
Kupfer	4	0	6	0
Magnesium	840	4	1.200	6
Mangan	720	4	760	4
Natrium	110	1	140	1
Nickel	3	0	4	0
Phosphor	530	3	710	3
Silizium	9.540	47	8.170	40
Strontium	22	0	20	0
Titan	97	0	37	0
Vanadium	< 1	0	< 1	0
Zink	18	0	28	0
Zirkon	2	0	< 1	0

Im Vergleich zu Braunkohle und den verschiedenen Steinkohlen weisen die Produkte aus der Carbonisierung bei einer Umsetzungstemperatur von 200 °C und 2 Stunden Reaktionszeit einen geringeren Kohlenstoffgehalt, höheren Sauerstoffgehalt, geringeren Anteil an flüchtigen Bestandteilen sowie einen geringeren Heizwert auf. (Siehe *Tab. 41*)

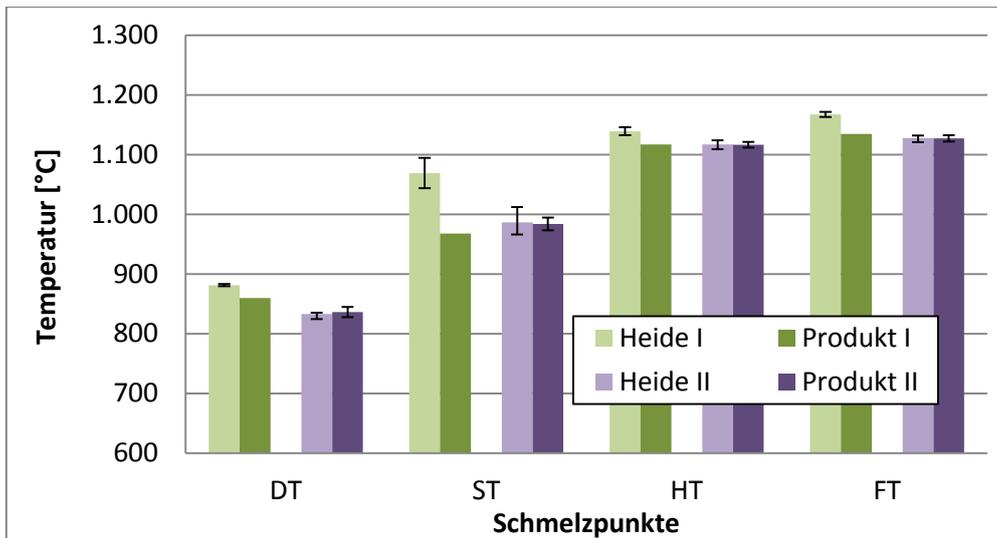


Abb. 34: Darstellung der Ergebnisse des Ascheschmelzverhaltens der carbonisierten Heide in Abhängigkeit von der Reaktionszeit und Temperatur; Produkt I wurde nur einfach analysiert

Tab. 41: Gegenüberstellung verschiedener wasser- und aschefreier Daten von Braun- und verschiedenen Steinkohlen mit denen von diversen carbonisierten Landschaftspflegematerialien (Tabelle mit Daten, ohne diejenigen für Inkohlung und Graphit, ent. aus (25) mit Erweiterung um eigene Daten)

Kohlenart	Kohlenstoff Gew.-%	Wasserstoff Gew.-%	Sauerstoff Gew.-%	Flüchtige Bestandteile [Gew.-%]	Heizwert [MJ/kg]
Braunkohle	65-75	8-5,5	30-12	60-43	25-28
Steinkohle					
Flammkohle	75-81	6,6-5,8	>9,8	45-40	<32
Gasflammkohle	81-85	5,8-5,6	9,8-7,3	40-35	33-34,2
Gaskohle	85-87,5	5,6-5,0	7,3-4,5	35-28	33,9-34,8
Fettkohle	87,5-89,5	5,0-4,5	4,5-3,2	28-19	34,5-35,6
Esskohle	89,5-90,5	4,5-4,0	3,2-2,8	19-14	35,2-35,6
Magerkohle	90,5-91,5	4,0-3,75	2,8-2,5	14-12	35,2-35,5
Anthrazit	>91,5	<3,75	<2,5	<12	35-35,3
<i>carbonisierte Materialien (Prozessparameter: 2h bei 200°C) aus:</i>					
Rohrkolben (AP2)	55,6	6,0	36,4	69	21,8
Binsen (AP2)	60,4	6,6	31,6	72	20,0
Landschaftspflege- material Mischung (2h bei 195°C) (AP 3)	55,8	6,0	36,6	70	22,4
Heide	58,6	6,5	33,7	71	23,4

9.2 Ergebnisse zur Herstellung von Briketts

Die Bindungsmechanismen innerhalb eines Briketts oder Pellets und damit die Stabilität dieser werden neben der Klebewirkung von Lignin durch Wasserstoffbrückenbindungen hervorgerufen (26). Hierdurch ergeben sich als wesentliche Parameter bei der Konfektionierung die Stückigkeit und der Wassergehalt. Um einen Pellet respektive Brikett herstellen zu können, benötigt man circa einen Wassergehalt von 10-15 %. Im Labor konnte der Wassergehalt relativ einfach durch die Nutzung eines Trockenschrankes gewährleistet werden. Im großtechnischen Bereich ist dies allerdings sehr kostenintensiv.

Die Briketts wurden mit einer Standpresse bei Einbringung von verschiedenen Kräften hergestellt. Die Haltezeit der Kraft betrug 5 s. Die Probe wurde vor dem Pressvorgang unterschiedlich vorbehandelt. So wurde zum einen ein Teil der Probe mittels Hammermühle und einem Siebeinsatz von 3mm Maschenweite auf eine Partikelgröße von unter 3 mm gemahlen. Zum anderen wurde Wasser in unterschiedlichen Mengen zur Probe gegeben. Die *Abbildungen 36-39* zeigen das Ausgangsmaterial und die daraus hergestellten Briketts sowie Pellets. Die Pellets aus carbonisiertem Material sind 2,5 cm lang. (Siehe *Abb. 39*) Im Vergleich dazu sind handelsübliche Holzpellets 2 bis 3,5 cm lang. (Siehe *Abb. 35*)



Abb. 35: Handelsübliche Holzpellets



Abb. 36: Unbehandelte carbonisierte Heide (roh, wf)



Abb. 38: Unbehandelte carbonisierte Heide (roh, wf) zum Brikett verpresst

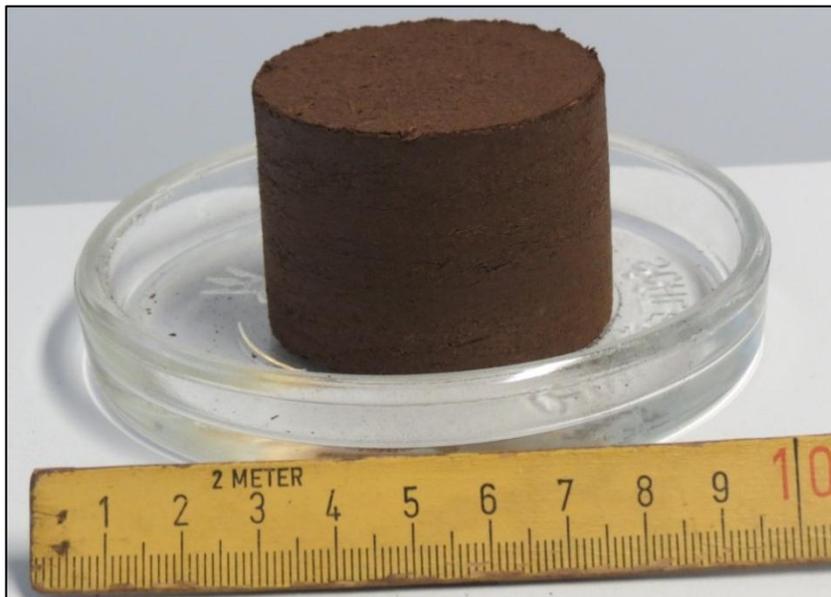


Abb. 37: Zum Brikett gepresste carbonisierte Heide, die vorab gemahlen und mit einem Sieb (3 mm Maschenweite) gesiebte wurde



Abb. 39: Zu Pellets gepresste carbonisierte Heide, die vorab gemahlen und mit einem Sieb (3 mm Maschenweite) gesiebte wurde

Durch die Erhöhung der Presskraft konnte bei allen Briketts die Partikeldichte gesteigert werden. (Siehe *Abb. 40*) Die Partikeldichte der trockenen, gemahlene und anschließenden gesiebten Heide sowie der rohen, trockenen Heide ist über den Pressdruck annähernd identisch. (Siehe *Abb. 40*) Insgesamt kann mit der nassen rohen Heide gegenüber den trockenen Varianten eine um wenigstens 90 kg/m^3 höhere Partikeldichte erzielt werden.

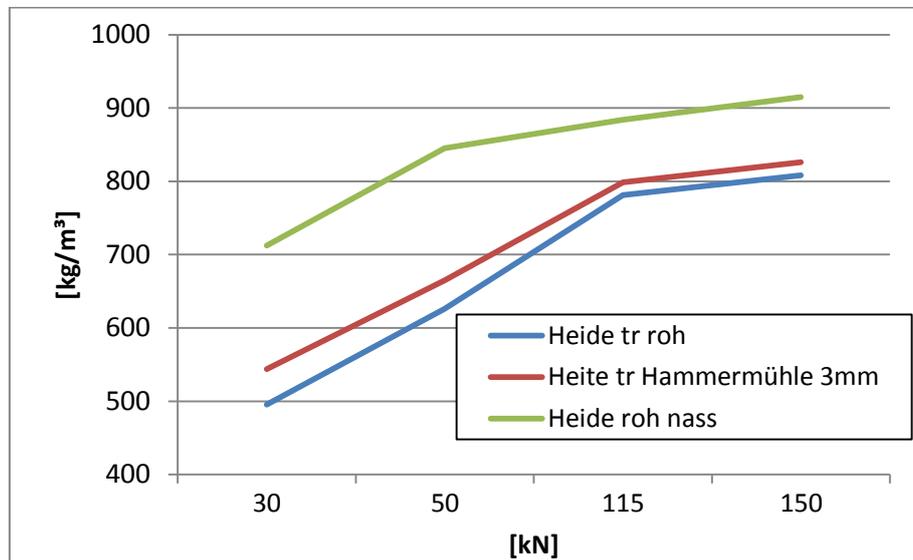


Abb. 40: Darstellung der Partikeldichte der Briketts in Abhängigkeit von der Presskraft

Mit den bei 150 kN hergestellten Briketts konnten Abriebfestigkeiten von 88 % realisiert werden. Die Abriebfestigkeit der trockenen, gemahlene und abgeseibten carbonisierten Heide ist am niedrigsten und betrug lediglich 84 %. Die Abriebfestigkeit von Briketts aus Holz und Braunkohle beträgt im Vergleich hierzu mehr als 91 % und im Mittel mehr als 97 %. (Siehe *Tab. 42*) Unbehandelte Holzpellets für den nicht industriellen Bereich muss die Abriebfestigkeit nach europäischer Norm wenigstens 97,5 % betragen. Die selbst hergestellten Briketts erreichen damit mit den hier verwendeten Herstellungsparametern nicht die Vorgaben.

Mit den selbst hergestellten Pellets aus carbonisierter Heide wurden Abriebfestigkeiten von bis zu 97 % erreicht. Die Grenzwerte werden damit noch nicht erreicht, erscheinen aber grundsätzlich nicht als unrealistisch. Hierbei werden mit den Pellets aus trockener carbonisierter Heide und derjenigen aus gemahlener, gesiebten und Wasserzugabe von 15 % die besseren Werte erreicht als mit dem Pellet aus aufbereitetem carbonisiertem Material und 10 % Wasserzugabe.

Der Aschegehalt ist im Vergleich zu den Briketts aus Braunkohle und Rinde zwar um wenigstens 1,7 % geringer, hält aber nicht die Vorgaben für Holzpellets für den nicht industriellen Bereich mit einem Grenzwert von max. 1,5 % für die Klasse A2 der EN 14961 ein. Der Grenzwert für Pellets der Klasse B wird dahingegen eingehalten. Pellets dieser Kategorie können aus chemisch behandeltem Industrie-Restholz und Gebrauchtholz bestehen. Die Werte aus *Tabelle 42* stammen aus Untersuchungen von (27) und ergeben, dass die auf dem Markt verfügbaren Briketts oft nicht die Grenzwerte einhalten.

Insgesamt ergibt sich, dass mit der carbonisierten Heide ein konkurrenzfähiger Pellet beziehungsweise ein Pellet für den nicht industriellen Bereich nach Vorgaben für Holzpellets hergestellt werden kann.

Tab. 42: Gegenüberstellung verschiedener brennstoffspezifischer Daten von Briketts und Pellets der carbonisierten Heide zu Holzbriketts und Holzpellets sowie Braunkohlebriketts; die Daten für den Vergleich der Briketts stammen aus (27) und sind mit * gekennzeichnet; die Holzpellets wurden gekauft; die Briketts wurden mit einer Presskraft von 150 kN hergestellt

	Abriebfestigkeit [%]	Wassergehalt [%]	Aschegehalt (wf) [%]	Heizwert (wf) [MJ/kg]
Briketts				
Heide (trocken)	88,1	0	2,3	23,4
Heide (trocken, Hammermühle mit Siebeinsatz 3mm)	84,5	0		
Heide (nass)	85,7	9		
Holzbriketts*	90,6 - 99,7 ($x_m=97,9$)	< 12	< 0,7	18,76
Rindenbriketts*		< 12	4 - 8,5	
Braunkohlebriketts, vermutlich aus dem Rheinland*	97,2	13	4,2	24,92
Pellets				
Holzpellets	98,7	n.a.	n.a.	n.a.
Heide (trocken)	95,4	0	2,3	23,4
Heide (+10% Wasser, Hammermühle mit Siebeinsatz 3mm)	77,0	9		
Heide (+15% Wasser, Hammermühle mit Siebeinsatz 3mm)	96,9	13		

9.3 Fazit energetische Bewertung

„Nachfolgenden ist eine grobe Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einer großtechnischen Carbonisierungsanlage auf der Grundlage des Patentes der Firma Revatec dargestellt. Die Anlage hat eine Verarbeitungskapazität von 40.000 t FS Grünschnitt. Es zeigt sich, dass insbesondere die Abwasserreinigung einen erheblichen Kostenfaktor bei den Betriebskosten darstellt und damit die spezifischen Kosten für den Absatz der Biokohle stark mitbestimmt. Die Kosten für die Akquise von entsprechenden Edukten sowie die Trocknung und ggf. die Brikettierung der Produkte sind in dieser Aufstellung nicht enthalten.“

Tab. 43: Investitions- und Betriebskosten einer Vapothermalen Carbonisierungsanlage bei einem Jahresdurchsatz von 40.000 t feuchtem Grünschnitt

Kostenstelle	Preis [TEUR bzw. TEUR/a]	Prozentualer Anteil [%]
Investitionskosten gesamt	7.500	100
• Abluftwäscher	200	2,7
• Biofilter		
• Abwasserreinigung	280	3,7
Betriebskosten gesamt	650	100
• Prozesswasser	183	28
• Abluftreinigung	10	1,5
Spezifische Biokohlekosten	177 EUR/t roh	

„ (23)

Es erscheint möglich, durch die Carbonisierung mit anschließender Trocknung und Konditionierung einen transportwürdigen und einsetzbaren Brennstoff herzustellen. Jedoch zeigt sich, dass die Produktionskette mit Gewinnung und Transport der Biomasse zur Carbonisierungsanlage, der Carbonisierung selbst, anschließender Trocknung und Brikettierung zu Stückkosten von weit über 177 EUR/t führen. Hiermit ist die Biokohle nicht konkurrenzfähig zu konventionellen Energieträgern. Auch die fehlende Förderung der Carbonisierungstechnologie bzw. der Produkte aus dieser verhindern die Entstehung derartiger Projekte.

Die Autoren sind der Ansicht, dass mit zentraler Carbonisierung und dezentraler Aufbereitung durch Brikettierung sowie vorgeschalteter Trocknung in Biomassheizkraftwerken die bestmögliche Vergütung nach aktuellem EEG generiert werden kann. Die Carbonisierungstechnologie kann dort Anwendung finden, wo nasse Biomassen in großen Mengen an zentralen Orten anfällt.

Eine dezentrale Carbonisierung mit anschließend dezentraler Nutzung der Kohle in Feuerungsanlagen, die nach der 1.BImSchV genehmigt sind, ist aufgrund der Gesetzgebung nicht möglich. Grund hierfür ist, dass in kleinen und mittleren Feuerungsanlagen nur diejenigen Brennstoffe eingesetzt werden dürfen, die explizit im Paragraph 3 der 1.BImSchV genannt sind. Darüber hinaus muss nachgewiesen werden, dass die Feuerungsanlage im Volllastbetrieb die Grenzwerte einhält. Derzeit ist weder Biokohle bzw. das Produkt aus der Carbonisierung in der Verordnung genannt, noch gibt es eine Feuerungsanlage für den Einsatz von carbonisierten Materialien.

10. Fazit des gesamten Projektes

In diesem Forschungsprojekt sollte durch die beteiligten Partner geprüft werden, ob es möglich ist, aus heimischer Biomasse vorrangig aus Landschaftspflegematerial ein Torfsubstitut für den Erwerbsgartenbau herzustellen. Hierfür fanden neben der vapo-thermalen Carbonisierung, die nicht wie die hydrothermale Carbonisierung im Wasserbad, sondern in einer Dampf-atmosphäre erfolgt, Auffaserungsversuche mit Landschaftspflegematerial statt. Weiterhin wurden Versuche zur Bewertung der energetischen Verwertung durchgeführt.

Gartenbaulich konnte keines der Edukte respektive der Konversionsverfahren überzeugen. So liegen die Nährstoffgehalte und/oder Gehalte an Spurenstoffen oberhalb der Grenzwerte oder sind auch die Ergebnisse der Biotests nicht vollständig positiv. Weiterhin erfolgt in jedem Fall eine Schimmelbildung und zum Teil eine Stickstoffimmobilisierung. All diese Punkte verhindern den praktischen gartenbaulichen Einsatz. Weitere Nachbahndlungsmethoden wie beispielsweise die Kompostierung des carbonisierten Materials oder auch des aufgefaseren wurde aus Kostengründen für die praktische Umsetzung ausgeschlossen.

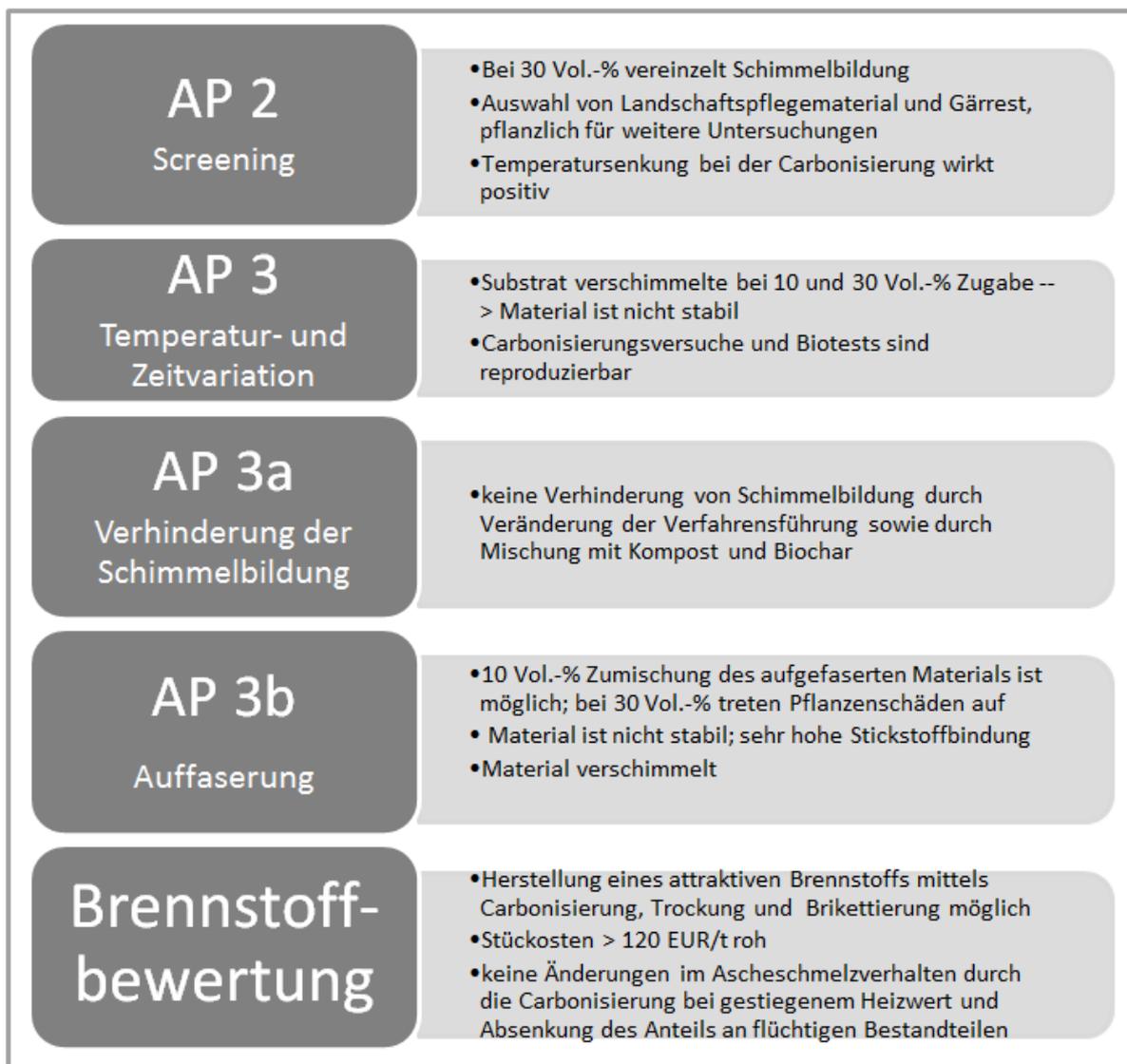


Abb. 41: Zusammenstellung der durchgeführten Arbeitspakete sowie deren zusammengefassten Ergebnisse

Eine Einsetzbarkeit im Torfkultursubstrat des carbonisierten Materials mit den in diesem Projekt gewählten Parametern kann ausgeschlossen werden. Weiterhin wurde gepüft, ob durch die Carbonisierung des Landschaftpflegmaterials ein hochwertiger biogener Brennstoff hergestellt werden kann. Es zeigte sich, dass die Carbonisierung mit ihren verfahrenstechnischen Anforderungen hierbei nicht überzeugt. Die Zentralität und Komplexität einer solchen Anlage mit den hieraus entstehenden Stückkosten ergeben, dass die Carbonisierung nicht der optimale Verwertungsweg für Landschaftpflegematerial ist.

In *Abbildung 41* sind die durchgeführten Arbeitspakete sowie die Erkenntnisse hieraus zusammengefasst.

Literaturverzeichnis

1. KAMMANN, Claudia, et al. *C-Sequestrierungspotential Und Eignung Von Torfersatzstoffen, Hergestellt Aus Produkten Der Landschaftspflege Und Biochar*. 2010.
2. WICHMANN, Sabine, et al. *Energiebiomasse Aus Niedermooren (ENIM)*. . WICHMANN, Sabine; and WICHTMANN, Wendelin eds., 2009.
3. STATISTISCHES BUNDESAMT, Wiesbaden. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 21.06.2011.
4. BERGIUS, F. *Die Anwendung Hoher Drücke Bei Chemischen Vorgängen Und Eine Nachbildung Des Entstehungsprozesses Der Steinkohle*. Halle an der Saale: W. Knapp, 1913.
5. BERGIUS, F. Beiträge Zur Theorie Der Kohleenstehung. *Die Naturwissenschaften*, 06.01.1928, 1928, no. 1.
6. BERGIUS, F. Neue Methode Zur Verarbeitung Von Mineralöl Und Kohle. *Angewandte Chemie*, 1921, vol. 34, no. 53. pp. 341-347.
7. BERGIUS, F. Chemical Reactions Under High Pressure. *Chemistry: 1922-1941*, 1966. pp. 244.
8. YAO, C., et al. Hydrothermal Dehydration of Aqueous Fructose Solutions in a Closed System. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2007, vol. 111, no. 42. pp. 15141-15145.
9. TITIRICI, M. M.; and ANTONIETTI, M. Chemistry and Materials Options of Sustainable Carbon Materials made by Hydrothermal Carbonization. *Chem.Soc.Rev.*, 2009, vol. 39, no. 1. pp. 103-116.
10. ANTONIETTI, M.; and TITIRICI, M. M. *Hydrothermal Carbonization of Biomasse: Black Carbons with Refined Structure without Charing*.
11. SEVILLA, M.; and FUERTES, AB. The Production of Carbon Materials by Hydrothermal Carbonization of Cellulose. *Carbon*, 2009, vol. 47, no. 9. pp. 2281-2289.
12. LIBRA, J. A., et al. Hydrothermal Carbonization of Biomass Residuals: A Comparative Review of the Chemistry, Processes and Applications of Wet and Dry Pyrolysis. *Biofuels*, 2011, vol. 2, no. 1. pp. 71-106.
13. THOSS, C. (. *Ökonomische Und Politische Rahmenbedingungen Für Landschaftspflegematerial*. FNR: 2.-3.11, 2009.
14. KALTSCHMITT, M., et al. *Energiegewinnung Aus Biomasse*. 2003.
15. OBERNBERGER, Ingwald. *Nutzung Fester Biomasse in Verbrennungsanlagen Unter Besonderer Berücksichtigung Des Verhaltens Aschebildender Elemente*. 3. korrigierte Auflage ed. Graz: dbv-Verl., 1998.
16. SCHUHMACHER, JP; HUNTJENS, FJand VAN KREVELEN, DW. Chemical Structure and Properties of Coal XXVI–studies on Artificial Coalification. *Fuel*, 1960, vol. 39. pp. 223-234.

17. BODE, H. Die Inkohlung Eine Druckverschmelzung?. *Angewandte Chemie*, 1932, vol. 45, no. 23. pp. 388-390.
18. BERL, E.; and SCHMIDT, A. Über Die Entstehung Der Kohlen. IV. Die Verschmelzung Der Künstlichen Kohlen. *Justus Liebigs Annalen Der Chemie*, 1932, vol. 493, no. 1. pp. 135-152.
19. VETTER, A.; and FÜR LANDWIRTSCHAFT, T. L. Qualitätsanforderungen an Halmgutartige Bioenergieträger Hinsichtlich Der Energetischen Verwertung. *Energetische Nutzung Von Stroh, Ganzpflanzengetreide Und Weiterer Halmgutartiger Biomasse. Stand Der Technik Und Perspektiven Für Den Ländlichen Raum. Gülzow: FNR. Gülzower Fachgespräche*, 2001, vol. 17. pp. 36-50.
20. SPLIETHOFF, H. *Verbrennung Fester Brennstoffe Zur Strom-Und Wärmezeugung: Verfahren Und Stand Der Technik-Wirkungsgrad, Betrieb, Emissionen Und Reststoffe*, 1999.
21. *Energie Aus Biomasse*. . Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) ed., 2002.
22. RADMACHER, Walter. Bestimmung Des Asche-Schmelzverhaltens Fester Brennstoffe. *Brennstoff-Chemie*, 1949, vol. 30, no. 21/22. pp. 377-412.
23. Schwark, et al. Hydrothermale Carbonisierung von Biomasse. Ergebnisse und Perspektiven. Christiane Grimm ed., 1st ed. Berlin: Erich Schmidt Verlag, 2013. *Charakterisierung Der Produktströme Und Deren Auswirkungen Auf Die Verfahrenstechnik*, pp. 69-82.
24. KALTSCHMITT, Martin; HARTMANN, Hansand HOFBAUER, Hermann. *Energie Aus Biomasse. Grundlagen, Techniken Und Verfahren*. . KALTSCHMITT, Martin; HARTMANN, Hansand HOFBAUER, Hermann eds., 2., neu bearbeitet und erweitert ed. Berlin Heidelberg [u.a.]: Springer, 2009.
25. RIEDEL, D. Kohle Ist Nicht Gleich Kohle.
26. Seabra da Rocha, S. H. Freitas. Beiträge zur DGMK-Fachbereichstagung "Konversion von Biomassen", 19.-21. März 2012 in Rotenburg a.d.Fulda (Autorenmanuskripte). ABRAHAM, Ralf ed., 1st ed. Hamburg: DGMK, 2012, 2012. *Verbesserung Der Mahlbarkeit Von Holzpellets Durch Torrefizierung*, pp. 229-236.
27. SCHÖN, C.; and HARTMANN, H. *Charakterisierung Von Holzbriketts. Brennstofftechnische, Physikalische Und Stoffliche Eigenschaften - Eine Marktstichprobe*. Technologie- und Förderzentrum (TFZ) im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe ed., Technologie- und Förderzentrum (TFZ), 2011.

Anhang A: Beurteilungskriterien der Biotests - Bonitur

Die Bewertung der Biotests erfolgt in Anlehnung an das Bewertungsschema im „Methodenhandbuch“ der VDLUFA.

Bonitur- note	Auswer- tungs- klasse	Kressetest				sonstige Biotests (Chinakohl, Salat und Kohlrabi)	
		Gasphase		Keimtest		Spross- ausbildung	Wurzel- ausbildung
		Spross- ausbildung	Wurzel- ausbildung	Spross- ausbildung	Wurzel- ausbildung		
1	Sehr schlecht	keine Keimung	keine Keimung	keine Keimung	keine Wurzeln am Glasboden	keine Keimung	keine Wurzeln an der Trayunterseite
2	schlecht	Keimung, aber keine Entwicklung vom Spross	sehr kleine Wurzeln	Keimung, aber keine Entwicklung vom Spross	Wurzelspitzen am Glasboden	Entwicklung der Keimblätter	Wurzelspitzen an der Trayunterseite
3	Mittel	Keimung und geringe Entwicklung von Pflanzenmasse	längere Wurzeln, die aber sehr dünn sind	Keimung und Entwicklung von Blättern, aber sehr niedriger Wuchs	längere Wurzeln am Glasboden, aber noch kein richtiges Wurzelgeflecht vorhanden	Entwicklung der Keimblätter und ein paar erste Laubblätter	längere Wurzeln an der Trayunterseite, aber noch kein richtiges Wurzelgeflecht vorhanden
4	Gut	gute Entwicklung der Pflanzenmasse, Blätter deutlich zu erkennen, insgesamt aber geringer als die Kontrolle, oder hellere Grünfärbung	etwas längere und starke Wurzeln	gutes Wachstum, aber deutlich kleiner als die Kontrolle	schwach ausgeprägtes Wurzelgeflecht am Glasboden mit kahlen Stellen	viele Laubblätter, aber deutlich schwächeres Wachstum (im Vergleich zur Kontrolle) oder leicht hellere Grünfärbung der Blätter	schwach ausgeprägtes Wurzelgeflecht an der Trayunterseite mit kahlen Stellen
5	Sehr gut	starkes Wachstum, sattgrüne Färbung der Blattmasse	lange und starke Wurzeln	starkes Wachstum	voll ausgeprägtes Wurzelgeflecht am Glasboden ohne kahle Stellen	viele Laubblätter, starkes Wachstum und sattgrüne Färbung der Blätter	voll ausgeprägtes Wurzelgeflecht an der Trayunterseite ohne kahle Stellen

Anhang B: Bewertungssystem

Die Bewertung des Frischgewichts im Vergleich zur Kontrolle zum Vergleich der verschiedenen Frischmasseerträge auf Basis von Punkten erfolgt nach dem Schema der nachfolgenden Tabelle.

Frischmasse im Vergleich zu Kontrolle [%]	Punkte [1]
≤ 10	0
$10 \leq 20$	1
$20 \leq 30$	2
$30 \leq 40$	3
$40 \leq 50$	4
$50 \leq 60$	5
$60 \leq 70$	6
$70 \leq 80$	7
$80 \leq 90$	8
$90 \leq 100$	9
> 100	10

Die Bewertung der Nährstoffe, Spurenelemente, Schwermetalle und des Mangan aktives erfolgt nach Punkten, wobei das Material, welches die Grenzwerte für Torf einhält zwei Punkte erhält und für Kompost einen Punkt.

Anhang C: substratspezifische Analysen

Die chemischen Analysen wurden im Wesentlichen nach der folgenden Tabelle analysiert. Im Arbeitspaket 3 wurde gegenüber dem Arbeitspaket 2 die Nährstoffe nicht mit der Methode für Torf, sondern mit der für Kompost ermittelt. (siehe *Tabelle*)

Analyseparameter	Methode
<i>Pures Material</i>	
pH-Wert	VDLUFA
Schwermetalle <ul style="list-style-type: none"> • Arsen • Cadmium • Chrom • Kupfer • Quecksilber • Nickel • Blei • Zink • Trockensubstanzbestimmung • Organische Trockensubstanzbestimmung 	Vorbehandlung mittels NEN 5751, Aufschluss mittels NEN 6465, für Quecksilber NEN 6439 <ul style="list-style-type: none"> • NEN 5760 • NEN 6458 • NEN 5767 und/oder NEN 5763 • NEN 5758 • NEN 5764 • NEN 5765 • NEN 5761 • NEN 5759 • NEN 5748 • NEN 5754
CaCO ₃	EN 12945:2002, Titrationsmethode
Mangan aktiv	RHP Methode 1999
Pflanzenverfügbare Nährstoffe Nach VDLUFA und nach RHP im Vergleich zu: Torf (Arbeitspaket 2) <ul style="list-style-type: none"> • EC, Haupt- und Spurenelemente in wässriger Lösung • Haupt- und Spurenelemente in BaCl₂ Kompost (folgende Arbeitspakete) <ul style="list-style-type: none"> • Haupt- und Spurenelemente in wässriger Lösung • Haupt- und Spurenelemente in CAT 	<ul style="list-style-type: none"> • PPO Methode 1999 1:1,5 Wasserextrakt • PPO Methode 1999 1:1,5 BaCl₂-Extrakt • DIN EN 13652:2001 1:5 Wasserextrakt • DIN EN 13651:2001 1:5 CAT-Extrakt
Sauerstoffzehrung	In Anlehnung an EN 16087
Stickstoffimmobilisierung	VDLUFA, A.13.5.1
<i>Hergestelltes Substrat / Mischung</i>	
Biotests mit Kresse, Salat, Chinakohl und Kohlrabi	In Anlehnung an das VDLUFA „Methodenhandbuch“
Physikalische Parameter	EN 13041

Beschreibung des Verpilzungstests:

Der Verpilzungstest wird als Kriterium zur Verpilzungsneigung herangezogen. Die Bestimmung erfolgt als Doppelbestimmung. Das zu prüfende Material wird in entsprechenden Volumenanteilen zwischen 100 und 0 % mit dem Kontrollsubstrat gemischt. 300 ml Probe werden in eine Glasschale gegeben. Die Glasschale hat einen inneren Durchmesser von 18 cm und eine innere Höhe von 4 cm. Die Probe wird so befeuchtet, dass die gesamte Probe feucht ist, sich aber kein Wasser unten am Boden sammelt. Abschließend wird die Glasschale mit einem Glasdeckel verschlossen. Die Proben werden dann über 21 Tage in einem Klimaschrank gelagert. Die Lagerung erfolgt bei 25°C und 9 Stunden Licht pro Tag. Eine spezielle Steuerung der Feuchte erfolgte nicht. Abschließend wird dokumentiert, ob die Proben verschimmelt sind oder nicht. Die Dokumentation erfolgt bildlich.

Anhang D: Brennstoffspezifische Analysen

Die in dem Bericht dargestellten Analyseparameter wurden nach DIN oder in Anlehnung an diese ermittelt. Genauere Informationen gibt die nachfolgende Tabelle:

Analyseparameter	Methode
<i>Pures Material</i>	
Wassergehalt	DIN EN 14774
Aschegehalt	DIN EN 14775
Aschezusammensetzung	Mikrowellendruckaufschluß nach DIN EN 15290/15297 Borataufschluß nach DIN EN 51729-1/-11
Ascheschmelzverhalten	DIN 51730
Brennwert	DIN 51900
Elementarzusammensetzung	Varios Macro Cube von Elementar
Flüchtige Bestandteile	DIN EN ISO 18123
<i>Hergestellte Pellets und Briketts</i>	
Abriebfestigkeit	In Anlehnung an DIN EN 15210-2, detailliertere Beschreibung siehe unten
Partikeldichte	CEN/TS 15 150, stereometrische Methode

Abriebfestigkeit

Zur Bestimmung der Abriebfestigkeit wurde uns der Aufbau der Firma Blackballs Technologies GmbH zur Verfügung gestellt. Ebenfalls wurden wir bei der Durchführung der Versuche unterstützt.

Die Abriebfestigkeit wurde mit einem Aufbau ähnlich dem der DIN EN 15 210-2 geprüft. Abweichend von der DIN beträgt der Durchmesser 250 mm sowie die Breite nur 150 mm anstatt je 598 mm. Darüber hinaus ist nicht ein Prallblech mit einer Tiefe von 200 mm vorhanden, sondern 4 mit einer Tiefe von 25 mm. (Siehe Abb. 42) Die Versuchsdauer betrug 15 Minuten anstatt 5 bei 25 Umdrehungen pro Minute anstatt 21. Aufgrund der geringeren Abmaße im Vergleich zur DIN wurden anstatt 2 kg Probe 100 g Probe zur Bestimmung der Abriebfestigkeit verwendet.

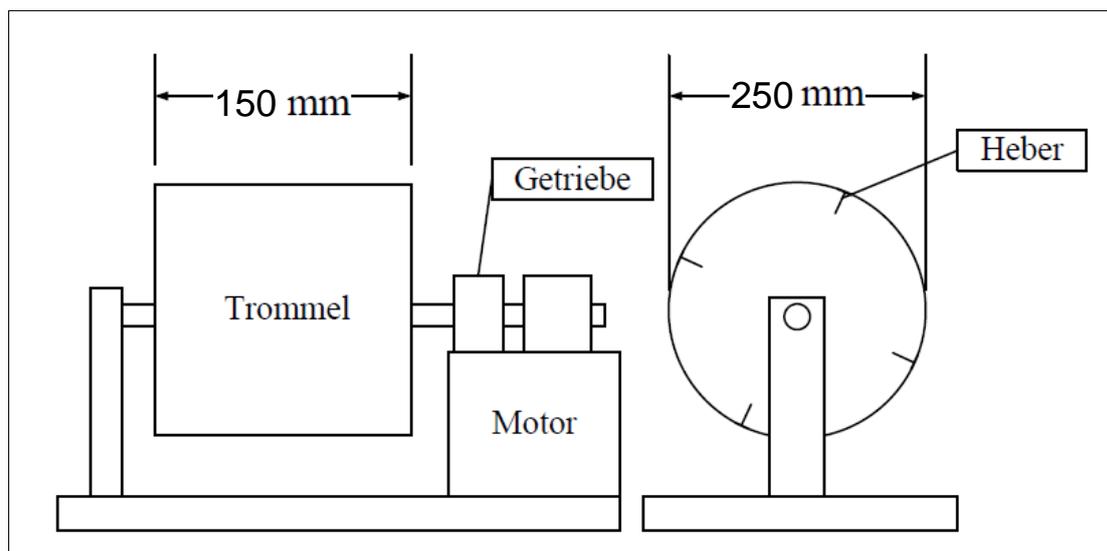


Abb. 41: Trommelaufbau zur Bestimmung der Abriebfestigkeit; Abbildung wurde aus (26) entnommen und um die Abmaße der verwendeten Anlage ergänzt

Analysenbericht

Parameter	Einheit	BG	Probenbezeichnung	131206-Produkt	
			Labornummer	113077692	
			Methode	anl	wf
Gesamtwasser	Ma.-%	0,1	DIN EN 14774-2	0,8	-
Aschegehalt 550°C	Ma.-%	0,1	DIN EN 14775	4,0	4,1
Schwefel, gesamt	Ma.-%	0,005	DIN EN 15289	0,101	0,102
Chlor, gesamt	Ma.-%	0,005	DIN EN 15289	0,032	0,032
Fluor gesamt	Ma.-%	0,001	analog DIN EN 15289	< 0,001	< 0,001

Bestimmung aus dem Mikrowellendruckaufschluß nach DIN EN 15290 / 15297

Element	Einheit	BG	Methode	anl	wf
Aluminium	mg/kg	10	DIN EN ISO 17294-2	-	260
Barium	mg/kg	2	DIN EN ISO 17294-2	-	63
Blei	mg/kg	2	DIN EN ISO 17294-2	-	3
Calcium	mg/kg	20	DIN EN ISO 17294-2	-	4050
Chrom gesamt	mg/kg	1	DIN EN ISO 17294-2	-	1
Cobalt	mg/kg	1	DIN EN ISO 17294-2	-	< 1
Eisen	mg/kg	5	analog DIN EN ISO 17294-2	-	260
Kalium	mg/kg	5	DIN EN ISO 17294-2	-	4990
Kupfer	mg/kg	1	DIN EN ISO 17294-2	-	6
Magnesium	mg/kg	30	DIN EN ISO 17294-2	-	1200
Mangan	mg/kg	1	DIN EN ISO 17294-2	-	760
Natrium	mg/kg	10	DIN EN ISO 17294-2	-	140
Nickel	mg/kg	1	DIN EN ISO 17294-2	-	4
Phosphor	mg/kg	10	DIN EN ISO 17294-2	-	710
Silicium	mg/kg	100	DIN EN ISO 17294-2	-	8170
Strontium	mg/kg	2	DIN EN ISO 17294-2	-	20
Titan	mg/kg	1	DIN EN ISO 17294-2	-	37
Vanadium	mg/kg	1	DIN EN ISO 17294-2	-	< 1
Zink	mg/kg	1	DIN EN ISO 17294-2	-	28
Zirkon	mg/kg	1	DIN EN ISO 17294-2	-	< 1

Bestimmung aus dem Borataufschluß der Asche 550°C nach DIN 51729-1/ -11 - bezogen auf die Asche

Element	Einheit	BG	Methode	anl	wf
Ba als BaO	Ma.-%	0,1	DIN EN ISO 11885	-	0,2
Silicium als SiO2	Ma.-%	0,1	DIN EN ISO 11885	-	47,8
Aluminium als Al2O3	Ma.-%	0,1	DIN EN ISO 11885	-	1,6
Eisen als Fe2O3	Ma.-%	0,1	DIN EN ISO 11885	-	1,1
Calcium als CaO	Ma.-%	0,1	DIN EN ISO 11885	-	15,3
Magnesium als MgO	Ma.-%	0,1	DIN EN ISO 11885	-	5,6
Phosphor als P2O5	Ma.-%	0,1	DIN EN ISO 11885	-	4,5
Natrium als Na2O	Ma.-%	0,1	DIN EN ISO 11885	-	0,9
Kalium als K2O	Ma.-%	0,1	DIN EN ISO 11885	-	15,6
Schwefel als SO3	Ma.-%	0,1	DIN EN ISO 11885	-	4,1
Chrom als CrO	Ma.-%	0,01	DIN EN ISO 11885	-	0,01
Kupfer als CuO	Ma.-%	0,01	DIN EN ISO 11885	-	0,03
Mangan als MnO	Ma.-%	0,1	DIN EN ISO 11885	-	2,5
Nickel als NiO	Ma.-%	0,01	DIN EN ISO 11885	-	0,01
Titan als TiO2	Ma.-%	0,1	DIN EN ISO 11885	-	0,1
Vanadium als V2O5	Ma.-%	0,01	DIN EN ISO 11885	-	< 0,01
Zink als ZnO	Ma.-%	0,01	DIN EN ISO 11885	-	0,1

Blei	Ma.-%	0,01	DIN EN ISO 11885	-	0,01
Cobalt	Ma.-%	0,01	DIN EN ISO 11885	-	< 0,01
Strontium	Ma.-%	0,01	DIN EN ISO 11885	-	0,05
Zirkon	Ma.-%	0,01	DIN EN ISO 11885	-	0,01

Parameter	Einheit	BG	Probenbezeichnung	131206-Produkt	
			Labornummer	113077692	
			Methode	anl	wf
Gesamtwasser	Ma.-%	0,1	DIN EN 14774-2	0,8	-
Aschegehalt 550°C	Ma.-%	0,1	DIN EN 14775	4,0	4,1
Schwefel, gesamt	Ma.-%	0,005	DIN EN 15289	0,101	0,102
Chlor, gesamt	Ma.-%	0,005	DIN EN 15289	0,032	0,032
Fluor gesamt	Ma.-%	0,001	analog DIN EN 15289	< 0,001	< 0,001

Bestimmung aus dem Mikrowellendruckaufschluß nach DIN EN 15290 / 15297

Aluminium	mg/kg	10	DIN EN ISO 17294-2	-	260
Barium	mg/kg	2	DIN EN ISO 17294-2	-	63
Blei	mg/kg	2	DIN EN ISO 17294-2	-	3
Calcium	mg/kg	20	DIN EN ISO 17294-2	-	4050
Chrom gesamt	mg/kg	1	DIN EN ISO 17294-2	-	1
Cobalt	mg/kg	1	DIN EN ISO 17294-2	-	< 1
Eisen	mg/kg	5	analog DIN EN ISO 17294-2	-	260
Kalium	mg/kg	5	DIN EN ISO 17294-2	-	4990
Kupfer	mg/kg	1	DIN EN ISO 17294-2	-	6
Magnesium	mg/kg	30	DIN EN ISO 17294-2	-	1200
Mangan	mg/kg	1	DIN EN ISO 17294-2	-	760
Natrium	mg/kg	10	DIN EN ISO 17294-2	-	140
Nickel	mg/kg	1	DIN EN ISO 17294-2	-	4
Phosphor	mg/kg	10	DIN EN ISO 17294-2	-	710
Silicium	mg/kg	100	DIN EN ISO 17294-2	-	8170
Strontium	mg/kg	2	DIN EN ISO 17294-2	-	20
Titan	mg/kg	1	DIN EN ISO 17294-2	-	37
Vanadium	mg/kg	1	DIN EN ISO 17294-2	-	< 1
Zink	mg/kg	1	DIN EN ISO 17294-2	-	28
Zirkon	mg/kg	1	DIN EN ISO 17294-2	-	< 1

Bestimmung aus dem Borataufschluß der Asche 550°C nach DIN 51729-1/ -11 - bezogen auf die Asche

Ba als BaO	Ma.-%	0,1	DIN EN ISO 11885	-	0,2
Silicium als SiO ₂	Ma.-%	0,1	DIN EN ISO 11885	-	47,8
Aluminium als Al ₂ O ₃	Ma.-%	0,1	DIN EN ISO 11885	-	1,6
Eisen als Fe ₂ O ₃	Ma.-%	0,1	DIN EN ISO 11885	-	1,1
Calcium als CaO	Ma.-%	0,1	DIN EN ISO 11885	-	15,3
Magnesium als MgO	Ma.-%	0,1	DIN EN ISO 11885	-	5,6
Phosphor als P ₂ O ₅	Ma.-%	0,1	DIN EN ISO 11885	-	4,5
Natrium als Na ₂ O	Ma.-%	0,1	DIN EN ISO 11885	-	0,9
Kalium als K ₂ O	Ma.-%	0,1	DIN EN ISO 11885	-	15,6
Schwefel als SO ₃	Ma.-%	0,1	DIN EN ISO 11885	-	4,1
Chrom als CrO	Ma.-%	0,01	DIN EN ISO 11885	-	0,01
Kupfer als CuO	Ma.-%	0,01	DIN EN ISO 11885	-	0,03
Mangan als MnO	Ma.-%	0,1	DIN EN ISO 11885	-	2,5
Nickel als NiO	Ma.-%	0,01	DIN EN ISO 11885	-	0,01
Titan als TiO ₂	Ma.-%	0,1	DIN EN ISO 11885	-	0,1
Vanadium als V ₂ O ₅	Ma.-%	0,01	DIN EN ISO 11885	-	< 0,01
Zink als ZnO	Ma.-%	0,01	DIN EN ISO 11885	-	0,1

Blei	Ma.-%	0,01	DIN EN ISO 11885	-	0,01
Cobalt	Ma.-%	0,01	DIN EN ISO 11885	-	< 0,01
Strontium	Ma.-%	0,01	DIN EN ISO 11885	-	0,05
Zirkon	Ma.-%	0,01	DIN EN ISO 11885	-	0,01