



Leibniz
Universität
Hannover

Entwicklung eines Prüfrasters für die Herstellung von Torfersatzstoffen mit hoher Kultursicherheit für den Erwerbsgartenbau

AZ 33061

-Abschlussbericht-

Oktober 2020

Katharina Leiber-Sauheitl, Heike Bohne & Jürgen Böttcher

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Fördermittelgeber

Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU)

An der Bornau 2

49090 Osnabrück

Fachbetreuung

Dr. Holger N. Wurl (DBU-Referat Umweltgerechte Landnutzung, Nachwachsende Rohstoffe)

Bewilligungsempfänger

Institut für Bodenkunde

Leibniz Universität Hannover

Herrenhäuser Str. 2

30419 Hannover

Projektleitung

Prof. Dr. Jürgen Böttcher

Email: boettcher@ifbk.uni-hannover.de

Projektbearbeitung

Dr. Katharina Leiber-Sauheitl

Email: leiber.sauheitl@ifbk.uni-hannover.de

Prof. Dr. Heike Bohne

Email: bohne@baum.uni-hannover.de

Hannover, den 07.10.2020

Inhalt

Zusammenfassung.....	1
1. Einleitung	2
1.1 Hintergrund	2
1.1.1 Ökologische Probleme des Torfeinsatzes im Erwerbsgartenbau	2
1.1.2 Ökonomische Aspekte: Verfügbarkeit von Torf und Torfersatzstoffen.....	2
1.1.3 Hindernisse für eine höhere Verwendung von Torfersatzstoffen in Kultursubstraten	3
1.2 Bedarf an einem Prüfraster	4
1.3 Projektziele und Projektinhalt	4
1.4 Prüfraster und Prüfkriterien	5
1.5 Projektablauf	6
1.6 Innovationen.....	7
1.7 Landschaftspflegematerial	7
1.8 Paludikultur – Möglichkeit einer nachhaltigen Nutzung von Moorstandorten	7
2. Material und Methoden.....	9
2.1 Verwendete Rohstoffe und Untersuchungsvarianten zur Entwicklung des Prüfrasters	9
2.1.1 Besenheide - <i>Calluna vulgaris</i>	9
2.1.2 Schwarzerle - <i>Alnus glutinosa</i>	9
2.1.3 Schilfrohr - <i>Phragmites australis</i>	10
2.1.4 Rohrkolben - <i>Typha latifolia</i> und <i>Typha angustifolia</i>	11
2.1.5 Fräsweißtorf	12
2.1.6 Untersuchungsvarianten in Phase 1 und Phase 2.....	12
2.2 Aufbereitung und Analyse der Rohstoffe und Mischungen.....	13
2.2.1 Analysen in Prüfkriterium I (PK I).....	13
2.2.2 Aufbereitung der Rohstoffe in Prüfkriterium II (PK II)	13
2.2.2.1 Aufbereitung des Heidematerials.....	13
2.2.2.2 Aufbereitung der Erle	14
2.2.2.3 Aufbereitung des <i>Typha</i> -Materials (1. Jahr) und von <i>Phragmites</i>	15
2.2.2.4 Aufbereitung des <i>Typha</i> -Materials (2. Jahr).....	15
2.2.3 Analysen in Prüfkriterium III (PK III).....	16
2.2.4 Analysen in Prüfkriterium IV (PK IV)	16
2.2.5 Analysen in Prüfkriterium V (PK V)	19
2.3 Statistische Analysen.....	20

3.	Prüfrasterentwurf im Test	21
3.1	Ergebnisse der Rohstoffanalysen	21
3.2	Aufbereitung der Rohstoffe	21
3.3	Ergebnisse der erweiterten Substratanalysen der aufbereiteten Rohstoffe	22
3.3.1	Basisparameter der aufbereiteten Rohstoffe	22
3.3.2	Maximale Wasserhaltekapazität, Wasser- und Lufthaushalt	23
3.4	Ergebnisse der Untersuchungen der Stabilität des C- und N- Haushaltes	25
3.4.1	N-Haushalt der potenziellen Substratausgangsstoffe.....	25
3.4.2	Wachstumstest.....	27
3.4.3	Abbaustabilität mittels CO ₂ -Inkubation	28
3.4.4	Wasser- und salzextrahierbare C- und N-Verbindungen	30
3.4.5	Lignin	32
3.4.6	Hemicellulose, Cellulose, (Roh-)Lignin	33
3.5	Zwischenfazit: Einstufung der Rohstoffe als Substratausgangsstoffe.....	35
3.6	Praxisversuche in verschiedenen Sparten des Gartenbaus	35
3.6.1	Praxisversuch im Gemüsebau	36
3.6.2	Praxisversuch im Zierpflanzenbau.....	37
3.6.3	Praxisversuch in der Baumschule.....	37
4.	Modifiziertes Prüfraster	39
4.1	Modifikationen zum ursprünglichen Prüfrasterentwurf	39
4.2	Prüfraster und Prüfkriterien	39
5.	Experimente zur Methodenentwicklung	41
5.1	Erweiterter Keimpflanzentest	41
5.2	Abbaustabilität mit Stabilisotopenmethode	42
5.2.1	Exkurs: Einsatz von Stabilisotopen in der Ökosystemforschung	42
5.2.2	Experiment zur Bestimmung der Abbaustabilität mit <i>Miscanthus giganteus</i> ...	43
5.2.3	Experiment zur Bestimmung der Abbaustabilität mit <i>Zea mays</i>	46
5.3	Kompostierung von <i>Typha</i> -Material.....	49
5.4	Einfluss der Lagerung von Erle, Heidekompost und <i>Typha</i>	52
6.	Öffentlichkeitsarbeit	55
7.	Literatur.....	57
	Anhang I: Zeitschriftenbeiträge.....	61
	Anhang II: Ergänzende Tabellen.....	63
	Anhang III: Programm der Abschlussveranstaltung.....	68

Zusammenfassung

Für die Herstellung von Kultursubstraten und Blumenerden werden in Deutschland jährlich ca. 8,5 Mio. m³ Torf verwendet; ca. 6,5 Mio. m³ kommen aus Niedersachsen. Mit dem Abbau des Rohstoffes Torf sind große ökologische Probleme verbunden: Treibhausgas-Emissionen, Landschaftswandel, Verlust der biologischen Vielfalt, Veränderung des Landschaftswasserhaushalts. Torfersatzstoffe wie z. B. Rindenhumus, Komposte, Holz- und Kokosfasern werden bislang nur in kleinen Anteilen als Zuschlagstoffe (insgesamt ca. 1 Mio. m³) zugesetzt, weil sie andere Eigenschaften als Torf aufweisen und somit ein finanzielles Kulturrisiko darstellen können. Außerdem stehen diese bislang nicht in ausreichenden Mengen zur Verfügung und können ebenfalls zu ökologischen Problemen (z. B. energieaufwändiger Transport von Kokosfasern) führen.

Hauptziel des Projektes war daher die Entwicklung eines Prüfrasters, mit dessen Hilfe neue Rohstoffe für Torfersatzstoffe ausgewiesen, potenzielle Kulturrisiken dieser Substratausgangsstoffe erkannt und Maßnahmen zur Kultursteuerung empfohlen werden können. Dieses Prüfraster wurde anhand von vier neuen inländischen Rohstoffen entwickelt (Heidekompost, Erle, Rohrkolben, Schilf). Bei der Wahl der zu untersuchenden Rohstoffe wurden neben der Berücksichtigung stofflicher Aspekte gezielt Synergien zwischen Klimaschutz, Naturschutz und Interessen der Landwirtschaft genutzt. Es handelte sich um Landschaftspflegematerial: Heidepflegematerial sowie Schnittgut aus wassergeprägten/ (wieder-) vernässten Naturschutzflächen. Das Prüfraster enthält umfangreiche stoffliche, technologische und pflanzenbauliche Kriterien, die eine Bewertung der Rohstoffe und der aufbereiteten Substratausgangsstoffe ermöglichen. Darüber hinaus wurden Experimente zur Bewertung der Abbaustabilität mittels Stabilisotopentechnik und erweiterte, standardisierte Wachstumstests entwickelt. Durch Versuche mit Kulturpflanzen aus unterschiedlichen Sparten des Erwerbsgartenbaus wurden die gewonnenen Ergebnisse in Praxisbetrieben weiter überprüft. So wurden die Anforderungen der Praxis bezüglich Kultursicherheit (Düngung, Bewässerung, Pflanzenkrankheiten, Kulturziel) berücksichtigt und die Akzeptanz neuer Torfersatzstoffe verbessert. Die neu- und weiterentwickelten Analysemethoden und die Ableitung pflanzenbaulicher Kriterien im Rahmen des Prüfrasters gehen über die Prüfung einzelner Torfersatzstoffe hinaus, indem sie ein generelles Werkzeug für die Eignungsprüfung potenzieller Torfersatzstoffe bereitstellen. Das Prüfraster hat daher den Vorteil, dass es unter veränderten Rahmenbedingungen (Rohstoffverfügbarkeit/-preise, Politik, Konsumverhalten) angewendet werden kann. Die Etablierung des Prüfrasters sowie der neuen Torfersatzstoffe in der Praxis wurde außer durch die eingebundenen Praxisbetriebe durch einen Projektbeirat, der Akteure entlang der Wertschöpfungskette einbezog, ermöglicht. Antragsteller und Projektpartner waren Mitglied in mehreren Arbeitskreisen des Niedersächsischen Torfersatzforums, in dem Projektergebnisse fortlaufend vorgestellt und diskutiert wurden. Das Prüfraster bietet mit seinen Prüfkriterien eine Struktur, mit der eine systematische und reproduzierbare Untersuchung potenzieller neuer Torfersatzstoffe beginnend bei den Rohstoffen möglich ist. Innerhalb von 2 Jahren war es möglich mit Hilfe des Prüfrasters und seiner Prüfkriterien neue Torfersatzstoffe zu identifizieren.

1. Einleitung

1.1 Hintergrund

1.1.1 Ökologische Probleme des Torfeinsatzes im Erwerbsgartenbau

Torf stellt sowohl im Erwerbsgartenbau als auch im Hobbygartenbau den wichtigsten Substratausgangsstoff dar. Die Menge des in Kultursubstraten und Blumenerden verarbeiteten Torfs beläuft sich in Deutschland auf eine Gesamtmenge von 8,5 Mio. m³ (Schmilewski, 2018). Neben den hervorragenden Eigenschaften von Torf als Substratausgangsstoff müssen bei der Bewertung seiner Nutzung einige ökologische Probleme im Zusammenhang mit Naturschutz und Klimaschutz in Betracht gezogen werden. Um aus den über Jahrhunderte gewachsenen Mooren Torf abbauen zu können, müssen diese Moorlandschaften drainiert werden, was sich negativ auf den Landschaftswasserhaushalt auswirkt. Die Wasserleitfähigkeit des Torfkörpers nimmt ab (Höper, 2007). Sackung, Torfmineralisation und Schrumpfung erhöhen die Lagerungsdichte. Moorsackung ist nur teilweise reversibel und von Materialeigenschaften und der Intensität der Belastung abhängig (Succow and Joosten, 2001). Auch die Schrumpfung ist nicht vollständig reversibel und bringt daher eine bleibende Verdichtung mit sich. Auf verdichteten Moorstandorten nimmt Staunässe zu. Entwässerte und verdichtete Moore mit verminderter Wasserleitfähigkeit können ihre ausgleichende Funktion im Landschaftswasserhaushalt nicht mehr wahrnehmen (Zollner and Cronauer, 2003). Durch den Verlust ihres Lebensraumes kommt es zu einem Rückgang moortypischer Tier- und Pflanzenarten (Ministerium für Landwirtschaft Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern, 2009).

Zudem stellen entwässerte Moore eine bedeutende Quelle für Treibhausgase dar und tragen somit zum Klimawandel bei. Während intakte Moore mit oberflächennahen Wasserständen CO₂ speichern, wird auf entwässerten Mooren in Abhängigkeit vom Grundwasserstand als Folge der allmählichen Mineralisierung des Torfkörpers CO₂ freigesetzt. Zusätzlich zu den bei der Vorentwässerung auftretenden CO₂-Freisetzungen kommen Emissionen während des Torfabbaus und der Lagerung sowie durch die beim Abbau eingesetzten Maschinen. Nach Höper (2007) haben die Nutzung der Torfe in gärtnerischen Substraten und die damit einhergehende Mineralisierung den größten Anteil an den mit dem Torfabbau verbundenen CO₂-Emissionen.

1.1.2 Ökonomische Aspekte: Verfügbarkeit von Torf und Torfersatzstoffen

Zusätzlich zu den ökologischen Problemen im Zusammenhang mit dem Torfabbau nimmt die Verfügbarkeit von Torf in Deutschland aus unterschiedlichen Gründen ab. Da erhebliche Vorbehalte gegenüber einem größeren Anteil an Torfersatzstoffen in Kultursubstraten bestehen und eine Erhöhung der importierten Menge an Torfen aus Natur- und Klimaschutzgründen nicht in Betracht kommt, sind Engpässe bei der Substratherstellung zu befürchten. Zudem treten bereits etablierte Torfersatzstoffe wie Rinden in eine Konkurrenz zur energetischen Nutzung. Eine Suche nach weiteren Rohstoffen ist daher nötig und muss auf neue Stoffgruppen wie z. B. in größeren Mengen anfallendes Landschaftspflegematerial und Anbaubiomasse von (wieder-)vernässten organischen Böden ausgedehnt werden.

Kapitel 1: Einleitung

1.1.3 Hindernisse für eine höhere Verwendung von Torfersatzstoffen in Kultursubstraten

Torf wird sowohl von der Seite der Substrathersteller als auch der gartenbaulichen Praxis noch immer als der wichtigste Substratausgangsstoff für die Herstellung von Kultursubstraten und Blumenerden angesehen, weil er in automatisierten Produktionsverfahren in Bezug auf die Kulturbedingungen gut und reproduzierbar zu steuern ist und somit ein geringes Kulturrisiko aufweist. Grund dafür sind die jahrzehntelangen Erfahrungen mit diesem Ausgangsstoff und seine chemischen, physikalischen und mikrobiologischen Eigenschaften. Hindernisse für eine höhere Verwendung von Torfersatzstoffen liegen in den Bereichen Kulturführung, der pflanzenbaulich und kulturtechnisch relevanten Charakterisierung von Torfersatzstoffen und der Herstellung von Substratausgangsstoffen.

Eine Änderungen in der Kulturführung ist oft notwendig, um ein mit Torf vergleichbares Wachstum zu erzielen (Bohne, 2007, 2004, 1996; D'Angelo et al., 1995; Wrede and Bohne, 1999), was oft in der Praxis nicht angenommen wird, da höhere Kosten entstehen. Diese Herausforderungen bestehen noch immer, so dass in der Praxis große Vorbehalte gegenüber einem Einsatz in größeren Mengenanteilen vorherrschen. Der Aufwand einer Umstellung der Kulturbedingungen und ein höheres Kulturrisiko könnten durch Beratung und höhere Preise für in torf reduzierten/-freien Substraten angebaute Produkte aufgefangen werden.

Im Rahmen der Gütesicherung (Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., Gütegemeinschaft Substrate für Pflanzen e.V.) werden mit standardisierten Methoden grundlegende qualitätsbestimmende Eigenschaften von Substratausgangsstoffen ermittelt. Sie stellen sicher, dass die Substratausgangsstoffe von den Erdenwerken in der gewünschten Qualität ausgeliefert werden. Bislang fehlt dabei die Charakterisierung des Wasser- und Lufthaushalts bei Auslieferung sowie der Abbaustabilität im Verlauf der Kulturführung. Diese Aspekte stellten bei der bisher dominierenden Verwendung von Torf nur vereinzelt ein Problem dar, sind aber insbesondere für Torfersatzstoffe, wegen der Unterschiedlichkeit verschiedener pflanzlicher Rohstoffe und Effekten bei Mischungen, eine große Herausforderung, um die Anpassungen bei der Kulturführung zu ermöglichen. Vor dem Hintergrund neuer potenzieller Rohstoffe für die Herstellung von Torfersatzstoffen mit einem großen Spektrum stofflicher Eigenschaften sind folglich weiter entwickelte analytische Methoden mit pflanzenbaulicher / kulturtechnischer Relevanz erforderlich, um mit Hilfe der Beratung die erforderliche Umstellung der Kulturführung zu ermöglichen. Daher ist es auch erforderlich neue Labormethoden zur Abbaustabilität in Topfversuchen mit Pflanzen in der Praxis zu evaluieren. Bislang blieb dies aus, weil sich am Ende der Kulturzeit das Kultursubstrat mechanisch nicht mehr von den Wurzeln trennen lässt.

Die Eigenschaften von potenziellen Torfersatzstoffen hängen neben ihrer stofflichen Zusammensetzung und Struktur von den technologischen Prozessen bei der Rohstoffaufbereitung zum Substratausgangsstoff ab. Bei den Herstellern sind entsprechende Technologien zwar vorhanden, müssen aber eventuell an neue Rohstoffe angepasst werden. Eine Charakterisierung der Rohstoffe nach zu definierenden stofflichen und technologischen Kriterien im Rahmen eines standardisierten Prüfrasters kann Fortschritte bei der Rohstoffaufbereitung zu Substratausgangsstoffen unterstützen.

Kapitel 1: Einleitung

1.2 Bedarf an einem Prüfraster

Bisher werden bei der Suche nach neuen Substratausgangsstoffen, die als Torfersatzstoff im Gartenbau verwendet werden können, zahlreiche pflanzenbauliche Experimente oft unter nicht vergleichbaren Voraussetzungen durchgeführt. Daher sind die Versuchsergebnisse nur schlecht miteinander zu vergleichen.

Ein Prüfraster ermöglicht ein standardisiertes Vorgehen bei der Suche nach neuen Torfersatzstoffen entlang der Wertschöpfungskette vom Rohstoff über einen möglichen Torfersatzstoff bis hin zum Substratausgangsstoff. Durch den Einsatz eines Entscheidungsbaumes auf der Basis wiederholbarer Untersuchungen werden die Ergebnisse zwischen verschiedenen Versuchsansätzen vergleichbar.

Wenn ein neuer Rohstoff das Prüfraster durchläuft, werden mögliche Kulturrisiken früh aufgezeigt, wodurch Maßnahmen für die Verminderung von Kulturrisiken geprüft und eventuell empfohlen werden können.

Des Weiteren lässt ein Prüfraster an verschiedenen Stellen Entscheidungen über das weitere Vorgehen mit möglichen Torfersatzstoffen zu. Hierdurch wird der Aufwand vermindert und Entscheidungen können frühzeitig getroffen werden.

1.3 Projektziele und Projektinhalt

Das DBU Projekt hatte als Hauptziel ein Prüfraster zu entwickeln, mit dessen Hilfe neue Rohstoffe als potenzielle Torfersatzstoffe für den Erwerbsgartenbau ausgewiesen, mögliche Kulturrisiken dieser potenziellen Substratausgangsstoffe erkannt und Maßnahmen zur Kultursteuerung empfohlen werden können. Die Ausweisung neuer Rohstoffe als potenzielle Torfersatzstoffe erfolgte nach im Projekt zu entwickelnden stofflichen, technologischen und pflanzenbaulichen Bewertungskriterien, den sog. Prüfkriterien. In Praxisversuchen sollten die Kultursicherheit der untersuchten Rohstoffe in Hinblick auf Düngung, Bewässerung, Pflanzenkrankheiten, Kulturziel bewertet werden. Zudem sollten im Rahmen dieses Projektes analytische Methoden (chemisch, physikalisch, mikrobiologisch) weiterentwickelt werden.

Das DBU Projekt arbeitete mit verschiedenen Firmen aus der Wirtschaft zusammen. Die Firma Brill Substrate aus Georgsdorf war Projektpartner und übernahm die Herstellung der Kultursubstrate und führte die Praxisversuche zusammen mit dem Institut für Bodenkunde durch. Die Firma Olde Bolhaar aus Bad Bentheim war Projektpartner und beschaffte die Rohstoffe (Heide und Erle) und bereitete diese auf. Die Beschaffung und Aufbereitung von Rohrkolben und Schilf erfolgte im ersten Jahr durch die Unternehmensberatung „Rohstoffe und Substrate“ aus Sankt Augustin. Im zweiten Jahr wurde der Rohrkolben durch die Firma „Wetland Products“ aus Bugewitz-Kamp geliefert und durch das Institut für Bodenkunde aufbereitet.

Im Projektantrag des DBU Projektes wurde die Untersuchung von drei Rohstoffen (Heidekompost, Erle, Schilf) beantragt und genehmigt. Zu Beginn des Projektes ergab sich die Möglichkeit einen vierten Stoff – Rohrkolben – zu untersuchen. Die Beschaffung und Aufbereitung dieses Stoffes wurde gefördert vom Niedersächsischen Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz im Rahmen des Teil-Projektes „Untersuchung der Eignung von *Typha* (Rohrkolben) als Torfersatzstoff im Erwerbsgartenbau“.

Kapitel 1: Einleitung

1.4 Prüfraster und Prüfkriterien

Der Prüfrasterentwurf für neue Rohstoffe, die als potenzielle Substratausgangsstoffe dienen können, setzt sich aus mehreren aufeinanderfolgenden Prüfkriterien zusammen, die nacheinander durchlaufen werden (siehe Abb. 1).

Eine detaillierte Zusammenstellung der verwendeten Methoden sowie deren Referenzen ist in Kapitel 2.2 „Aufbereitung und Analyse der Rohstoffe und Mischungen“ zu finden.

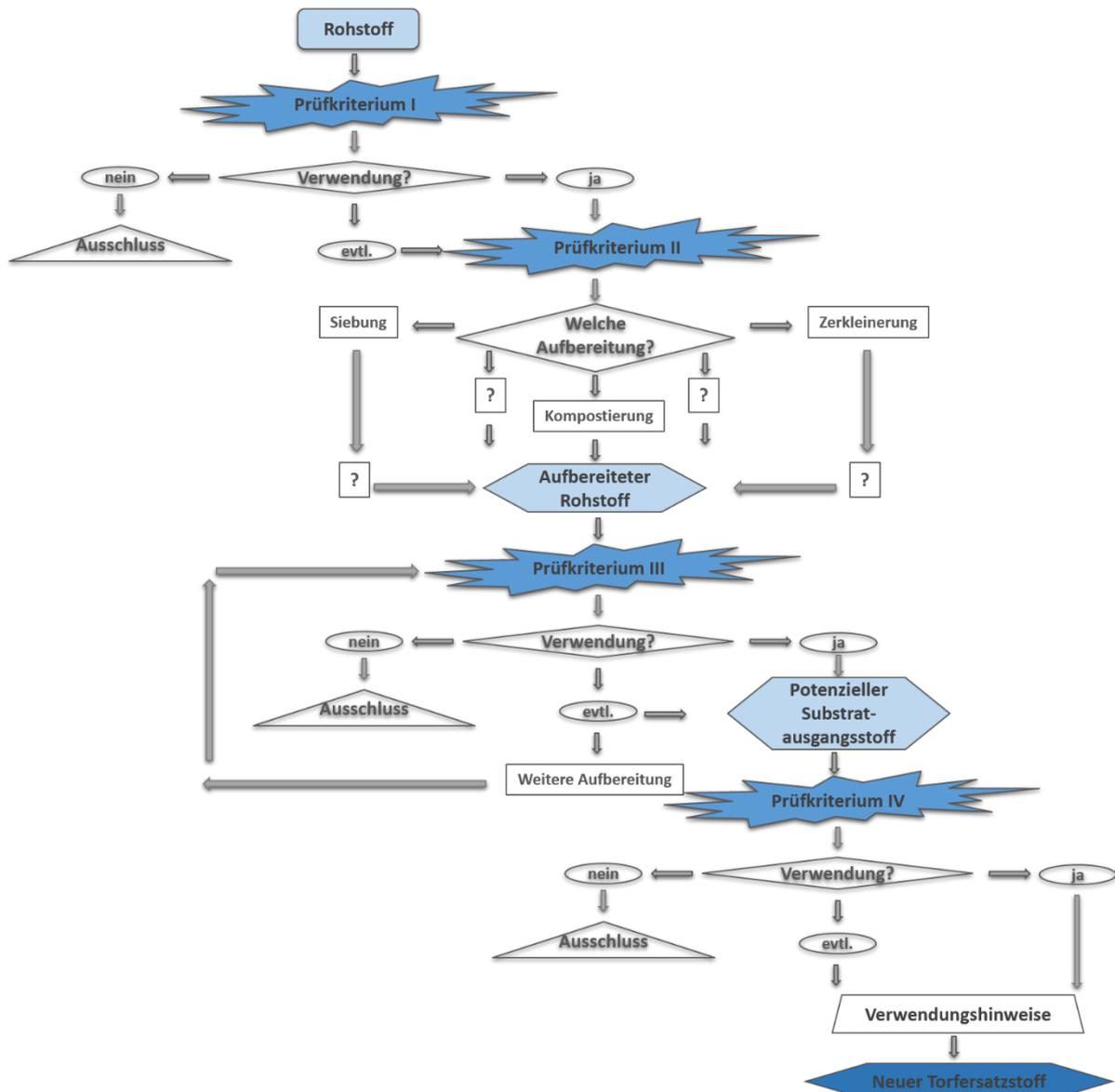


Abb. 1: Entwurf eines Prüfrasters für die Herstellung von Torfersatzstoffen mit hoher Kultursicherheit für den Erwerbsgartenbau

Das erste Prüfkriterium (PK I) beinhaltet stoffliche Analysen und einfache Substratuntersuchungen der nicht aufbereiteten Rohstoffe. Zu den stofflichen Analysen in PK I gehören die Bestimmungen des Nährstoffgehaltes (C/N-Verhältnis, P, K in der TS). Zu den einfachen Substratanalysen in PK I zählen die Bestimmungen der Rohdichte, der pH-Wert und der Salzgehalt. Zusätzlich können in PK I mögliche standortbedingte Schadstoffe der Rohstoffe z.B. Schwermetallgehalte und Herbizidrückstände bei Bedarf analysiert werden.

Kapitel 1: Einleitung

Weist der untersuchte Rohstoff keine Einschränkungen in Hinblick auf die Nutzbarkeit als Substratausgangsstoff auf, folgen in Prüfkriterium II (PK II) Untersuchungen zur Aufbereitung des Rohstoffs. In Abhängigkeit von den Eigenschaften des Rohstoffs kommen verschiedene Möglichkeiten der Aufbereitung infrage. Am Anfang der Untersuchungen stehen einfache Arten der Aufbereitung wie z.B. Sieben oder Häckseln. Liegen Voruntersuchungen des im Prüfraster zu testenden Rohstoffes vor, können aufwendigere Aufbereitungsmethoden eingesetzt werden wie z.B. Kompostieren.

Im nächsten Schritt werden in Prüfkriterium III (PK III) erweiterte Substratanalysen der aufbereiteten Rohstoffe zu chemischen und physikalischen Eigenschaften durchgeführt. Durch die Aufbereitung haben sich die Eigenschaften des Rohstoffs verändert. Daher werden erneut Substratanalysen zu chemischen Eigenschaften wie pH-Wert, Salzgehalt, Nährstoffgehalte (mineralischer N, K₂O, P₂O) durchgeführt. Ebenso werden nun die physikalischen Eigenschaften wie Rohdichte, Wasser- und Luftkapazität sowie die Partikelgrößenverteilung des Rohstoffs ermittelt. Um den Kalkbedarf des Rohstoffes für die nachfolgenden pflanzenbaulichen Untersuchungen bestimmen zu können, werden Pufferkurven erstellt. Liegen die aufbereiteten Rohstoffe als Kompost vor, erfolgt die Bestimmung des Reifegrades. Die Ergebnisse der einzelnen Untersuchungen werden mit den Qualitätskennwerten bekannter Substratausgangsstoffe verglichen.

Im nachfolgenden Prüfkriterium IV (PK IV) werden weitere, aufwendigere Substratuntersuchungen der potenziellen Substratausgangsstoffe durchgeführt wie Stabilitätstests und Untersuchungen zur C- und N-Dynamik. Tests zur Stabilität des N-Haushaltes, Wachstumstests unter standardisierten Bedingungen, CO₂-Inkubation zur kurz- und mittelfristigen C-Mineralisation (mit und ohne Zugabe von Kalk) sowie wasser- und salzextrahierbare C- und N-Verbindungen werden untersucht. Hier kommen nicht nur Standardmethoden zum Einsatz, sondern auch Methoden mit verbesserter pflanzenbaulicher Relevanz, um gezielte Verwendungshinweise geben zu können.

Die Prüfkriterien I bis IV werden innerhalb einer Vegetationsperiode oder eines Jahres mit derselben Charge des jeweiligen Rohstoffes durchgeführt (Phase 1). Im darauffolgenden Jahr (Phase 2) durchläuft eine neue Charge des Rohstoffes alle Schritte des Prüfrasters erneut. Wenn dieser Durchlauf erneut erfolgreich war, erfolgen Tests des neuen potenziellen Substratausgangsstoffes unter Praxisbedingungen unter Einbeziehung der Kulturhinweise, die aus den Prüfkriterien I bis IV abgeleitet wurden.

1.5 Projektablauf

Das DBU Projekt dauerte von September 2016 bis März 2020. Es war in zwei Projektphasen in zwei aufeinander folgenden Jahren gegliedert. In Phase 1 erfolgte die Beschaffung, Aufbereitung, Analyse und Beurteilung ausgewählter Rohstoffe sowie eine erste Beurteilung der potenziellen Torfersatzstoffe. In Phase 2 erfolgte eine erneute Beschaffung und Aufbereitung der in Phase 1 verwendeten, bzw. vorläufig für die weitere Prüfung als geeignet bewerteten Rohstoffen sowie die Analysen aus Phase 1. Zusätzlich wurden in Phase 2 Praxisversuche in drei Betrieben in den Sparten Gemüsebau, Zierpflanzenbau und Baumschule durchgeführt.

Kapitel 1: Einleitung

Während der gesamten Laufzeit wurde das Projekt von einem Beirat begleitet, dessen Mitglieder von Verbänden, Beratungsringen und Netzwerken aus verschiedenen Bereichen des Gartenbaus stammten, welche den Projektfortschritt beurteilten und Änderungswünsche einbringen konnten.

Am Ende des Projektes wurden die Ergebnisse der untersuchten Rohstoffe sowie das Prüfraster im Rahmen einer eintägigen Abschlussveranstaltung einem breiten Publikum aus Praxis, Forschung und politischen Entscheidungsträgern präsentiert.

1.6 Innovationen

In diesem DBU Projekt wurden Synergieeffekte zwischen Klimaschutz, Naturschutz sowie den Interessen des Gartenbaus und der Landwirtschaft genutzt (Abb. 2).

Die Entwicklung des Prüfrasters erfolgte mittels der Untersuchung vier inländischer Rohstoffe. Es wurde zum einen Material aus der Landschaftspflege verwendet, das regelmäßig anfällt und andernfalls kostenpflichtig entsorgt werden müsste. Zum anderen wurden Rohstoffe getestet, die als Anbaubiomasse auf nass bewirtschafteten bzw. wiedervernässten Moorstandorten kultiviert werden können. Durch eine Verringerung der Treibhausgasemissionen kann ein positiver Beitrag zum Klimaschutz geleistet werden.



Abb. 2: Darstellung der im Projekt genutzten Synergieeffekte

1.7 Landschaftspflegematerial

In Deutschland sind Heidelandschaften durch die anthropogene Nutzung als Weideland auf sauren und sandigen Podsolen entstanden, welche durch eine N- und P-Limiterung gekennzeichnet sind. Die Besenheide *Calluna vulgaris* aus der Familie der Heidekrautgewächse (*Ericaceae*) stellt eine weit verbreitete Art auf solchen Flächen dar. Um diese Landschaften zu erhalten, ist es notwendig mittels Pflegemaßnahmen den Heidebestand in bestimmten Zeiträumen zu verjüngen. Dies kann durch Beweidung, Schopern, Abbrennen oder durch Mahd geschehen. Das anfallende (Landschaftspflege-)Material wird teilweise als Biofiltermaterial oder Reetdachkomponente verwendet (Härdtle et al., 2009).

1.8 Paludikultur – Möglichkeit einer nachhaltigen Nutzung von Moorstandorten

Der im Gartenbau eingesetzte Torf stammt aus den sog. Moorböden (AG Boden, 2005). Diese gehören zu den organischen Böden entsprechend der Definition im deutschen Treibhausgasinventar und nehmen eine Fläche von 1,82 Mio. ha ein, was 5,1 % der Landesfläche von Deutschland entspricht. Organische Böden werden hauptsächlich als Grünland (53% bzw. 9691 km²), Acker (20% bzw. 3567 km²) sowie zur Forstwirtschaft (16% bzw. 2927 km²) genutzt (Tiemeyer et al., 2020). Der größte Teil dieser Flächen wurde für die Nutzung drainiert, was neben anderen negativen Veränderungen des Landschaftshaushaltes die Oxidation von Torf zur Folge hat, und somit stellen drainierte organische Böden eine große Quelle an Treibhausgasen dar (Joosten et al., 2012).

Kapitel 1: Einleitung

Paludikultur stellt eine Landnutzungsform dar, bei der Biomasse auf nassen und wiedervernässten Moorstandorten angebaut wird. Die Anbaubedingungen sollen durch die Verringerung des aeroben mikrobiellen Abbaus den Torfkörper erhalten und den Torfschwund verhindern sowie im Idealfall zu einer Torfneubildung führen. Durch die Nutzung als Paludikultur werden die Treibhausgasemissionen von Moorstandorten reduziert und eine nachhaltige landwirtschaftliche Nutzung von Moorflächen ermöglicht (Joosten et al., 2012).

Zu den Pflanzenarten, die in Paludikultur angebaut werden können, gehören zum einen halmgutartige Pflanzen wie Rohrglanzgras (*Phalaris arundinacea*), Gewöhnliches Schilf (*Phragmites australis*), Rohrkolben (*Typha spec.*) und Großseggen (*Carex spec.*). Die Spannweiten für die Erträge liegen in Mitteleuropa zwischen 3,5 und 22,5 t TM ha⁻¹ a⁻¹ für Rohrglanzgras, 3,0 bis 43,5 t TM ha⁻¹ a⁻¹ für Gemeines Schilf, 4,8 bis 22,1 t TM ha⁻¹ a⁻¹ für breitblättrigen Rohrkolben und 3,3 bis 14,9 t TM ha⁻¹ a⁻¹ für Großseggen (Timmermann, 2003). Zu den Gehölzen, die in Paludikultur angepflanzt werden können, zählen u.a. Schwarzerle (*Alnus glutinosa* L.) und Grauweide (*Salix cinerea* L.). Auf degradiertem, wiedervernässtem Moorgrünland mit hohen Nährstoffgehalten finden diese Pflanzenarten ideale Wachstumsbedingungen und liefern im Kurzumtrieb Erträgen von 4 bis 10 t TM ha⁻¹ a⁻¹ (Schäfer and Joosten, 2005).

In Deutschland wird aufgrund schwieriger gesetzlicher Vorgaben der Anbau von Pflanzen als Paludikultur nur in einzelnen Projekten testweise durchgeführt. Für eine Ausweitung der Paludikulturflächen müssen zunächst die gesetzlichen Rahmenbedingungen angepasst werden.

2. Material und Methoden

2.1 Verwendete Rohstoffe und Untersuchungsvarianten zur Entwicklung des Prüfrasters

Zur Entwicklung des Prüfrasters für neue Torfersatzstoffe für den Erwerbsgartenbau wurden vier verschiedene Rohstoffpflanzen verwendet, die entweder als Landschaftspflegematerial anfallen oder in Paludikultur auf wiedervernässten Moorstandorten angebaut werden können. Die Kontrollvariante bestand aus Weißtorf.

2.1.1 Besenheide - *Calluna vulgaris*

Die Besenheide stammte in beiden Untersuchungsjahren vom Truppenübungsplatz Nordhorn nahe der niederländischen Grenze (siehe Abb. 3). Die Mahd erfolgte nach der Blüte im Herbst 2016 bzw. vor der Blüte im Sommer 2017. Anschließend wurde das Pflanzenmaterial kleingehackt und für mehrere Monate bis in den Frühling 2017 bzw. 2018 bei der Firma Olde Bolhaar kompostiert. Während des Kompostierungsprozesses wurden die Mieten gewendet und die Temperaturen überwacht. Nach Abschluss der Kompostierung wurde der Fertigkompost gesiebt (siehe Abb. 4).



Abb. 3: Heidefläche im TUP Nordhorn
(© Leiber-Sauheitl)



Abb. 4: Kompostiertes Heidematerial
(© Leiber-Sauheitl)

2.1.2 Schwarzerle - *Alnus glutinosa*

Nasse, nährstoffreiche Niedermoore sind der natürliche Lebensraum von Schwarzerlen, wodurch sie optimal für einen Anbau in Paludikultur geeignet sind. Die Torfakkumulation ist bei mittleren jährlichen Wasserständen von 0-20 cm unter Flur am höchsten, wobei länger anhaltende höhere Wasserstände das Wachstum negativ beeinflussen. Zur Wertholzproduktion sind bei 20- bis 40-jähriger Umtriebszeit Erträge von ca. 5,5 t TM ha⁻¹ a⁻¹ beobachtet worden (Wichtmann et al., 2016). Im Kurzumtrieb sind schätzungsweise 4-10 t TM ha⁻¹ a⁻¹ möglich bei einer Nutzung alle 5 – 60 a (Schäfer and Joosten, 2005). Ein Nachteil für die Ernte von Gehölzen an nassen Standorten ist der notwendige Einsatz schweren Geräts, auf Grund der geringen Tragfähigkeit der Böden (Wichtmann et al., 2016).

Kapitel 2: Material und Methoden

Die im Projekt eingesetzte Schwarzerle stammte aus der Region um Bad Bentheim nahe der niederländischen Grenze. Zum Zeitpunkt der Ernte im Januar 2017 bzw. März 2018 waren die Bäume ca. 5 Jahre alt. Äste und Stämme der Schwarzerle wurden mit Rinde gehäckselt und gesiebt (siehe Abb. 5 und Abb. 6).



Abb. 5: Beispiel einer Erlenanpflanzung auf einem wiedervernässten Niedermoor im Trebeltal (© Wichtmann et al., 2016)



Abb. 6: Schwarzerle, gehäckselt (© Leiber-Sauheitl)

2.1.3 Schilfrohr - *Phragmites australis*

Das Gemeine Schilf (*Phragmites australis*) ist weltweit an feuchten Standorten wie z.B. See- bzw. Flussufern oder Mooren verbreitet. Je nach Standortbedingungen bildet es 4 m hohe Halme und wegen seiner Konkurrenzstärke oft artenreine Röhrichtbestände. Schilf ist ein Torfbildner und tolerant gegenüber hohen und fluktuierenden Wasserständen (Wichtmann et al., 2016). Der mittlere Ertrag liegt bei ca. $8 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Wichtmann and Wichmann, 2011), wobei eine Ernte erstmals drei Jahre nach Bestandesetablierung erfolgen kann. Zum Erhalt der Schilfbestände sollte eine Wintermahd durchgeführt werden (Wichtmann et al., 2016).

Das im ersten Untersuchungsjahr getestete Schilfrohr stammte von Flächen der tidenbeeinflussten Seitengewässer des Naturschutzgebiets „Untere Wümme“ nördlich von Bremen. Die Ernte erfolgte im Februar 2017. Im Anschluss an die Ernte wurde das Material getrocknet, gehäckselt und gesiebt (siehe Abb. 7 und Abb. 8).



Abb. 7: Beispiel für einen Schilfrohrbestand zwei Jahre nach Pflanzung (© Wichtmann et al., 2016)



Abb. 8: Schilfrohr, gehäckselt (© Leiber-Sauheitl)

2.1.4 Rohrkolben - *Typha latifolia* und *Typha angustifolia*

Rohrkolben wie *Typha latifolia* L. oder *Typha angustifolia* L. sind in nährstoffreichen Gewässern und Feuchtgebieten Mitteleuropas weit verbreitete Wasser- und Sumpfpflanzen mit tiefreichenden Wurzelstöcken. Landschaftlich charakteristisch sind die bis zu 3 m hohen Pflanzen mit steif aufwachsenden Blättern, die durch ihr Aerenchymgewebe hohe Wasserstände tolerieren können. Ein weiteres typisches Merkmal der Pflanze ist der weibliche Teilblütenstand (Kolben, siehe Abb. 10). Eine Torfbildung der Rohrkolben ist nicht bekannt, es kann jedoch eine torferhaltende Funktion der Rohrkolbenkultivierung angenommen werden. Nach Wiedervernässung nährstoffreicher Niedermoore kann sich der Rohrkolbenbestand durch windverbreitete Samen oder auch vegetativ über Rhizome etablieren (siehe Abb. 9). Die Anpflanzung von Setzlingen führt zur sichersten Bestandesetablierung, sie ist jedoch sehr aufwendig und somit kostenintensiv. Die Ernte erfolgt im Winter und kann jährlich gleichbleibende Erträge liefern, die abhängig sind von Nährstoffgehalten und Wasserständen des Standorts (Dahms et al., 2017; Wichtmann et al., 2016).

Im ersten Untersuchungsjahr wurde *Typha angustifolia* aus dem Donaudelta in Rumänien verwendet, da Material aus Deutschland nicht verfügbar war. Die Halme wurden im Januar 2017 ohne die Samenstände geerntet und anschließend getrocknet. Danach wurde der getrocknete Rohrkolben gehäckselt und gesiebt (siehe Abb. 11). Im zweiten Untersuchungsjahr musste aufgrund von Beschaffungsschwierigkeiten eine andere *Typha*-Art (*Typha latifolia*) verwendet werden. Dieses *Typha*-Material stammte aus Anklam an der Peenemündung im Nordosten von Mecklenburg-Vorpommern. Das Rohrkolbenmaterial wurde nach der Anlieferung getrocknet und die Samenstände grob aussortiert. Anschließend wurde der getrocknete Rohrkolben gehäckselt und gesiebt (siehe Abb. 12).



Abb. 9: Beispiel einer Rohrkolbenanpflanzung im Donaumoos, Bayern (© Wichtmann et al., 2016)



Abb. 10: Rohrkolben mit Samenständen (© Wikipedia)



Abb. 11: *Typha angustifolia*, gehäckselt (1.Jahr)



Abb. 12: *Typha latifolia*, gehäckselt (2.Jahr)

2.1.5 Fräsweißtorf

In beiden Untersuchungsjahren wurde Fräsweißtorf der Firma Brill Substrate aus dem Baltikum als Kontrolle und Mischkomponente verwendet.

2.1.6 Untersuchungsvarianten in Phase 1 und Phase 2

Die verschiedenen Rohstoffe durchlaufen den Prüfrasterentwurf, um ihn für seine Eignung zur Ausweisung möglicher neuer Substratausgangsstoffe zu testen. In Phase 1 wurden folgende vier Rohstoffe untersucht: Heidekompost, Erle gehäckselt, Rohrkolben gehäckselt und Schilfrohr gehäckselt sowie Fräsweißtorf als Kontrolle. In Phase 1 wurde jeder Rohstoff in einer 100 % Variante und in einer Mischung 50 % neuer Rohstoff und 50 % Fräsweißtorf untersucht. Folgende Versuchsvarianten wurden in Phase 1 getestet (siehe Tab. 1).

Tab. 1: Übersicht der untersuchten Varianten in Phase 1 (2017)

Variante	Komponente I	Komponente II	Abkürzung
Torf 100	100 % Frästorf	-	To 100
Heide 100	100 % Heidekompost	-	Cal 100
Heide 50	50 % Heidekompost	50 % Fräsweißtorf	Cal 50
Erle 100	100 % Erle	-	Al 100
Erle 50	50 % Erle	50 % Fräsweißtorf	Al 50
Typha 100	100 % Typha	-	Ty 100
Typha 50	50 % Typha	50 % Fräsweißtorf	Ty 50
Phragmites 100	100 % Phragmites	-	Ph 100
Phragmites 50	50 % Phragmites	50 % Fräsweißtorf	Ph 50

Unter Einbeziehung der Ergebnisse aus Phase 1 wurden die Varianten in Phase 2 modifiziert und angepasst sowie auch Rohstoffe von der weiteren Analyse ausgeschlossen (siehe Tab. 2).

Tab. 2: Übersicht der untersuchten Varianten in Phase 2 (2018)

Variante	Komponente I	Komponente II	Abkürzung
Torf 100	100 % Frästorf	-	To 100
Heide 100	100 % Heidekompost	-	Cal 100
Heide 50	50 % Heidekompost	50 % Fräsweißtorf	Cal 50
Erle 50	50 % Erle	50 % Fräsweißtorf	Al 50
Erle 25	25 % Erle	75 % Fräsweißtorf	Al 25
Typha 50	50 % Typha	50 % Fräsweißtorf	Ty 50
Typha 25	25 % Typha	75 % Fräsweißtorf	Ty 25

2.2 Aufbereitung und Analyse der Rohstoffe und Mischungen

2.2.1 Analysen in Prüfkriterium I (PK I)

Am Beginn der Untersuchungen im Prüfraster stehen Pflanzenanalysen der Rohstoffe und erste einfache Substratanalysen. In PK I wurden zur Analyse der Rohstoffe folgende Methoden verwendet. Die Rohdichte jeder Variante wurden nach VDLUFA (1997a) bestimmt. Der pH-Wert wurde in CaCl_2 gemessen (VDLUFA, 2016a) und der Salzgehalt in destilliertem Wasser (VDLUFA, 1991). Die Nährstoffgehalte der Rohstoffe (N, P, K i. d. TS) wurden bestimmt. N i. d. TS wurde durch oxidative Verbrennung der gemahlene Probe an einem Elementaranalysator (vario EL III, Elementar) mit einer simultanen Bestimmung des C/N-Verhältnisses gemessen. Für die Bestimmung von P und K i. d. TS wurden 0.1 g Trockensubstanz jedes Rohstoffes bei 480°C über Nacht verascht. Anschließend wurde die Asche in 0.5 M HCl überführt. P i. d. TS wurde bei 470 nm an einem UV VIS Spektrometer (SpectrostarNano, BMGLabtech) und K in CsCl bei 767 nm an einem AAS gemessen. Die maximale Wasserhaltekapazität (WK_{\max}) wurde nach VDLUFA (2002) bestimmt.

2.2.2 Aufbereitung der Rohstoffe in Prüfkriterium II (PK II)

In Prüfkriterium II wurde die Aufbereitung der Rohstoffe untersucht. Mit Unterstützung der Firma Brill Substrate mit Kompetenzen in der Mischung von Substraten für den Erwerbsgartenbau und der Firma Olde Bolhaar mit Kompetenz in der Durchführung von Kompostierung u.a. zur Verwendung als Substratkomposte wurde die Aufbereitung der Rohstoffe Heide und Erle durchgeführt. Die Aufbereitung von *Typha* und *Phragmites* im ersten Untersuchungsjahr erfolgte durch die Unternehmensberatung „Rohstoffe und Substrate“. Im zweiten Untersuchungsjahr wurde die Aufbereitung des *Typha*-Materials durch das Institut für Bodenkunde der Leibniz Universität Hannover durchgeführt.

Die aufbereiteten Rohstoffe Heidekompost, Erle und Fräsweißtorf wurden bis zu den Analysen bei 4°C gelagert. *Typha* und *Phragmites* wurden bei Raumtemperatur trocken gelagert.

2.2.2.1 Aufbereitung des Heidematerials

Nach der Mahd wurde das Heidematerial zerkleinert und unter ständiger Kontrolle für mehrere Monate kompostiert (siehe auch Kapitel 2.1.1). Nach Beendigung der Kompostierung wurde der Fertigkompost auf kleiner 9 mm gesiebt (siehe Abb. 13). Obwohl es sich bei Heide

Kapitel 2: Material und Methoden

um einen neuen Rohstoff zur Kompostierung handelte, lief die Kompostierung ohne Verzögerungen oder Vorkommnisse ab.



Abb. 13: Ablauf der Aufbereitung des Heidematerials (alle Fotos © André Nyhoegen, Olde Bolhaar)

2.2.2.2 Aufbereitung der Erle

Äste und Stämme der Schwarzerle wurden mit Rinde gehäckselt (siehe auch Kapitel 2.1.2). und auf kleiner 9 mm gesiebt (siehe Abb. 14).



Abb. 14: Ablauf der Aufbereitung des Erlenmaterials (alle Fotos © André Nyhoegen, Olde Bolhaar)

Kapitel 2: Material und Methoden

2.2.2.3 Aufbereitung des *Typha*-Materials (1. Jahr) und von *Phragmites*

Im ersten Untersuchungsjahr wurden *Typha angustifolia* und *Phragmites australis* verwendet (siehe auch Kapitel 2.1.3 und 2.1.4). Nach der Trocknung wurden die beiden Rohstoffe gehäckselt und auf 3 bis 6 mm gesiebt (siehe Abb. 15).



Abb. 15: Ablauf der Aufbereitung des *Typha*- und *Phragmites*-Materials im ersten Jahr (alle Fotos © R. Lindner)

2.2.2.4 Aufbereitung des *Typha*-Materials (2. Jahr)

Im zweiten Untersuchungsjahr wurde *Typha latifolia* verwendet (siehe auch Kapitel 2.1.4). Das Rohrohrkolbenmaterial wurde nach der Anlieferung getrocknet und die Samenstände grob aussortiert. Anschließend wurde das getrocknete *Typha*-Material gehäckselt und kleiner 10 mm gesiebt (siehe Abb. 16).



Abb. 16: Ablauf der Aufbereitung des *Typha*-Materials im zweiten Jahr (alle Fotos © Leiber-Sauheitl)

Kapitel 2: Material und Methoden

2.2.3 Analysen in Prüfkriterium III (PK III)

In PK III wurden zur Analyse der aufbereiteten Rohstoffe die Rohdichte (VDLUFA, 1997a), der pH-Wert in CaCl_2 (VDLUFA, 2016a) und der Salzgehalt (VDLUFA, 1991) der aufbereiteten Rohstoffe und Mischungen bestimmt. Der Gehalt an pflanzenverfügbaren Nährstoffen (N, P, K) wurde mit CaCl_2 und DTPA (nachfolgend mit CAT abgekürzt) extrahiert (VDLUFA, 1997b). Mineralischer N (N_{\min} CAT) wurde an einem San++ Continuous-Flow Analysator (Skalar), P_2O_5 (CAT) bei 470 nm an einem UV VIS Spektrometer (SpectrostarNano, BMGLabtech) und K_2O (CAT) bei 767 nm an einem AAS (AAnalyst 300, PerkinElmer, USA) gemessen.

Zur Ermittlung der benötigten Kalkmenge um die pH-Werte der nachfolgenden Versuche einstellen zu können, wurden für die Varianten Pufferkurven erstellt. Pro Variante wurden 6 Gefäße mit je 750 mL Probe gefüllt und in jedes Gefäß eine bestimmte Menge an Kalk gegeben (siehe Tab. 3). Nach 7, 14 und 21 Tagen wurden die pH-Werte in CaCl_2 gemessen (VDLUFA, 2016a). Die pH-Werte wurden in Abhängigkeit der Kalkzugaben dargestellt und daraus grafisch die nötige Kalkmenge für einen pH-Wert von z.B. 6 bestimmt.

Tab. 3: Kalkmengen der einzelnen Zugabestufen der Pufferkurven

Zugabestufe	Kalk ($85\%\text{CaCO}_3$) [g 0,75 L ⁻¹]	Dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) [g 0,75 L ⁻¹]
1	0	0
2	0	2,25
3	1,15	2,25
4	3,71	2,25
5	8,65	2,25
6	17,65	2,25

Die Wasser- und Luftkapazität der einzelnen Varianten wurde für die Stufen -10 hPa, -50 hPa und -100 hPa bestimmt (DIN EN 13041, 2011), das verfügbare Wasser zwischen -10 hPa und -100 hPa berechnet.

Die Korngrößenverteilung der aufbereiteten Rohstoffe wurde nach DIN EN 11540 (2005) erstellt.

Der Rottegrad von Heidekompost wurde nach dem Methodenbuch der Bundesgemeinschaft Kompost e.V. bestimmt (BGK, 2006).

2.2.4 Analysen in Prüfkriterium IV (PK IV)

2.2.4.1 Erweiterte Substratanalytik

In PK IV wurden weitere, aufwendigere Substratuntersuchungen der potenziellen Substratausgangsstoffe durchgeführt wie Stabilitätstests und Untersuchungen zur C- und N-Dynamik. Die Stabilität des N-Haushaltes wurde nach VDLUFA (2007) bestimmt. Hierfür wurden 1000 mg N zu 75 g Material jeder Variante (60% WK_{\max}) gegeben, der pH-Wert auf 6 eingestellt und N_{\min} (CAT) zu Beginn der Inkubation bei 25°C gemessen. Nach 20 Tagen wurde

Kapitel 2: Material und Methoden

N_{\min} jeder Variante mit CAT extrahiert und am San++ Continuous-Flow Analysator (Skalar) gemessen. Die Differenz zwischen N_{\min} (CAT) - Gehalt nach 20 Tagen und dem N_{\min} - Gehalt zu Beginn liefert Informationen über den Grad der N-Mobilisierung oder N-Immobilisierung eines Rohstoffes.

Um eine erste Einschätzung der Pflanzenverträglichkeit eines Rohstoffes zu erhalten, wurden Wachstumstests mit Chinakohl durchgeführt (in Anlehnung an VDLUFA, 2016b). In beiden Phasen wurden die Varianten auf pH 5,5 aufgekalkt und in Phase 2 (2018) wurde die N-Düngung der einzelnen Varianten angepasst, so dass jede Variante entsprechend der in den N-Stabilitätstests ermittelten Mengen an immobilisiertem N gedüngt wurde. Nach 21 Tagen wurden die oberirdische Pflanzenbiomasse geerntet und Feucht- und Trockenmasse sowie % N, P und K i.d. TS der Pflanzen bestimmt.

2.2.4.2 Ermittlung der Abbaustabilität mittels CO_2 Inkubation

Die Untersuchung der mikrobiellen CO_2 -Mineralisation organischer Substanzen erfolgte nach der Methode von Isermeyer (1952) zur Bestimmung der Bodenatmung. Der Aufbau des Versuchs wurde an den von Alef (1991) erarbeiteten Aufbau angelehnt. Eine Woche vor Versuchsbeginn wurden die zu untersuchenden Proben auf 60% WK_{\max} angefeuchtet und bis 1 Tag vor Versuchsbeginn bei 4°C gelagert. Am Tag vor dem Ansetzen der CO_2 Inkubation wurden die Proben bei Raumtemperatur aufbewahrt. Pro Probe wurden 25 mL Substrat in Zentrifugenröhrchen (9 cm hoch und 2.5 cm breit) gefüllt, die an ihrem oberen Rand mit Löchern versehen sind. Pro Variante wurden 5 Wiederholungen und 3 Blindwerte pro Ansatz vorbereitet. Exakt 20 mL 0,05 M NaOH wurden mit dem Titrator (Titronic 500, Xylem Analytics Inc., USA) in eine 250 mL Schottflasche pipettiert. Der Deckel muss nach dem Befüllen sofort verschlossen werden. Nachdem alle Schottflaschen mit 0,05 M NaOH vorbereitet wurden, wurden die Zentrifugenröhrchen in Schottflaschen eingesetzt, fest verschlossen und bei 20 °C inkubiert. 1, 2, 3, 6, 9 und 13 Tage nach Inkubationsstart und bei Bedarf, wenn die mikrobielle Atmung sehr hoch war, erfolgte die Beprobung. Hierfür wurden neue Schottflaschen mit NaOH befüllt und die Zentrifugenröhrchen rasch umgesetzt und sofort weiter inkubiert. Für die Titration wurden 2 mL $BaCl_2$ (0,5 M $BaCl_2$) und 2-3 Tropfen Phenolphthalein ($C_{20}H_{14}O_4$, gelöst in 70 % Ethanol) in die getauschten Flaschen gegeben. Unter ständigem Rühren wurde mit 0,05 M HCl bis zum Farbumschlag titriert.

Die ermittelten Werte an verbrauchter HCl (V_{HCl}) für die Proben sowie die ermittelten Werte für den Verbrauch von HCl in Blindwerten (Inkubation ohne Probenrohr) (V_{BW}) dienen anhand von Gleichung (1) für die Berechnung der freigesetzten Menge an CO_2 . Diese Art der Berechnung des freigesetzten CO_2 ist angelehnt an die Formel von Alef (1991).

$$mg CO_2 \times g^{-1} TS \times 24 h^{-1} = \frac{(V_{BW} - V_{HCl}) \times 1,1 \times 100}{m_R \times TS} \quad \text{Gl. (1)}$$

TS: Trockengewicht in g

V_{BW} : benötigtes Volumen an HCl für den Blindwert in mL

V_{HCl} : benötigtes Volumen an HCl für die Probe in mL

1,1: Umrechnungsfaktor (1 mL 0,05 M NaOH entspricht 1,1 mg CO_2)

m_R : Feuchte Einwaage des Rohstoffes in g

Kapitel 2: Material und Methoden

Die Mengen an CO₂ wurden über die Zeit aufsummiert und als Gesamt-CO₂ über 14 Tage dargestellt.

Am Start und am Ende der Inkubation wurden jeweils die Gehalte an mineralischem Stickstoff bestimmt, indem 25 mL Probe mit 100 mL 0,0125 M CaCl₂ Lösung extrahiert wurde.

Pro Rohstoff wurden zwei Ansätze der Inkubation durchgeführt. Zum einen bei dem pH-Wert, den die einzelnen Rohstoffe von Natur aus besitzen und zum anderen bei pH 6, um die CO₂ Freisetzung der einzelnen Rohstoffe bei einem pflanzenbaulich relevanten pH-Wert miteinander vergleichen zu können. Die Proben wurden hierzu eine Woche vor dem Start der Inkubation auf pH 6 aufgekalkt.

2.2.4.3 Wasser- und salzextrahierbare C- und N-Verbindungen

Zur Bestimmung der Mengen an leicht abbaubaren C- und N- Verbindungen wurden die Rohstoffe mit Reinstwasser und mit einer 0,5 M Kaliumsulfatlösung (K₂SO₄-Lösung) jeweils bei 20°C und bei 80°C extrahiert nach einem Versuchsaufbau von Amha Amde (2011). Pro Rohstoff und Versuchsansatz wurden vier Wiederholungen untersucht.

Für die Versuchsdurchführung des 20°C Ansatzes wurden je Rohstoff eine lieferfeuchte Menge, die 5 g TS in der Probe entspricht, in 250 ml Gefäße eingewogen und jeweils 100 ml H₂O bzw. K₂SO₄-Lösung hinzugegeben. Die Proben wurden eine Stunde über Kopf geschüttelt und für 30 Minuten zentrifugiert. Anschließend wurden die Proben mithilfe einer Absauganlage durch Cellulose Acetat Filter (Sartorius Typ 111, Porengröße: 0,45 µm, Ø: 47 mm) filtriert und am liquiTOC (Elementar vario TOC cube) gemessen.

Für die Versuchsdurchführung des 80°C Ansatzes wurden je Rohstoff eine lieferfeuchte Menge, die 5 g TS in der Probe entspricht, in 250 ml Gefäße eingewogen und jeweils 100 ml H₂O bzw. K₂SO₄-Lösung hinzugegeben. Die Proben wurden zwei Minuten über Kopf geschüttelt und für 16 Stunden bei 80°C in ein Wasserbad gestellt. Anschließend kühlten sie 30 Minuten ab und wurden für 30 Minuten zentrifugiert. Die Proben wurden mithilfe einer Absauganlage durch Cellulose Acetat Filter filtriert und am liquiTOC gemessen.

2.2.4.4 Bestimmung der Ligninkomponenten nach der CuO-Methode

Zur Bestimmung der Mengen an schwer abbaubaren C- und N- Verbindungen der Rohstoffe, erfolgte eine Bestimmung der isolierbaren, phenolischen Oxidationsprodukte der Ligninkomponenten mittels der Kupferoxidationsmethode (CuO-Methode) mit anschließender gaschromatographischer und massenspektrometrischer Messung nach Dao et al. (2018), welche auf den Methoden von Hedges und Ertel (1982) und Kögel und Bochter (1985) beruht.

Die Durchführung dieser Methode lässt sich in mehrere Schritte untergliedern:

Schritt 1) Oxidation und Druckaufschluss der organischen Rohstoffe.

Schritt 2) Ausfällen der Huminsäuren mit 6 M HCl.

Schritt 3) Festphasenextraktion der Ligninkomponenten mit vorkonditionierten C18 SPE-Säulen (Bakerbond).

Schritt 4) Elution der Ligninkomponenten mit 5 ml Ethylacetat.

Schritt 5) Derivatisierung der Ligninkomponenten mit BSTFA in Pyridin.

Kapitel 2: Material und Methoden

Schritt 6) Messung am Gaschromatographen mit angeschlossenem Massenspektrometer (GC/MS) (Agilent Technologies 7890B GC/5977A MSD).

Die Ligninderivate waren dabei in drei Obergruppen eingeteilt, die sich aus den einzelnen Komponenten (Einheiten) zusammensetzen:

- 1) V-Einheiten bzw. Vanillyl-Einheiten (Vanillin+Acetovanillon+Vanillinsäure)
- 2) S-Einheiten bzw. Syringyl-Einheiten (Syringaldehyd+Acetosyringon+Syringasäure)
- 3) C-Einheiten bzw. Cynamyl-Einheiten (p-Coumarsäure+Ferulasäure)

Es wurde die Gesamtmenge aller Obergruppen der Ligninderivate (V+S+C-Einheiten) in µg pro Gramm Rohstoffeinwaage als Maß der Verholzung bestimmt sowie das Säure zu Aldehydverhältnis der S- und V-Einheiten (Gleichung 2) um Aussagen zum Abbaustatus des Lignins treffen zu können.

$$\frac{Acid}{Alde_{S,V}} = \frac{(Vanillinsäure+Syringasäure)}{(Vanillin+Syringaldehyd)} \quad \text{Gl. 2}$$

Eine detaillierte Schritt-für-Schritt-Anleitung der Methode ist in Beyer (2018) zu finden.

2.2.4.5 Hemicellulose, Cellulose und (Roh-)Lignin

Die Gehalte an Hemicellulose, Cellulose und (Roh-)Lignin wurden bei der LUFA Nord-West (Institut für Futtermittel) bestimmt. Dort wurden die Gehalte der Säure-Detergenzien-Faser (ADF) nach einer Kurzfassung der VDLUFA-Methode (2012a) bestimmt, welche ein Maß für den Gehalt an Cellulose, Lignin und Lignin-N-Verbindungen ist. Ebenso wurden die Gehalte an Neutral-Detergenzien-Faser (aNDF) (VDLUFA, 2012b) ermittelt, die ein Maß für den Gehalt an Hemicellulosen, Cellulosen, Lignin und Lignin-N-Verbindungen darstellen. Der Gehalt an Säure-Detergenz-Lignin (ADL) wurde nach VDLUFA (2012c) bestimmt.

Aus den Parametern ADF, aNDF und ADL lassen sich die Anteile von Cellulose, Hemicellulose und (Roh-)Lignin an der TS der Rohstoffe berechnen.

$$\text{Hemicellulose [\%]} = \text{aNDF [\%]} - \text{ADF [\%]}$$

$$\text{Cellulose [\%]} = \text{ADF [\%]} - \text{ADL [\%]}$$

$$\text{(Roh-)Lignin [\%]} = \text{ADL [\%]}$$

Am Institut für Bodenkunde wurde an den Probenrückständen von ADF, aNDF und ADL der C- und N-Gehalt mittels Elementaranalysator ermittelt.

Aufgrund technischer Schwierigkeiten konnte die Extraktion der einzelnen Rohstoffe mit 6M HCl nicht durchgeführt werden.

2.2.5 Analysen in Prüfkriterium V (PK V)

Für die Praxisversuche in den verschiedenen Sparten des Gartenbaus werden zunächst die Prüfkriterien I bis IV durchlaufen und nach den entsprechenden Methoden analysiert.

Mindestens einmal während der Kulturzeit (etwa zur Mitte der Kulturdauer) erfolgte eine Analyse des Substrates, um den pH-Wert und die Nährstoffgehalte (N, P, K) zu überprüfen und

ggf. Anpassung zum Erreichen des Kulturziels vornehmen zu können. Pro Variante wurde eine Mischprobe aus einer statistisch repräsentativen Zahl an Töpfen gezogen.

Am Ende der Kulturzeit wurden an 10 Töpfen bzw. Containern, die nach dem statistischen Zufallsprinzip ausgewählt wurden, die oberirdische Biomasse (feucht und trocken) bestimmt sowie eine Bonitur der Laubfarbe, Form der Laubblätter, Bewurzelungsintensität und Wurzelgesundheit entsprechend VDLUFA, Punkt 5.7.3.1 (2016b) durchgeführt. Je nach Kultur und Sparte können weitere Boniturmerkmale mit aufgenommen werden wie z.B. Pflanzhöhe, Blütenanzahl, Kompaktheit. Zusätzlich wurden noch die Gehalte an N, P, K i.d. TS der Blätter bestimmt, um eine Aussage über die Nährstoffversorgung der Pflanzen treffen zu können.

2.3 Statistische Analysen

Um die Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten untersuchen zu können, wurden Varianzanalysen durchgeführt. Bei Normalverteilung der Daten und Varianzenhomogenität wurde eine ANOVA mit paarweisem t-Test als post-hoc Test verwendet. Wenn die Daten nicht normalverteilt und/oder die Varianzen nicht homogen waren, wurde der nicht parametrische Kruskal-Wallis Test mit paarweisem t-Test als post-hoc Test eingesetzt. Das Signifikanzniveau aller Analysen lag bei $p < 0,05$. Alle statistischen Analysen wurden mit R durchgeführt (R version 3.5.2; R core team 2018).

In den Abbildungen und Tabellen wurden stets die Mittelwerte \pm Standardabweichung angegeben. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten in einem Untersuchungsjahr an.

In die Korrelationsanalyse gingen die Daten aller Rohstoffe (Weißtorf, Heidekompost, Erle, Typha, Phragmites) ein. Es wurde der Korrelationskoeffizient nach Pearson mit $p < 0,05$ berechnet. Zusätzlich wurden drei Substratausgangsstoffe (Rindenumus, Kokosfaser, Holzfaser), die bereits als Torfersatzstoffe etabliert sind, in Phase 1 mit untersucht und in die Korrelationen mit einbezogen. Die Korrelationen erfolgten nach Phase 1 und 2 getrennt, wobei die Ergebnisse von Phragmites, Rindenumus, Kokosfaser sowie Holzfaser für die Korrelationen in beiden Untersuchungsjahren verwendet wurden. In Phase 2 wurde der Rohstoff Typha aus den Korrelationen ausgeschlossen, da die CO₂-Flussmessungen stark erhöht waren und als Ausreißer zu werten waren.

3. Prüfrasterentwurf im Test

3.1 Ergebnisse der Rohstoffanalysen

In beiden Untersuchungsjahren lagen die Basisparameter der untersuchten Rohstoffe in einem für Substratausgangsstoffe günstigen Bereich (siehe Tab. 4 und Tab. 5).

Bei Heidekompost wurde aufgrund der Herkunft des Heidematerials von einem Truppenübungsplatz noch eine Schwermetallanalysen auf Cu und Zn durchgeführt, deren Werte mit 7,6 mg Cu kg⁻¹ TS und 28,5 mg Zn kg⁻¹ TS deutlich unter den für (Baum-)Substrate geltenden Grenzwerten lagen (RAL, 2015).

Somit wurde Prüfkriterium I in beiden Jahren erfolgreich durchlaufen und es konnte im nachfolgenden Prüfkriterium II die Aufbereitung untersucht werden.

Tab. 4: Basisparameter der untersuchten Rohstoffe in Phase 1 (2017; n=3). Varianzanalyse: Kruskal-Wallis (außer % P i.d.TS: ANOVA), post-hoc Test: paarweiser t-Test, p<0,05.

Rohstoff	pH (CaCl ₂)	Salzgehalt [g L ⁻¹]	% N i.d.TS	C/N	% K i.d.TS	% P i.d.TS
Torf	3,2 ± 0,0 a	0,06 ± 0,00 a	0,82 ± 0,00 a	60 ± 0 a	0,03 ± 0,01 a	0,03 ± 0,01 a
Heidekompost	5,2 ± 0,1 b,c	0,47 ± 0,00 b	1,44 ± 0,01 b	21 ± 0 b	0,22 ± 0,01 b	0,07 ± 0,02 b
Erle	6,2 ± 0,1 d	0,21 ± 0,01 c	0,55 ± 0,01 c	83 ± 0 c	0,17 ± 0,00 c	0,06 ± 0,01 b
<i>Typha ang.</i>	5,4 ± 0,2 b	0,41 ± 0,00 d	0,30 ± 0,00 d	154 ± 1 d	0,23 ± 0,00 b	0,01 ± 0,01 a,c
<i>Phragmites</i>	5,1 ± 0,0 c	0,37 ± 0,01 e	0,25 ± 0,01 e	184 ± 4 e	0,07 ± 0,01 d	0,00 ± 0,00 c

Tab. 5: Basisparameter der untersuchten Rohstoffe in Phase 2 (2018; pH-Wert, Salzgehalt, C/N: n=3; NPK-TS: n=2). Varianzanalyse: Kruskal-Wallis (außer C/N: ANOVA), post-hoc Test: paarweiser t-Test, p<0,05.

Rohstoff	pH (CaCl ₂)	Salzgehalt [g L ⁻¹]	% N i.d.TS	C/N	% K i.d.TS	% P i.d.TS
Torf	3,3 ± 0,0 a	0,05 ± 0,00 a	0,96 ± 0,02 a	52 ± 1 a	0,00 ± 0,00 a	0,03 ± 0,03
Heidekompost	5,0 ± 0,0 b	0,51 ± 0,03 b	1,24 ± 0,02 b	18 ± 0 b	0,15 ± 0,01 b	0,07 ± 0,00
Erle	5,5 ± 0,1 c	0,26 ± 0,00c	0,71 ± 0,01 c	67 ± 1 c	0,23 ± 0,02 c	0,08 ± 0,00
<i>Typha lat.</i>	6,1 ± 0,0 d	0,04 ± 0,00a	1,17 ± 0,03 d	38 ± 1 d	0,12 ± 0,01 b	0,14 ± 0,00

3.2 Aufbereitung der Rohstoffe

In Prüfkriterium II wurde die Aufbereitung der Rohstoffe untersucht. Eine genaue Beschreibung der Rohstoffaufbereitung und der beteiligten Firmen befindet sich in Kapitel 2.2.2. Eine Übersicht der Partikelgrößen der aufbereiteten Rohstoffe befindet sich in Tab. 6.

Tab. 6: Partikelgrößen der Rohstoffe in den beiden Untersuchungsjahren 2017 und 2018.

Rohstoff	Partikelgröße nach Aufbereitung 2017	Partikelgröße nach Aufbereitung 2018
Fräsweißtorf	fein/mittel	fein/mittel
Heidekompost	< 9 mm	< 10 mm
Erle gehäckselt	< 9 mm	< 10 mm
Rohrkolben gehäckselt	3-6 mm	< 10 mm
Schilfrohr gehäckselt	3-6 mm	-

3.3 Ergebnisse der erweiterten Substratanalysen der aufbereiteten Rohstoffe

3.3.1 Basisparameter der aufbereiteten Rohstoffe

Als Kontrolle und Mischkomponente wurde Fräsweißtorf verwendet. Fräsweißtorf zeigte in beiden Untersuchungsjahren wie erwartet niedrige pH-Werte, Salz- sowie Nährstoffgehalte (siehe Tab. 7 und Tab. 8). Die pH-Werte von Heidekompost, Erle, *Typha* und *Phragmites* lagen zwischen 5 und 6 und somit höher als die Kontrolle. Die Salzgehalte aller untersuchten Rohstoffe betragen maximal $0,5 \text{ g L}^{-1}$ Substrat, was deutlich unter der Grenze von 3 g KCl L^{-1} für Substratausgangsstoffe von Kultursubstraten (RAL, 2015). Somit kommen alle untersuchten Rohstoffe als Mischkomponenten in Kultursubstraten in Frage.

Die Gehalte an mineralischem Stickstoff lagen bei knapp 60 mg L^{-1} Substrat. Die P_2O_5 - und K_2O -Gehalte waren deutlich höher als bei Fräsweißtorf, liegen aber nach gängigen und stoffbezogenen Kriterien noch in einem günstigen Bereich. Die Grenzwerte für Substratkompost Typ 1 mit einem Beimischungsanteil bis max. 40 Vol. % in Kultursubstraten liegen bei $N_{\min} < 300 \text{ mg L}^{-1}$, bei $\text{P}_2\text{O}_5 < 1200 \text{ mg L}^{-1}$ und bei $\text{K}_2\text{O} < 2000 \text{ mg L}^{-1}$ (BGK, 2018). Die gemessenen Nährstoffgehalte lagen für alle Stoffe in beiden Jahren unter diesen Werten.

Tab. 7: Basisparameter der aufbereiteten Rohstoffe in Phase 1 (2017). Rohdichte trocken, Salzgehalt sowie Nährstoffgehalte (NPK-CAT) in g L^{-1} Substrat. Alle Parameter ($n=3$, außer WK_{\max} $n=4$) wurden nach VDLUFA ermittelt (siehe Kapitel 2.2). Varianzanalyse: Kruskal-Wallis, post-hoc Test: paarweiser t-Test, $p < 0,05$.

Rohstoff	Rohdichte trocken [g L^{-1}]	pH (CaCl_2)	Salzgehalt [g L^{-1}]	N_{\min} [g L^{-1}]	P_2O_5 [g L^{-1}]	K_2O [g L^{-1}]	WK_{\max} [Vol. %]
Torf	$78 \pm 1 \text{ a}$	$3,2 \pm 0,0 \text{ a}$	$0,06 \pm 0,00 \text{ a}$	$20 \pm 1 \text{ a}$	$3 \pm 1 \text{ a}$	$4 \pm 0 \text{ a}$	$82 \pm 1 \text{ a}$
Heidekompost	$248 \pm 1 \text{ b}$	$5,2 \pm 0,1 \text{ b,c}$	$0,47 \pm 0,00 \text{ b}$	$28 \pm 1 \text{ b}$	$142 \pm 2 \text{ b}$	$733 \pm 17 \text{ b}$	$63 \pm 1 \text{ b}$
Erle	$170 \pm 1 \text{ c}$	$6,2 \pm 0,1 \text{ d}$	$0,21 \pm 0,01 \text{ c}$	$0 \pm 0 \text{ c}$	$79 \pm 2 \text{ c}$	$279 \pm 6 \text{ c}$	$36 \pm 1 \text{ c}$
<i>Typha ang.</i>	$36 \pm 0 \text{ d}$	$5,4 \pm 0,2 \text{ b}$	$0,41 \pm 0,00 \text{ d}$	$6 \pm 0 \text{ d}$	$24 \pm 1 \text{ d}$	$82 \pm 2 \text{ d}$	$15 \pm 1 \text{ d}$
<i>Phragmites</i>	$103 \pm 5 \text{ e}$	$5,1 \pm 0,0 \text{ c}$	$0,37 \pm 0,01 \text{ e}$	$10 \pm 0 \text{ e}$	$34 \pm 0 \text{ e}$	$116 \pm 1 \text{ e}$	$15 \pm 1 \text{ d}$

Kapitel 3: Prüfrasterentwurf im Test

Tab. 8: Basisparameter der aufbereiteten Rohstoffe in Phase 2 (2018). Salzgehalt sowie Nährstoffgehalte (NPK-CAT) in g pro Liter Substrat. Alle Parameter (n=3, außer WK_{max} n=4) wurden nach VDLUFA ermittelt (siehe Kapitel 2.2). Varianzanalyse: Kruskal-Wallis, post-hoc Test: paarweiser t-Test, $p < 0,05$ (Leiber-Sauheitl et al., 2020).

Rohstoff	Rohdichte trocken [g L ⁻¹]	pH (CaCl ₂)	Salzgehalt [g L ⁻¹]	N _{min} [g L ⁻¹]	P ₂ O ₅ [g L ⁻¹]	K ₂ O [g L ⁻¹]	WK _{max} [Vol. %]
Torf	97 ± 1 a	3,3 ± 0,0 a	0,05 ± 0,00 a	21 ± 1 a	3 ± 0 a	5 ± 0 a	80 ± 1 a
Heidekompost	255 ± 5 b	5,0 ± 0,0 b	0,51 ± 0,03 b	57 ± 1 b	102 ± 6 b	630 ± 12 b	70 ± 2 b
Erle	172 ± 3 c	5,5 ± 0,1 c	0,26 ± 0,00c	0 ± 0 c	81 ± 4 c	368 ± 8 c	31 ± 0 c
<i>Typha lat.</i>	40 ± 1 d	6,1 ± 0,0 d	0,04 ± 0,00a	5 ± 0 d	73 ± 1 d	58 ± 1 d	20 ± 0 d

3.3.2 Maximale Wasserhaltekapazität, Wasser- und Lufthaushalt

Um eine erste Einschätzung der Wasserspeicherfähigkeit der aufbereiteten Rohstoffe treffen zu können, wurde die maximale Wasserhaltekapazität der verschiedenen Varianten in Phase 1 (2017) und Phase 2 (2018) nach VDLUFA (2002) bestimmt (siehe Tab. 9).

Tab. 9: Maximale Wasserhaltekapazität (WK_{max}) der untersuchten Varianten in Phase 1 (2017) und Phase 2 (2018; Leiber-Sauheitl et al., 2020) (n=4), ermittelt nach VDLUFA (siehe Kapitel 2.2). Varianzanalyse: Kruskal-Wallis, post-hoc Test: paarweiser t-Test, $p < 0,05$.

Varianten 2017	WK _{max} (Vol. %)	Variante 2018	WK _{max} (Vol. %)
Torf 100	82 ± 1 a	Torf 100	80 ± 1 a
Heide 100	63 ± 1 b	Heide 100	70 ± 2 b
Heide 50	72 ± 1 c	Heide 50	82 ± 3 a
Erle 100	36 ± 1 d		
Erle 50	57 ± 1 e	Erle 50	59 ± 0 c
		Erle 25	75 ± 2 d
Typha 100	15 ± 1 f		
Typha 50	48 ± 1 g	Typha 50	52 ± 1 e
		Typha 25	77 ± 1 a,d
Phragmites 100	15 ± 1 f		
Phragmites 50	45 ± 1 h		

Die maximale Wasserhaltekapazität der Varianten Torf 100, Heide 50 und Heide 25 lag zwischen 77 und 82 Vol. %. Die Zugabe von Torf erhöhte die Wasserkapazität aller aufbereiteten Rohstoffe. Heide 50 hatte eine höhere WK_{max} als Erle 50, gefolgt von Typha 50 und Phragmites 50.

Um Rückschlüsse über die Bewässerungshäufigkeit und -intensität während der Kulturführung ziehen zu können, wurden die Wasser- und Luftkapazität der verschiedenen Varianten nach DIN EN 13041 (2011) untersucht (Daten siehe Anhang Tab. A 1 und Tab. A 2). Aus der Differenz des Wassergehaltes zwischen -100 hPa und -10 hPa lässt sich das pflanzenverfügbare Wasser für Substrate ableiten (siehe Abb. 17 und Abb. 18).

Kapitel 3: Prüfrasterentwurf im Test

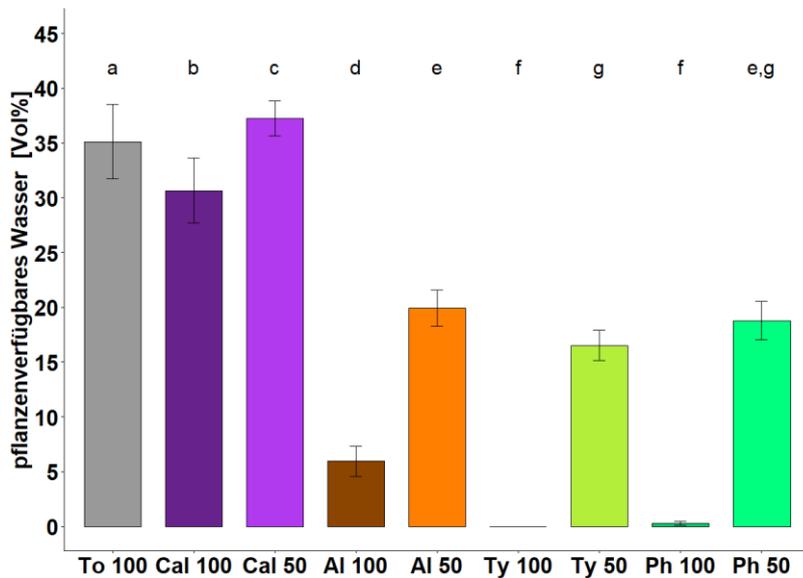


Abb. 17: Pflanzenverfügbares Wasser zwischen -10 und -100 hPa in Phase 1 (2017, n=16), ermittelt nach DIN EN 13041 (2011). Varianzanalyse: Kruskal-Wallis, post-hoc Test: paarweiser t-Test, $p < 0,05$. Abkürzungen der Varianten siehe Tab. 1.

In Phase 2 (2018) zeigten Torf 100 und Heide 50 mit 35 Vol. % die höchsten Werte des verfügbaren Wassers gefolgt von Heide 100 mit ca. 30 Vol. %. Erle 50 und Phragmites 50 wiesen mit ca. 20 Vol. % noch ca. die Hälfte des verfügbaren Wassers wie Torf 100 auf. Bei Erle 100, Phragmites 100 und Typha 100 war das verfügbare Wasser nahe Null. Diese Rohstoffe könnten somit nicht als einziger Substratausgangsstoff in einem Kultursubstrat verwendet werden.

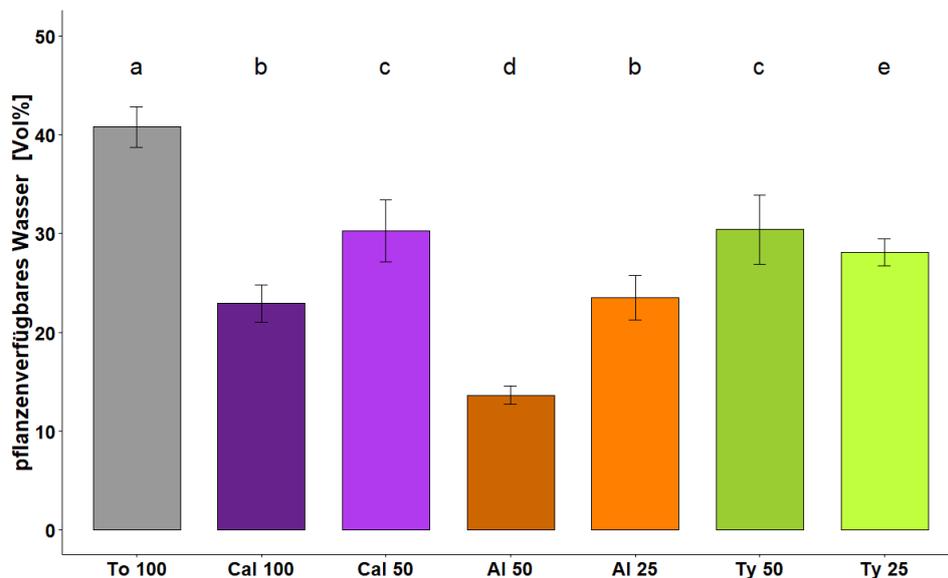


Abb. 18: Pflanzenverfügbares Wasser zwischen -10 und -100 hPa in Phase 2 (2018, n=16), ermittelt nach DIN EN 13041 (2011). Varianzanalyse: Kruskal-Wallis, post-hoc Test: paarweiser t-Test, $p < 0,05$. Abkürzungen der Varianten siehe Tab. 2.

Kapitel 3: Prüfrasterentwurf im Test

In Phase 2 (2018) zeigte Torf 100 mit 40 Vol. % die höchsten Werte des verfügbaren Wassers gefolgt von Heide 50, Typha 50 und Typha 25 mit ca. 30 Vol. %. Heide 100 und Erle 25 wiesen mit ca. 23 Vol. % noch ca. die Hälfte des verfügbaren Wassers wie Torf 100 auf. Bei Erle 50 war es nur noch ein Drittel im Vergleich zu Torf 100.

3.4 Ergebnisse der Untersuchungen der Stabilität des C- und N- Haushaltes

3.4.1 N-Haushalt der potenziellen Substratausgangsstoffe

Der N-Haushalt der potenziellen Substratausgangsstoffe wurde nach VDLUFA (2007) untersucht, um Informationen über eine möglicherweise erhöhte N-Düngung der verschiedenen Rohstoffe bei Pflanzenversuchen abschätzen zu können. Um die untersuchten Rohstoffe einordnen zu können, werden hier die Grenzwerte für die Stabilität aus der Methodenbeschreibung aufgeführt (VDLUFA, 2007; siehe Tab. 10).

Tab. 10: Grenzwerte für die Stabilität des N-Haushaltes (VDLUFA, 2007)

Änderung des N_{\min}-Gehalts	Bewertung	Zumischung zu N-stabilen Materialien
0 – 50 mg L ⁻¹	Stabil	
51 – 125 mg L ⁻¹	Leicht instabil	
> 125 mg L ⁻¹	Nicht stabil	Max. 40 Vol. %
> 250 mg L ⁻¹	Kein Einsatz als Substratkomponente möglich	Max. 20 Vol. %, wenn Werte < 250 mg L ⁻¹

Die in Tab. 10 aufgeführten Grenzwerte können sowohl positive als auch negative Werte annehmen. Ein negatives Vorzeichen bedeutet eine N-Immobilisierung, wohingegen ein positives Vorzeichen auf eine N-Mineralisierung hinweist. Aus Übersichtsgründen sind die Grenzwerte der Mineralisierung in den folgenden Abbildungen nicht dargestellt.

Bei der Untersuchung des Mineralstickstoffhaushaltes nach VDLUFA (2007) in Phase 1 (2017) zeigte sich, dass Torf 100 und Heide 50 stabil waren. Heide 100 und Typha 50 waren leicht instabil und Erle 50 und Typha 100 waren instabil. Erle 100 sowie die beiden Phragmites-Varianten können laut der VDLUFA-Definition nicht als Substratkomponente eingesetzt werden (siehe Abb. 19).

Kapitel 3: Prüfrasterentwurf im Test

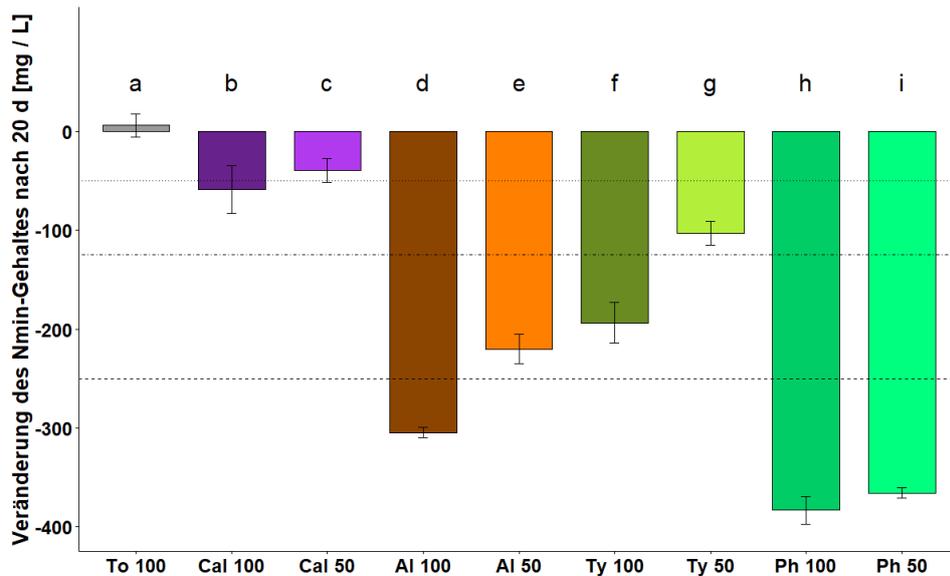


Abb. 19: Veränderung des N_{min}-Gehaltes der verschiedenen Varianten (in mg L⁻¹ Substrat) nach 20 Tagen Inkubation in Phase 1 (2017), ermittelt nach VDLUFA (2007), n=16. Linien in der Abbildung zeigen die Grenzen der verschiedenen Stabilitätsniveaus an. Varianzanalyse: Kruskal-Wallis, post-hoc Test: paarweiser t-Test, p<0,05. Abkürzungen der Varianten siehe Tab. 1.

Bei der Untersuchung des Mineralstickstoffhaushaltes nach VDLUFA (2007) in Phase 2 (2018) zeigte sich, dass Torf 100, Heide 100, Heide 50 und Typha 25 stabil sind. Typha 50 ist leicht instabil und die beiden Erlenvarianten sind instabil (siehe Abb. 20).

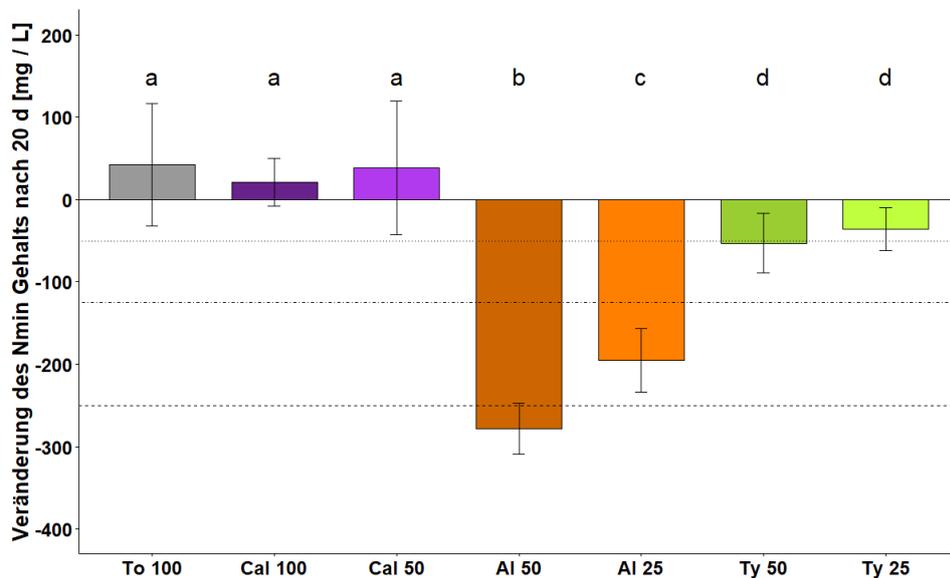


Abb. 20: Veränderung des N_{min}-Gehaltes der verschiedenen Varianten (in mg L⁻¹ Substrat) nach 20 Tagen Inkubation in Phase 2 (2018), ermittelt nach VDLUFA (2007), n=16. Linien in der Abbildung zeigen die Grenzen der verschiedenen Stabilitätsniveaus an. Varianzanalyse: Kruskal-Wallis, post-hoc Test: paarweiser t-Test, p<0,05. Abkürzungen der Varianten siehe Tab. 2.

Kapitel 3: Prüfrasterentwurf im Test

3.4.2 Wachstumstest

Zur ersten Abschätzung der Pflanzenverträglichkeit wurden in beiden Phasen Wachstumstests mit Chinakohl durchgeführt. In der ersten Phase (2017) erfolgte der Wachstumstest wie der Keimpflanzentest nach VDLUFA (2016b), in der zweiten Phase (2018) wurde der Wachstumstest mit Modifikationen in Anlehnung an VDLUFA (2016b) durchgeführt.

Im ersten Jahr zeigte sich bereits, dass Heide 100 und Heide 50 vergleichbar gut wie die Kontrolle Torf wachsen. *Typha* 50 zeigte eine etwas geringere Biomasse (siehe Anhang Tab. A 3). Es hat sich herausgestellt, dass ein 100%er Einsatz von *Typha* und *Phragmites* nicht möglich ist (siehe Abb. 21).

Die Substratanalysen zeigten (Daten nicht gezeigt), dass bei diesen beiden Stoffen die geringe Wasserkapazität die Ursache für die ausbleibende Keimung ist. *Phragmites* zeigte außerdem im Vergleich zu *Typha* eine hohe Schimmelbildung. Für Erle 100, Erle 50 und *Typha* 50 wurde bei den Substratuntersuchungen eine hohe N-Immobilisierung ermittelt; sie ist der Grund für das schlechte Abschneiden dieser Stoffe, denn die varianten-spezifische Düngung erfolgte erst im zweiten Versuchsjahr.



Abb. 21: Wachstum von Chinakohl am Ende des Wachstumstests mit neuen potenziellen Substratausgangsstoffen in Phase 1 (2017) (VDLUFA, 2016b), 4 Wiederholungen je Variante (Foto © Leiber-Sauheitl). Die Varianten „Schilf 100“ und „Schilf 50“ entsprechen den Varianten „Phragmites 100“ und „Phragmites 50“.

Die Untersuchungen des Stickstoffhaushaltes und der Wasserkapazität zeigten deutliche Unterschiede der Varianten mit den potenziellen Substratausgangsstoffen im Vergleich zu Torf, was eine Anpassung in der Kulturführung notwendig macht. Diese wurde beim Wachstumstest in Phase 2 (2018) bereits angewendet (siehe Abb. 22).

Die Anpassung der Kulturführung erfolgte durch eine varianten-spezifische N-Düngung zu Versuchsbeginn und einer Nachdüngung einzelner Varianten bei Bedarf. Alle Varianten wiesen mit kleinen Unterschieden ein gleich gutes Wachstum auf (siehe Anhang Tab. A 5 und Leiber-Sauheitl et al., 2020).

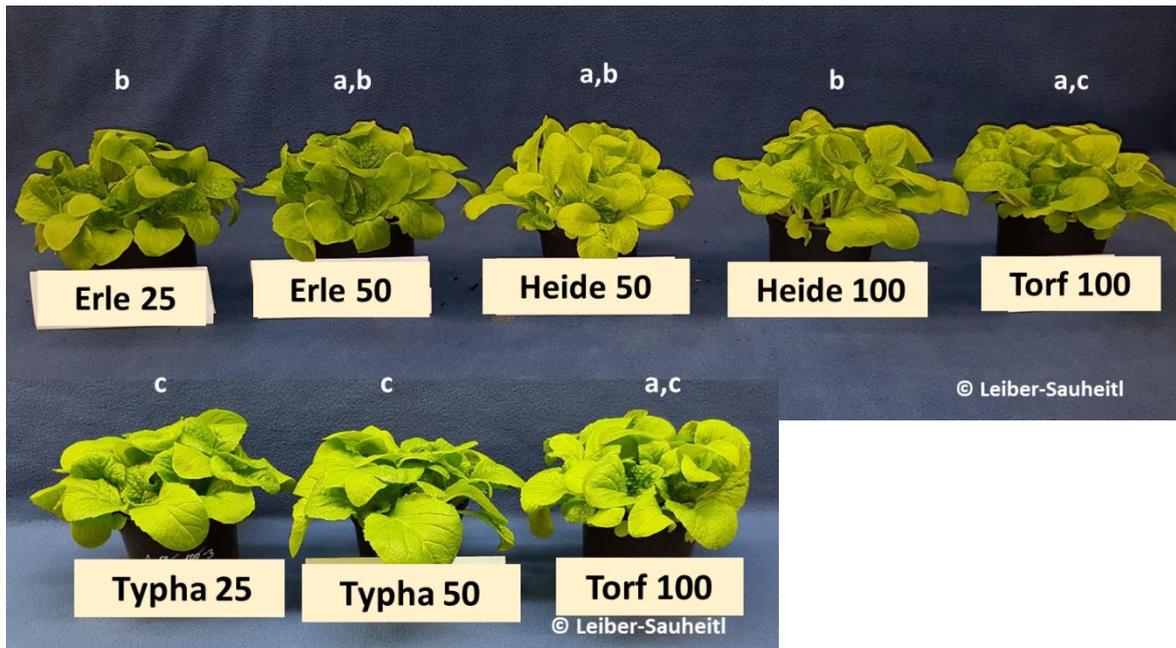


Abb. 22: Wachstum von Chinakohl am Ende des Wachstumstests mit neuen potenziellen Substratausgangsstoffen in Phase 2 (2018) (in Anlehnung an VDLUFA, 2016b), 4 Wiederholungen je Variante (Foto © Leiber-Sauheitl)

3.4.3 Abbaustabilität mittels CO₂-Inkubation

Neben der Stabilität des N-Haushaltes und der Pflanzenverträglichkeit ist die Abbaustabilität von Rohstoffen ein wichtiges Kriterium für den Einsatz als Substratausgangsstoff. Die CO₂-Inkubation über 14 Tage ist ein Maß für die mikrobielle Aktivität und liefert somit Informationen über die Abbaustabilität eines Rohstoffes.

Amha Amde (2011) fand bei einer Untersuchung von 20 Torfen eine starke lineare Korrelation zwischen der mittleren täglichen CO₂ Freisetzung über 10 Tage und der mittleren täglichen CO₂ Freisetzung über 180 Tage. Somit ist die nach 10 Tagen gemessene mikrobielle Aktivität ein Hinweis für den langfristigen Abbau der organischen Substanz in Torfproben.

In Phase I (2017) wurden die Rohstoffe und ihre Mischungen mit Torf bei dem pH-Wert wie angeliefert inkubiert. Der pH-Wert zeigte keinen signifikanten Einfluss auf die CO₂-Freisetzung der einzelnen Varianten an ($R^2 = 0,04$). Die im Vergleich zu den anderen Untersuchungsvarianten niedrige mikrobielle Aktivität von T100 (siehe Abb. 23) kann sich damit erklären lassen, dass sich bei der Torfbildung durch die über einen langen Zeitraum stattgefundene Zersetzung des abgelagerten Pflanzenmaterials durch Humifizierung schwerer abbaubare Komponenten anreichert haben. Die niedrige mikrobielle Aktivität von Cal 100 ist auf die Kompostierung des Heidematerials zurückzuführen, bei der leichter abbaubare Komponenten bereits umgesetzt wurden. Ty 100 und Ph 100 zeigen die höchste mikrobielle Aktivität, da diese Rohstoffe nicht weiter aufbereitet wurden und noch hohe Gehalte an leicht abbaubaren Verbindungen wie Hemicellulose und Cellulose enthalten sind. Al 100 weist eine mittlere mikrobielle Aktivität auf, da die Gehalte an Lignin im Vergleich zu Ty 100 und Ph 100 höher sind (siehe Kapitel 3.4.6). Durch die Mischung mit Torf wird bei allen Rohstoffen die CO₂-Freisetzung vermindert. Bei Ty 50 und Ph 50 kann sich die CO₂-Freisetzung um mehr als die Hälfte verringern.

Kapitel 3: Prüfrasterentwurf im Test

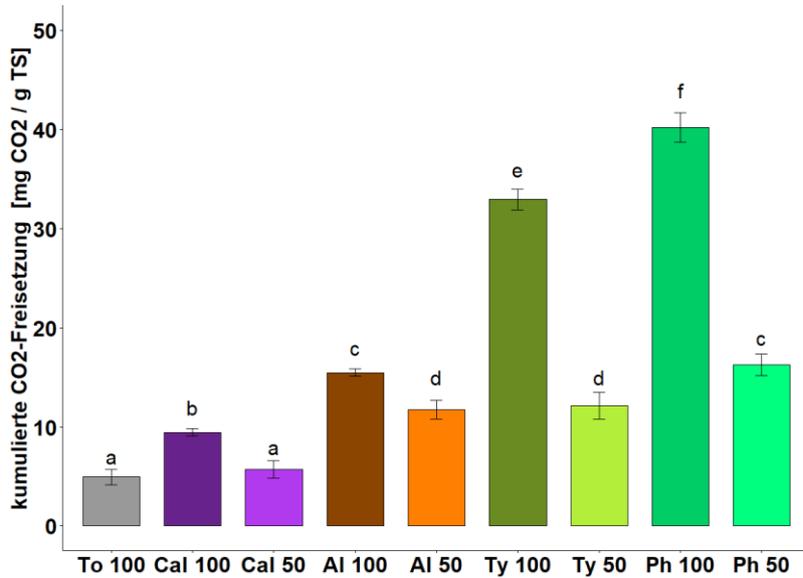


Abb. 23: Kumulierte CO₂-Freisetzung der ungekalkten Rohstoffe und Mischungen nach 14 Tagen in Phase I (2017) n=5. Varianzanalyse: Kruskal-Wallis, post hoc Test: t-Test, p<0,05. Abkürzungen der Varianten siehe Tab. 1.

In Phase II (2018) verhalten sich die einzelnen Rohstoffe und Mischungen wie in Phase 1, wobei nur die einzelnen Varianten modifiziert wurden und somit bei Erle und Typha keine 100% Variante untersucht, sondern jeweils eine 25% Variante ergänzt wurde (siehe Abb. 24).

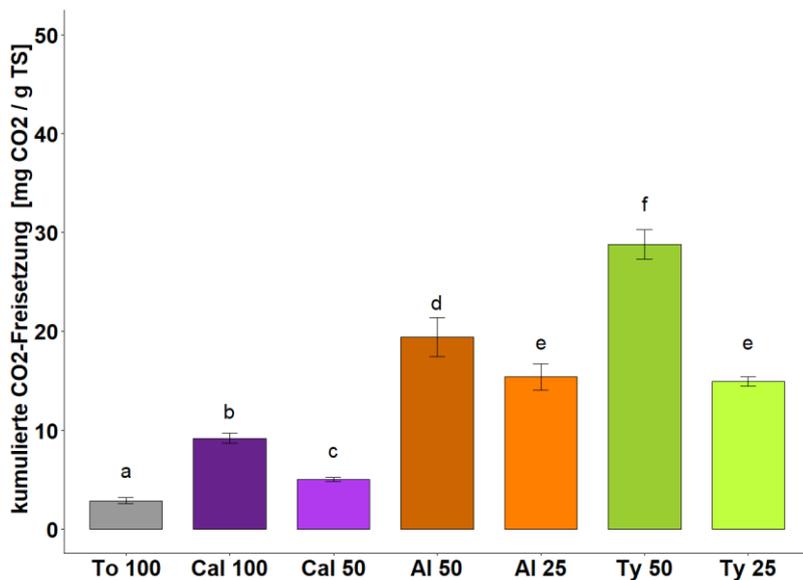


Abb. 24: Kumulierte CO₂-Freisetzung der ungekalkten Rohstoffe & Mischungen nach 14 Tagen in Phase II (2018) n=5. Varianzanalyse: Kruskal-Wallis, post hoc Test: t-Test, p<0,05. Abkürzungen der Varianten siehe Tab. 2

Um zu untersuchen, wie hoch die CO₂-Freisetzung der einzelnen Rohstoffe und Mischungen bei einem pflanzenbaulich relevanten pH-Wert ist, wurde in Phase II (2018) die Inkubation bei pH 6 wiederholt. Trotz einer Verdopplung der CO₂-Freisetzung zeigte To 100 die niedrigsten Werte, gefolgt von Cal 100 und Cal 50 (kein signifikanter Unterschied) und Al 50 und Al 25. Ebenso stieg die CO₂-Freisetzung von Ty 50 und Ty 25 um 50% bzw. 100% an (siehe Abb. 25).

Basierend auf diesen Ergebnissen ergibt sich eine Reihenfolge der Abbaustabilität von der stabilsten zur instabilsten Variante: To 100 > Cal 100, Cal 50 > Al 50, Al 25 > Ty 25 > Ty 50.

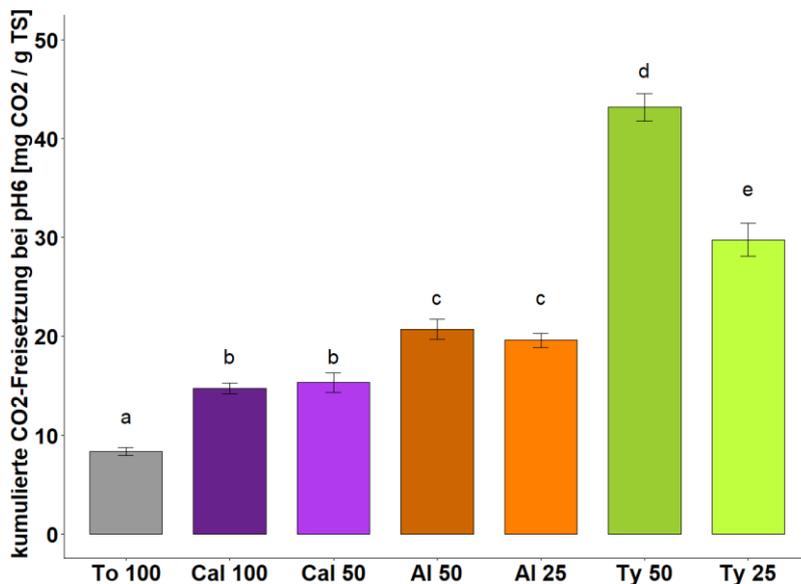


Abb. 25: Kumulierte CO₂-Freisetzung der aufgekalkten Rohstoffe und Mischungen nach 14 Tagen in Phase II (2018) n=5. Varianzanalyse: Kruskal-Wallis, post hoc Test: t-Test, p<0,05. Abkürzungen der Varianten siehe Tab. 2.

3.4.4 Wasser- und salzextrahierbare C- und N-Verbindungen

Durch Wasser und eine 0,5 M K₂SO₄-Lösung werden aus dem untersuchten Material (Boden oder auf die Eignung als Substratausgangsstoff zu testende Rohstoffe) leicht abbaubare C- und N- Verbindungen extrahiert (Katz et al., 1985; McGill et al., 1986), wie die bei niedrigen Temperaturen extrahierten Zucker, Aminosäuren, Kohlenhydrate und bei hohen Temperaturen extrahierten Stärke und Pektine. Bei diesen Verbindungen handelt es sich um Pflanzen- und Rohstoffbestandteile, die als bevorzugt von Mikroorganismen abgebaut werden. Sie können somit ein Maß für die Abbaubarkeit bzw. -stabilität eines Rohstoffes darstellen. Untersuchungen von Amha Amde (2011) mit verschiedenen Torfen zeigten eine Korrelation zwischen dem Gehalt an gelöstem organischen Kohlenstoff, der durch Wasser oder eine Salzlösung extrahiert wurde, und der mikrobiellen Aktivität (gemessen als langfristige CO₂-Entwicklung).

Um einen direkten Vergleich des gelösten organischen Kohlenstoffs mit den C_{org}-Gehalten der einzelnen Varianten machen zu können, wurde dieser in Tab. 11 und Tab. 12 mit dargestellt. Es zeigt sich deutlich, dass der Gehalt an extrahierbarem C nicht von der Menge an Gesamt-C_{org} abhängig ist.

In Phase 1 (2017) wurde nur der salzextrahierbare Kohlenstoff (SSC) untersucht (siehe Tab. 11). Es zeigte sich, dass bei 20°C Typha 100 die höchsten Gehalte aufwies, gefolgt von Phragmites 100, wobei Torf 100, Heide 100 und Erle 100 die geringsten Gehalte an SSC aufwiesen. Bei 80°C zeigte wiederum Typha 100 die höchsten Gehalte, gefolgt von Erle 100 und Torf 100 und Phragmites 100 sowie Heide 100 wiesen die geringsten Gehalte an SSC auf.

Kapitel 3: Prüfrasterentwurf im Test

Bei beiden Temperaturen lagen die Mischungen immer entsprechend zwischen den Gehalten für den untersuchten Rohstoff und Torf.

Tab. 11: Gehalt an organischem Gesamtkohlenstoff und salzextrahierbare C-Verbindungen der verschiedenen Varianten in Phase 1 (2017) bei 20°C und 80°C (n=4). Varianzanalyse: Kruskal-Wallis, post hoc Test: t-Test, $p < 0,05$. SSC: Salt Soluble Carbon.

Variante	Gesamt C _{org} [mg C g ⁻¹ TM]	SSC 20°C [mg C g ⁻¹ TM]	SSC 80°C [mg C g ⁻¹ TM]
Torf 100	470 ± 1 a	0,9 ± 0,1 a	8,2 ± 0,3 a
Heide 100	302 ± 2 b	0,9 ± 0,1 a	6,5 ± 0,6 b
Heide 50	350 ± 2 c	0,9 ± 0,0 a	7,2 ± 0,3 c
Erle 100	455 ± 3 d	0,9 ± 0,2 a	8,8 ± 0,4 d
Erle 50	442 ± 1 e	1,0 ± 0,1 a	8,6 ± 0,3 a,d
Typha 100	469 ± 1 f	5,3 ± 0,1 b	14,0 ± 0,3e
Typha 50	460 ± 1 g	2,2 ± 0,1 c	9,5 ± 0,1 f
Phragmites 100	468 ± 0 f	2,9 ± 0,1 d	7,4 ± 0,5 c
Phragmites 50	453 ± 1 d	2,0 ± 0,0 c	7,3 ± 0,1 c

In Phase 2 (2018) wurden zusätzlich zu den salzextrahierbaren noch die wasserextrahierbaren C-Verbindungen (WSC) untersucht (siehe Tab. 12). Die Größenordnungen der SSC-Gehalte entsprechen denen der WSC-Gehalte bei beiden Temperaturen. Ebenso liegen die SSC-Gehalte in Phase 2 im Bereich der in Phase 1 gemessenen Werte. Im Vergleich zu SSC und WSC-Gehalten anderer Torfproben (Amha Amde, 2011) entsprechen die gemessenen Werte für SSC 20 und SSC 80 den Literaturwerten, für WSC 20 und WSC 80 sind die in Tab. 12 aufgeführten Werte um den Faktor 10 höher.

Die Gehalte an SSC und WSC werden dazu verwendet, Rückschlüsse auf die Abbaustabilität zu ziehen. Hierzu werden sie in Bezug gesetzt zu den kumulierten CO₂-Freisetzungen über 13 Tage aus Kapitel 3.4.3. Zur Berechnung der Korrelationen wurden die Rohstoffe in den 100% Varianten verwendet (siehe Kapitel 2.3). Die CO₂-Flüsse zeigten in beiden Jahre eine hohe Korrelation mit SSC 20°C ($R^2 = 0,90$ in Phase 1 und $R^2 = 0,95$ in Phase 2). SSC 80°C, WSC 20°C und WSC 80°C zeigten keine signifikanten Korrelationen mit den CO₂-Flüssen. Somit kann SSC 20°C verwendet werden, um die Abbaustabilität eines Rohstoffes abzuschätzen. Je höher die Gehalte an SSC 20°C, desto mehr wird der Rohstoff umgesetzt.

Die nicht näher erläuterten Ergebnisse der salzextrahierbaren und wasserextrahierbaren N-Verbindungen befinden sich im Anhang in Tab. A 5 und Tab. A 6.

Tab. 12: Gehalt an organischem Gesamtkohlenstoff und wasserextrahierbare C-Verbindungen der verschiedenen Varianten in Phase 2 (2018) bei 20°C und 80°C (n=4). Varianzanalyse: Kruskal-Wallis, post hoc Test: t-Test, p<0,05. SSC: Salt Soluble Carbon, WSC: Water Soluble Carbon

Variante	Gesamt C _{org} [mg C g ⁻¹ TM]	SSC 20°C [mg C g ⁻¹ TM]	SSC 80°C [mg C g ⁻¹ TM]	WSC 20°C [mg C g ⁻¹ TM]	WSC 80°C [mg C g ⁻¹ TM]
Torf 100	499 ± 1 a	0,6 ± 0,0 a	6,4 ± 0,2 a	1,2 ± 0,1 a	9,2 ± 0,6 a,d
Heide 100	220 ± 2 b	0,9 ± 0,1 a,b	7,5 ± 0,5 b	1,1 ± 0,1 a	8,3 ± 0,6 a
Heide 50	397 ± 1 c	0,7 ± 0,1 a,b	6,4 ± 0,1 a	1,2 ± 0,1 a	9,1 ± 0,5 a,d
Erle 50	477 ± 1 d	1,2 ± 0,0 b	10,7 ± 0,5 c	1,2 ± 0,0 a	10,7 ± 0,5 b
Erle 25	486 ± 1 e	0,9 ± 0,0 a,b	8,8 ± 0,2 d	0,9 ± 0,0 a	8,8 ± 0,2 a
Typha 50	475 ± 0 d	1,9 ± 0,6 c	11,4 ± 0,6 e	2,8 ± 0,3 b	13,5 ± 0,8 c
Typha 25	485 ± 1 e	0,9 ± 0,1 a,b	8,5 ± 0,5 d	1,6 ± 0,1 c	10,1 ± 0,4 b,d

3.4.5 Lignin

Der Ligninanteil wurde nach der Kupferoxidationsmethode (Kapitel 2.2.4.4) bestimmt, mit der die phenolischen Ligninderivate als Maß der Verholzung quantifiziert werden können. In Böden und Sedimenten kann zusätzlich der Degradationsstatus des Lignins über Verhältnisse bestimmter Derivatgruppen zueinander angezeigt werden. Verschiedene Studien zeigen, dass sich im Zuge der Biodegradation des Lignins, die Säuregruppen der Syringyl- und Vanillin-Einheiten der Ligninderivate gegenüber den entsprechenden Aldehydgruppen anreichern und sich folglich höhere Verhältnisse (acid/ald S,V) dieser Gruppen zueinander ergeben (Amelung et al., 1999; Ertel and Hedges, 1984; Hedges et al., 1988; Otto and Simpson, 2006). Hohe Verhältnisse zeigen an, dass der Abbau der Ligninkomponenten weniger weit vorangeschritten ist und eher leichter abbaubare Anteile des Lignins noch verfügbar sind.

Rohstoffgruppen mit niedrigen (acid/ald S,V)-Verhältnissen und gleichzeitig hohen Ligninanteilen (Summe VSC) müssten folglich das größte Potenzial eher zugänglicher Kohlenstoffquellen des Lignins besitzen und sich in der CO₂-Freisetzung der Inkubationsexperimente widerspiegeln, daher höhere Aktivität der Mikroorganismen ausweisen.

Abb. 26 (A) und Abb. 27 (A) geben die Gesamtsummen der V-, S- und C-Einheiten als Maß des Ligninanteils der Rohstoffe für die jeweiligen Untersuchungsjahre an. Es zeigt sich, dass *Phragmites*, *Typha* und Erle deutliche höhere Ligningehalte aufweisen als Torf und Heide. Betrachtet man hier wieder die Prozesse, die der Weißtorf und das Heidematerial im Zuge ihrer Genese und Entwicklung durchlaufen haben, ist dieses Ergebnis nicht verwunderlich. Vermutlich sind Ligninanteile im Zuge des langen Entwicklungsprozesses des Torfs und der Kompostierung des Heidematerials schon abgereichert und umgesetzt worden, während dies für die übrigen Materialien noch nicht erfolgt ist. Dies wird auch von den (acid/ald S,V)-Verhältnissen der Rohstoffe (Abb. 26 (B) und Abb. 27 (B)) wiedergegeben. So zeigen der Weißtorf und der Heidekompost signifikant höhere Verhältnisse als *Phragmites*, *Typha* und Erle, die sehr geringe, untereinander nicht signifikant unterschiedliche Verhältnisse abbilden.

Kapitel 3: Prüfrasterentwurf im Test

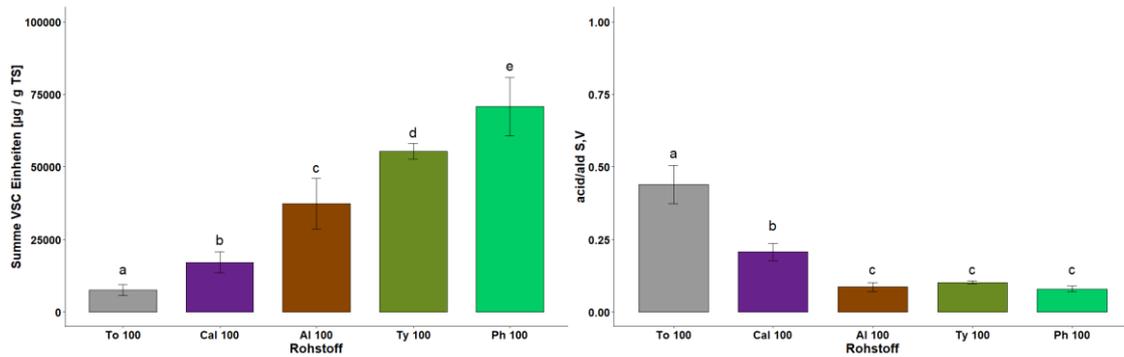


Abb. 26: (A) Ligninanteil als Summe der VSC-Einheiten der jeweiligen Rohstoffe. (B) Säure zu Aldehydverhältnis der S- und V-Einheiten der jeweiligen Rohstoffe. Phase 1 (2017) n=4. Varianzanalyse: ANOVA (A), Kruskal Wallis (B), post-hoc Test: t-Test, $p < 0,05$. Abkürzungen der Varianten siehe Tab. 1.

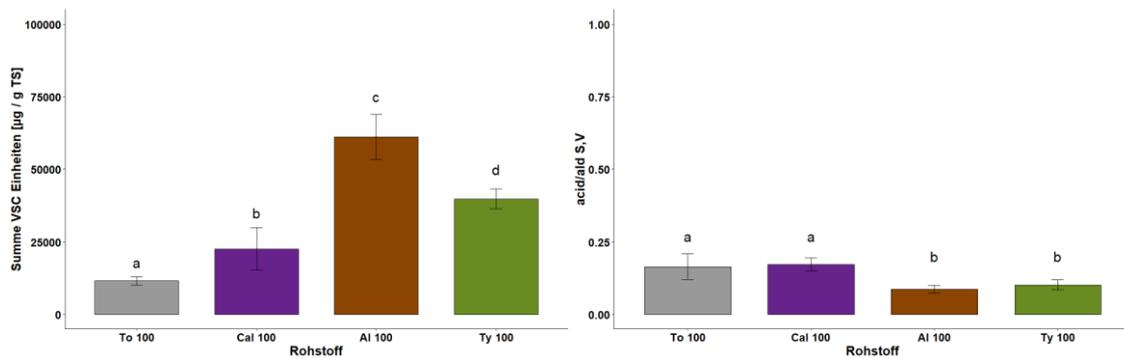


Abb. 27: (A) Ligninanteil als Summe der VSC-Einheiten der jeweiligen Rohstoffe. (B) Säure zu Aldehydverhältnis der S- und V-Einheiten der jeweiligen Rohstoffe. Phase 2 (2018) n=4. Varianzanalyse: ANOVA (A), Kruskal Wallis (B), post-hoc Test: t-Test, $p < 0,05$. Abkürzungen der Varianten siehe Tab. 2.

3.4.6 Hemicellulose, Cellulose, (Roh-)Lignin

Hemicellulose, Cellulose und (Roh-)Lignin stellen den Großteil pflanzlicher Biomasse dar. Dabei ist von diesen Stoffen Hemicellulose am einfachsten für Mikroorganismen abbaubar, darauf folgt Cellulose und am schwersten erfolgt der Abbau von (Roh-)Lignin. Dieser geschieht fast ausschließlich über saprophytische Pilze, indem leicht abbaubare Energiequellen genutzt werden, um das Lignin enzymatisch abzubauen (Leonowicz et al., 1999). Dieser Prozess findet relativ langsam statt.

In Abb. 28 sind die Gehalte von Hemicellulose, Cellulose und (Roh-)Lignin in den Rohstoffen bezogen auf die C-Gehalte in der entsprechenden Fraktion dargestellt. Erle und Heidekompost haben den größten Anteil an Lignin, *Typha* und *Phragmites* die geringsten Anteile. Die Anteile an Cellulose ähneln sich zwischen Torf, *Typha* und *Phragmites*, während Heidekompost den geringsten Anteil aufweist. Die jeweiligen Anteile an Hemicellulose ähneln sich wieder zwischen Torf und Erle, während Hemicellulose in *Typha* und *Phragmites* die größten Anteile darstellt.

Kapitel 3: Prüfrasterentwurf im Test

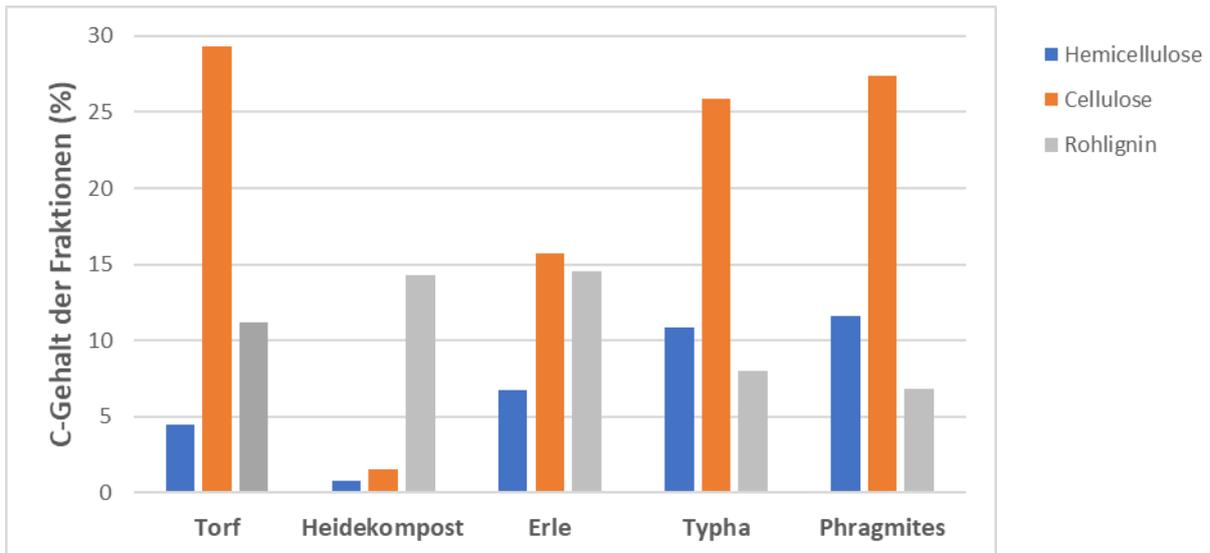


Abb. 28: Hemicellulose, Cellulose und Rohlignin-Gehalte der verschiedenen Rohstoffe in Phase 1 (2017, n=1).

In Phase 2 (2018) zeigen Torf und Heidekompost ähnliche Anteile an Hemicellulose, Cellulose und (Roh-)Lignin (siehe Abb. 29). Bei Erle ist der Anteil von Cellulose um 30 % höher als in Phase 1. Bei *Typha* ist der Anteil an Cellulose im Vergleich zum Vorjahr 75% geringer. Dies könnte auf die Verwendung einer anderen *Typha*-Art und einen anderen Standort zurückzuführen sein. Vergleicht man die Cellulose- und Hemicellulose-Gehalte von nicht kompostiertem Heidematerial und Heidekompost sieht man eine deutliche Abnahme der leicht abbaubaren Verbindungen.

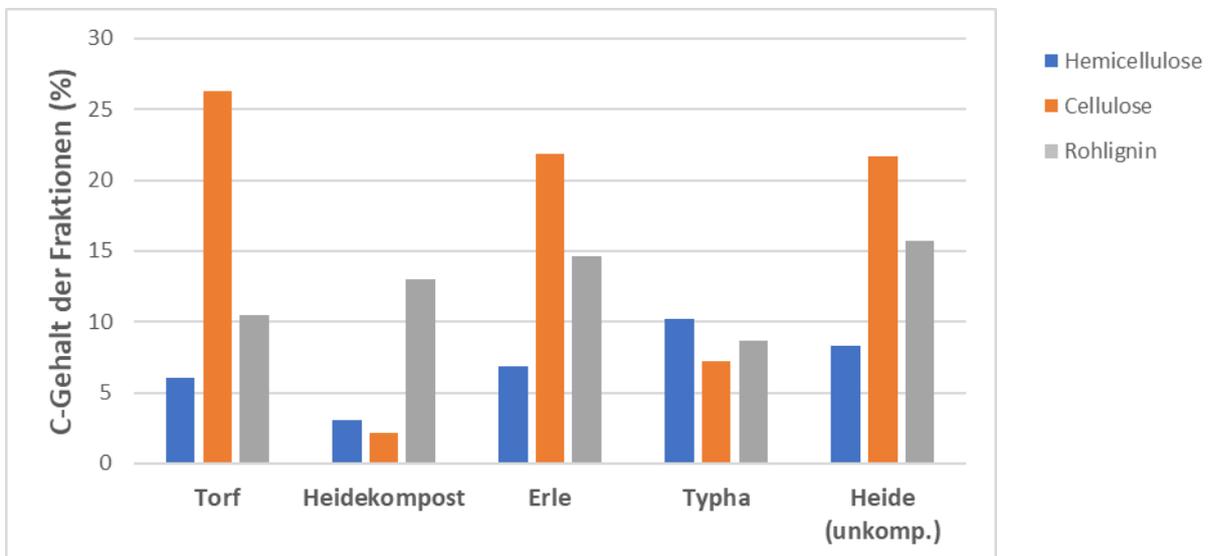


Abb. 29: Hemicellulose, Cellulose und Rohlignin-Gehalte der verschiedenen Rohstoffe in Phase 2 (2018, n=1).

Die hohen Cellulose-Gehalte von Torf weisen auf eine leichte Abbaubarkeit hin, was allerdings nach Ergebnissen in Kapitel 3.4.3 nicht zutrifft. Nach Succow und Joosten (2001) ist Cellulose in Wurzeln meist mit Lignin inkrustiert. Wenn diese sogenannte Lignocellulose einen großen Teil der Wurzelsubstanz ausmacht, wird der mikrobielle Abbau verzögert. Somit stellen Torf und Heidekompost unter diesem Aspekt die stabilsten Rohstoffe dar, wohingegen bei Erle,

Kapitel 3: Prüfrasterentwurf im Test

Typha und *Phragmites* (nur in Phase 1 untersucht) noch ein hoher Anteil an leicht abbaubaren Verbindungen vorhanden ist.

Auch die Gehalte an Hemicellulose, Cellulose und (Roh-)Lignin können dazu verwendet werden, Rückschlüsse auf die Abbaustabilität zu ziehen. Hierzu werden sie in Bezug gesetzt zu den kumulierten CO₂-Freisetzungen über 13 Tage aus Kapitel 3.4.3. Zur Berechnung der Korrelationen wurden die Rohstoffe in den 100% Varianten verwendet (siehe Kapitel 2.3). Die CO₂-Flüsse zeigten in beiden Jahre eine mittlere Korrelation mit dem Gehalt an Hemicellulose ($R^2 = 0,65$ in Phase 1 und $R^2 = 0,60$ in Phase 2). Cellulose und (Roh-)Lignin zeigten keine signifikanten Korrelationen mit den CO₂-Flüssen. Somit kann Hemicellulose verwendet werden, um die Abbaustabilität eines Rohstoffes abzuschätzen. Je höher die Gehalte an Hemicellulose, desto mehr wird der Rohstoff umgesetzt.

3.5 Zwischenfazit: Einstufung der Rohstoffe als Substratausgangsstoffe

Nach dem Durchlaufen der Prüfkriterien I bis IV in Phase 1 (2017) und Phase 2 (2018) konnte eine Einstufung der Rohstoffe (z.T. in Mischung mit Fräsweißtorf) erfolgen. Aufgrund der sehr guten Ergebnisse in der chemischen und physikalischen Analytik, in den Untersuchungen des N-Haushaltes und in den Wachstumstests kann Heidekompost zu 100% und in einer 50%:50% Mischung mit Fräsweißtorf in Praxisversuchen eingesetzt werden. Erle lieferte gehäckselt und gesiebt in den Varianten Erle 50 und Erle 25 mittelmäßige Ergebnisse in der chemischen und physikalischen Analytik und es wurde eine hohe N-Immobilisierung beobachtet. Mit einer angepassten Düngung konnten gute Ergebnisse in den Wachstumstest erzielt werden. Somit ist Erle in einer 50%:50% Mischung mit Fräsweißtorf in Praxisversuchen vermutlich einsetzbar und in einer 25%:75% Mischung mit Fräsweißtorf bei Nachdüngung. *Typha* zeigte gehäckselt und gesiebt in den Varianten *Typha* 50 und *Typha* 25 vielversprechende Ergebnisse in der chemischen und physikalischen Analytik, in den Brutversuchen und Wachstumstests (z.T. Anpassung der Düngung). Somit ist *Typha* in einer 50%:50% Mischung mit Fräsweißtorf in Praxisversuchen vermutlich einsetzbar, wobei Einschränkungen wegen leichter N-Immobilisierung gegeben sind. In einer 25%:75% Mischung mit Fräsweißtorf ist *Typha* bei Nachdüngung einsetzbar. *Phragmites* gehäckselt und gesiebt lieferte in Phase 1 (2017) schlechte Ergebnisse in der chemischen und physikalischen Analytik, in den Untersuchungen des N-Haushaltes und in den Wachstumstests. Daher schied *Phragmites* nach dem ersten Durchlaufen des Prüfrasters vorläufig aus, da in Phase 2 (2018) eine Beschränkung auf drei Rohstoffe erfolgen musste. In Zukunft könnte *Phragmites* durch eine gezielte Änderung der Aufbereitung wie z.B. durch eine Kompostierung das Prüfraster erneut durchlaufen und bessere Ergebnisse erzielen.

3.6 Praxisversuche in verschiedenen Sparten des Gartenbaus

Nachdem einige Rohstoffe das Prüfrasters durchlaufen haben, folgte in Phase 2 (2018) die Überprüfung des entwickelten Prüfrasters durch Praxisversuche in verschiedenen Betrieben. Es wurde geprüft, ob die Ergebnisse aus dem Prüfraster auch unter Praxisbedingungen bestehen bleiben. Die Pflanzenversuche wurden in Praxisbetrieben in drei Sparten des

Kapitel 3: Prüfrasterentwurf im Test

Gartenbaus (Gemüsebau, Zierpflanzenbau, Baumschule) durchgeführt (siehe Tab. 13). Hier wurden die Varianten Torf 100, Heide 100 und Heide 50, Erle 50 und Erle 25 getestet. Aufgrund von logistischen Verzögerungen konnte *Typha* nicht getestet werden.

In einem zertifizierten Biobetrieb wurde Basilikum (*Ocimum basilicum* – Sorte Marian) für 6 Wochen im Gewächshaus kultiviert. Cyclame (*Cyclamen persicum* – Sorte Verano) wurde für 4 Monate im Gewächshaus und Eibe (*Taxus baccata* – Sorte Renkes Kleiner Grüner) für 5,5 Monate in Containern im Freiland kultiviert. Aufgrund der in Vortests beobachteten N-Immobilisierung wurden bei Cyclame und Eibe die Varianten Erle 50 und Erle 25 zum Start höher aufgedüngt und zusätzlich während der Kulturzeit nachgedüngt.

Tab. 13: Allgemeiner Versuchsaufbau des Praxisversuches mit potenziellen neuen Substratausgangsstoffen.

	GEMÜSEBAU	ZIERPFLANZENBAU	BAUMSCHULE
Kultur	<i>Ocimum basilicum</i> (Bio-)Basilikum	<i>Cyclamen persicum</i> Alpenveilchen	<i>Taxus baccata</i> Eibe
Kulturdauer	6 Wochen	4 Monate	5 ½ Monate
Bewässerung	Anstau- bewässerung	Rinnen- bewässerung	Bewässerung mit Gießwagen
Varianten	Torf 100, Heide 100, Heide 50, Erle 50, Erle 25, betriebseigenes Substrat		
Düngung (Start)	Kein N-Ausgleich	N-Ausgleich bei Erle 50 und Erle 25	
Nachdüngung empfohlen	für Erle 50 und Erle 25 aufgrund der Ergebnisse aus dem Prüfraster empfohlen		
Nachdüngung durchgeführt	nein	ja	ja

3.6.1 Praxisversuch im Gemüsebau

Am Ende der Kulturzeit zeigten die Substratvarianten bei *Ocimum basilicum* – Sorte Marian ein sehr unterschiedliches Bild (siehe Abb. 30). Das beste Wachstum wies Basilikum im betriebseigenen Substrat auf. Zwischen Heide 100 und Heide 50 bestand kein signifikanter Unterschied in der Frischmasse (Daten siehe Tab. A 7). Erle 50, Erle 25 und Torf 100 zeigten ein stark verringertes Wachstum. Bei Erle 50 und Erle 25 ist der Grund in einer Zwischenanalyse festgestellter Nährstoffmangel, der trotz Empfehlung nicht ausgeglichen wurde. In eigenen Nachversuchen wurde für Erle 50 und Erle 25 gezeigt, dass bei angepasster Düngung das Kulturziel erreicht werden kann. Bei Torf 100 war der pH-Wert zu hoch eingestellt (7,4 statt 6,4), obwohl zuvor Pufferkurven erstellt wurden. Der Fehler konnte nicht ermittelt werden. Somit war die Kultivierung von Basilikum in den untersuchten Varianten nur teilweise erfolgreich. Die Empfehlungen zur Düngung müssen umgesetzt werden. Außerdem könnte eine Anpassung des Bewässerungsregimes, wie z.B. ein höherer Wasserstand bei der Anstaubewässerung oder eine höhere Bewässerungsfrequenz, den Kulturerfolg verbessern.



Abb. 30: Entwicklung von *Ocimum basilicum* – Sorte Marian in den verschiedenen Varianten am Ende der Kulturzeit (Foto ©Bohne).

3.6.2 Praxisversuch im Zierpflanzenbau

Die Kultivierung der Cyclamen war in allen untersuchten Varianten erfolgreich. Bei *Cyclamen persicum* - Sorte Verano erzielten die Varianten Betriebseigenes Substrat, Torf 100, Heide 50 und Erle 25 die besten Ergebnisse (siehe Abb. 31). Heide 100 und Erle 50 wiesen eine deutlich niedrigere Frischmasse auf (Daten siehe Tab. A 8). Die Anzahl der Blüten und Knospen war bei Heide 50 am höchsten und bei Erle 50 am niedrigsten. Alle anderen Varianten waren gleich gut und lagen dazwischen.



Abb. 31: Entwicklung von *Cyclamen persicum* - Sorte Verano in den verschiedenen Varianten am Ende der Kulturzeit (Foto ©Bohne).

3.6.3 Praxisversuch in der Baumschule

Die Kultivierung der Eiben war in allen untersuchten Varianten erfolgreich. Bei *Taxus baccata* – Sorte Renkes Kleiner Grüner war das Wachstum aller Varianten nach 5 ½ Monaten Kulturzeit gleich gut (siehe Abb. 32) und es zeigten sich keine signifikanten Unterschiede in der Frischmasse (Daten siehe Tab. A 9). Trotz hoher Temperaturen während der gesamten Kulturzeit im Sommer 2018 wurden sehr gute Ergebnisse erzielt. Da die Eiben nach 5 ½ Monaten Kulturzeit beprobt wurden, würde eine zweite Beprobung im Frühling des nächsten Jahres neue Erkenntnisse über die Fähigkeit zum Neuaustrieb liefern.

Kapitel 3: Prüfrasterentwurf im Test

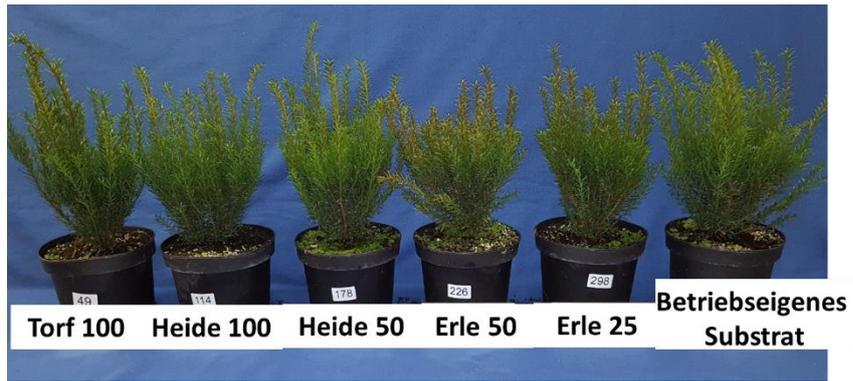


Abb. 32: Entwicklung von *Taxus baccata* – Sorte Renkes Kleiner Grüner in den verschiedenen Varianten nach 5,5 Monaten Kulturzeit (Foto ©Bohne; Leiber-Sauheitl et al., 2020).

4. Modifiziertes Prüfraster

4.1 Modifikationen zum ursprünglichen Prüfrasterentwurf

Nach Abschluss der beiden Versuchsphasen wurde deutlich, dass die Praxisversuche in den verschiedenen Sparten des Gartenbaus, welche mit den aufbereiteten und in PK I bis IV getesteten Rohstoffen durchgeführt wurden, als Prüfkriterium V mit in das Prüfraster aufgenommen werden sollten.

Als Erweiterung zum ursprünglichen Prüfraster müssen noch zusätzliche Prüfkriterien aus den Bereichen Ökonomie und Ökologie ergänzt werden. Rohstoffe wie z.B. die Erle müssten bei einer rein stofflichen Bewertung durch das Prüfraster als Substratausgangstoff ausgeschlossen werden. Bezieht man allerdings die Eignung der Erle als Anbaubiomasse in Paludikultur mit ein und die damit erzielten positiven Effekte auf das Klima, bleibt der Rohstoff für weitere Untersuchungen eventuell mit einer modifizierten Aufbereitung interessant. Im Detail konnten die Prüfkriterien aus den Bereichen Ökonomie und Ökologie im Rahmen dieses Projektes nicht definiert und untersucht werden.

Zudem können in Abhängigkeit der vorliegenden Ergebnisse die Methoden aus Prüfkriterium IV (z.B. Wachstumstest, CO₂-Inkubation) bei Bedarf angepasst werden.

4.2 Prüfraster und Prüfkriterien

Das modifizierte Prüfraster für neue Rohstoffe, die als potenzielle Substratausgangsstoffe dienen können, setzt sich aus mehreren aufeinanderfolgenden Prüfkriterien zusammen, die nacheinander durchlaufen werden (siehe Abb. 33).

Die Prüfkriterien I bis IV werden innerhalb einer Vegetationsperiode oder eines Jahres mit derselben Charge des jeweiligen Rohstoffes durchgeführt (Phase 1). Im darauffolgenden Jahr (Phase 2) durchläuft eine neue Charge des Rohstoffes alle Schritte des Prüfrasters erneut. Wenn dieser Durchlauf wieder bzw. mit der veränderten Aufbereitung erfolgreich war, erfolgen in Prüfkriterium V Tests des neuen potenziellen Substratausgangstoffes unter Praxisbedingungen unter Einbeziehung der Kulturhinweise, die aus den Prüfkriterien I bis IV abgeleitet wurden.

Wenn die Untersuchungen in allen 5 Prüfkriterien des Prüfrasters positive Ergebnisse erzielen, ist ein neuer Rohstoff als nicht torf-basierter Substratausgangstoff identifiziert, der in der Praxis, eventuell unter Einbeziehung von aus dem Prüfraster abgeleiteten Kulturhinweisen eingesetzt werden kann.

Das Prüfraster bietet mit seinen Prüfkriterien eine Struktur, mit der eine systematische und reproduzierbare Untersuchung möglicher neuer Torfersatzstoffe beginnend bei den Rohstoffen möglich ist. Dabei werden zunächst einfache und je nach Ergebnis aufwendigere Untersuchungen eingesetzt. Entscheidungen über das weitere Vorgehen mit einem möglichen Torfersatzstoff können frühzeitig getroffen werden. Daher wurde Schilfrohr vorläufig von weiteren Versuchen ausgeschlossen und Heidekompost, *Typha* und Erle weiter untersucht.

Kapitel 4: Modifiziertes Prüfraster

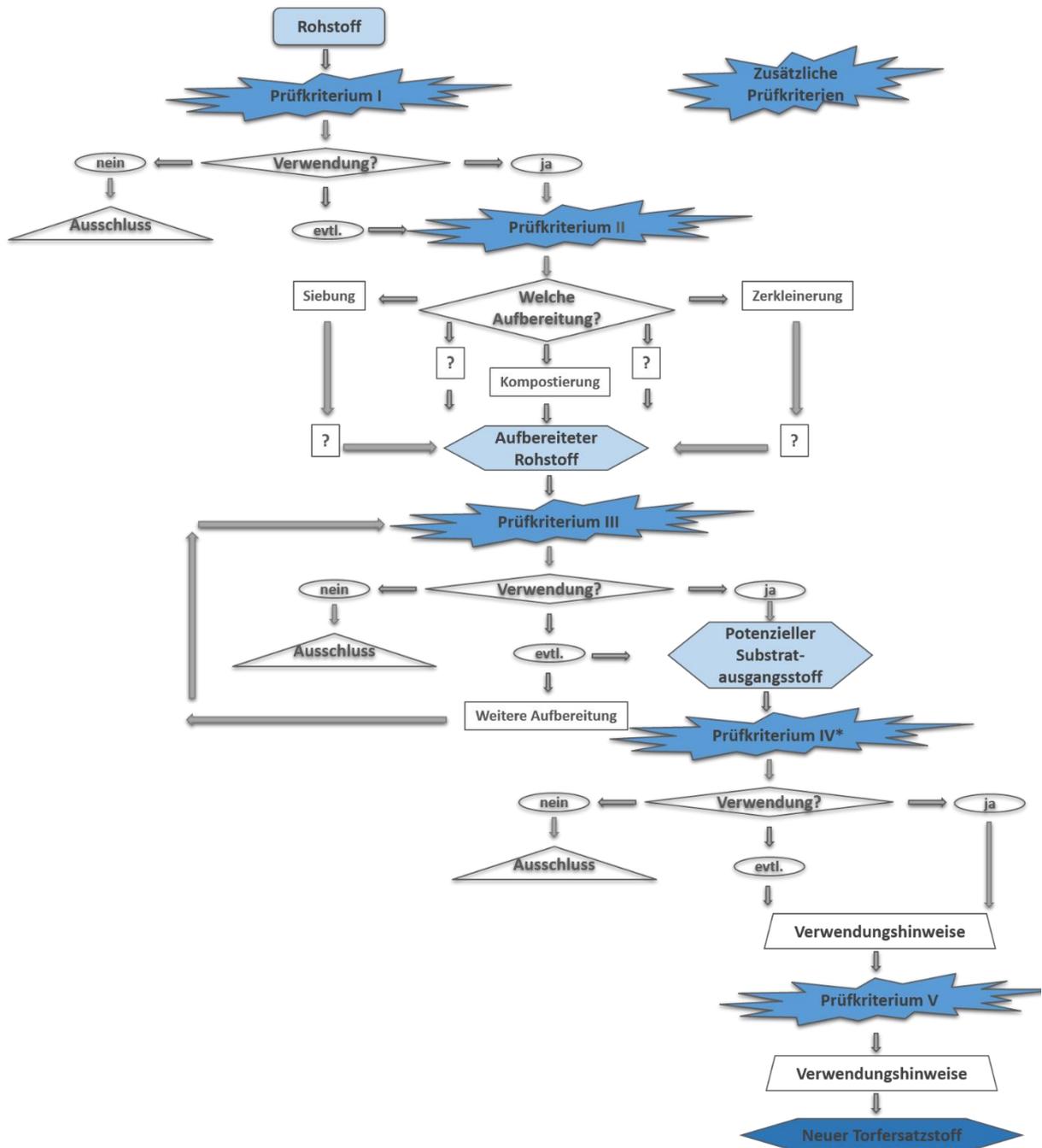


Abb. 33: Modifiziertes Prüfraster für die Herstellung von Torfersatzstoffen mit hoher Kultursicherheit für den Erwerbsgartenbau

Mit Hilfe der Prüfkriterien wurden Kulturrisiken sichtbar, welche bei den untersuchten Rohstoffen die Wasserspeicherfähigkeit und die N-Immobilisierung betrafen. Das Kulturrisiko „N-Immobilisierung“ konnte im Rahmen des Prüfrasters bearbeitet werden. Eine angepasste N-Düngung hat bei den N-immobilisierenden Substraten gute Ergebnisse im Wachstumstest ermöglicht, die in den Praxisversuchen bestätigt wurden. Hier konnte gezeigt werden, dass Heidekompost, Erle und *Typha* durch z.T. angepasste N-Düngung als Substratausgangsstoffe dienen können. Innerhalb von 2 Jahren war es möglich mit Hilfe des Prüfrasters und dessen Prüfkriterien neue Torfersatzstoffe zu identifizieren.

5. Experimente zur Methodenentwicklung

5.1 Erweiterter Keimpflanzentest

Um Informationen über die Anfälligkeit eines Substratausgangsstoffes für Störungen bei der Bewässerung zu erhalten, wurde in diesem Projekt versucht, den Keimpflanzentest nach VDLUFA (2016b) zu erweitern. Zu diesem Zweck wurde ein Keimpflanzentest durchgeführt, in dem untersucht wurde, nach wieviel Tagen die Chinakohlpflanzen in den verschiedenen Varianten von Phase 1 (2017; siehe Tab. 1) und Phase 2 (2018; siehe Tab. 2) erste Anzeichen von Welke zeigten.

In Phase 1 (2017) wurden pro Variante 8 Töpfe entsprechend der Vorgaben des Keimpflanzentestes (VDLUFA, 2016b) bis zum Erreichen des 5. Laubblattes (ca. 21 Tage) kultiviert, wobei 4 der 8 Töpfe als Kontrolle dienten und bis zum Versuchsende nach guter gärtnerischer Praxis bewässert wurden. Bei Erreichen des 5. Laubblattes wurden 4 Töpfe je Variante noch einmal vollständig aufgesättigt, gewogen und dann die Austrocknung gestartet. Ab dem Start der Austrocknung wurden die Töpfe täglich gewogen. Sobald alle 4 Wiederholungen einer Variante 50 % welke Blätter zeigten, wurden abschließend die Töpfe noch einmal gewogen und dann diese sowie 4 Kontrolltöpfe geerntet. Es wurden Frisch- und Trockenmasse sowie NPK-Gehalte i.d.TM bestimmt.

Wie in Abb. 21 zu erkennen, wiesen zu Beginn des Austrocknungsversuches in Phase 1 (2017) Torf 100, Heide 100 und Heide 50 die gleiche Biomasse auf, wohingegen die Biomasse von Typha 50 geringer war und Erle 100 und Erle 50 sowie Phragmites 50 deutlich geringere Biomassen hatten (siehe Tab. A 3), welche durch N-Mangel hervorgerufen wurden. Entsprechend zu den unterschiedlichen Biomassen lag die Zeitdauer bis zur Austrocknung zwischen 3 Tagen (To 100, Cal 100, Cal 50), 5 Tagen (Ty 50) und 7 Tagen (Al 100, Al 50, Ph 50). Um die Auswirkungen einer Störung in der Bewässerung auswerten zu können, muss die Pflanzenbiomasse der untersuchten Varianten gleich sein, was in Phase 1 (2017) nicht beantwortet werden konnte.

Daher wurde in Phase 2 (2018) der Keimpflanzentest modifiziert und die einzelnen Varianten entsprechend der N-Immobilisierung zu Versuchsstart gedüngt und bei Bedarf während des Versuches noch einmal nachgedüngt, um zum Startzeitpunkt der Austrocknung gleiche Biomasse in den verschiedenen Varianten zu erhalten. Da die Welke innerhalb einer Variante nicht an allen Töpfen gleichzeitig auftreten muss, wurden einzelne Töpfe einer Varianten immer dann geerntet sobald sich 50 % welke Blätter zeigten. Zu Beginn der Austrocknung traten bei den verschiedenen Varianten geringere Unterschiede in der Frisch- und Trockenmasse im Vergleich zu Phase 1 (2017, siehe Tab. A 3 und Tab. A 4) auf. Bei der Frischmasse war Heide 100 signifikant verschieden von den anderen Varianten, bei der Trockenmasse war es Typha 50. Diese gleichen Biomasse spiegeln sich auch in der Zeitdauer bis zur Welke wider, welche in Phase 2 (2018) zwischen 1 bis 3 Tagen lag (Ty 50 und Ty 25: 3,5 d; To 100: 2,6 d; Al 50 und Al 25: 2,5 d; Cal 100 und Cal 50: 1 d; Abkürzungen der Varianten siehe Tab. 2). Am Ende der Austrocknung entsprach die Frisch- und Trockenmasse der Chinakohlpflanzen pro Topf bei nahezu allen Varianten der Kontrolle Torf 100 (siehe Tab. A 10). Die Unterschiede in der Zeitdauer bis zur Welke spiegeln auch im zweiten Versuchsjahr die Unterschiede in der Feuchtmasse der Chinakohlpflanzen wider.

Entsprechend der oben genannten Zeitdauer bis zur Welke lässt sich die Zeit vorhersagen, ab der eine Störung in der Bewässerung im Pflanzenbestand sichtbar wird. Allerdings lässt sich damit noch nicht beantworten, ob und wie schnell sich Pflanzen von diesem Wassermangel wieder erholen können. Diese Aspekte müssten in weiteren Experimenten untersucht werden.

5.2 Abbaustabilität mit Stabilisotopenmethode

Methoden zur Qualitätssicherung von Kultursubstraten sollen gewährleisten, dass bei der Verwendung der Substrate keine negativen Auswirkungen auf die Kulturführung und den Ertrag auftreten. Der Kohlenstoffumsatz in Kultursubstraten beeinflusst viele qualitätsbestimmende Eigenschaften (z. B. Abbau des Substrats unter Kulturbedingungen, Strukturstabilität, Stickstoffhaushalt). Zurzeit gibt es keine Methoden, die den Kohlenstoffumsatz in situ beschreiben. Daher wurden im Rahmen dieses Projektes Experimente zur Entwicklung einer Methode zur Quantifizierung des Substratabbaus durchgeführt. Hierzu wurden Untersuchungen des Kohlenstoffabbaus von Kultursubstraten in Containerkultur in situ durchgeführt und die $\delta^{13}\text{C}$ -Stabilisotopenmethode durch den Einsatz von C4-Pflanzen - *Miscanthus giganteus* und *Zea mays* in C3-Substraten getestet.

5.2.1 Exkurs: Einsatz von Stabilisotopen in der Ökosystemforschung

98,9% des natürlichen Kohlenstoffs kommt in Form von ^{12}C Isotopen vor. Zusätzlich kommen 1,1% als ^{13}C und $10^{-8}\%$ als ^{14}C Isotope vor (Glaser, 2005). Durch kinetische und thermodynamische Prozesse, werden schwerere Isotope wie ^{13}C gegen die leichteren Isotope, durch ihre höhere kinetische Energie, diskriminiert. Daraus resultiert, dass leichtere Isotope relativ zu den schwereren Isotopen in Reaktionsprodukten akkumulieren (Glaser, 2005). Zur Differenzierung zwischen C3 und C4 Pflanzen kann das $^{12}\text{C}:^{13}\text{C}$ Isotopensignal herangezogen werden. Das Verhältnis von $^{12}\text{C}:^{13}\text{C}$ wird in dem von Craig (1953) etabliertem δ -Wert angegeben. Die natürliche Häufigkeit (sog. natural abundance) von ^{13}C ist im Bereich von -26 bis -28 ‰ für C3-Pflanzen und von -12 bis -14 ‰ für C4-Pflanzen (Tieszen, 1991).

Neben der Anwendung in der Bodenkunde z.B. zur Rekonstruktion von historischen Vegetationsänderungen in natürlichen Ökosysteme oder zur Quantifizierung des Abbaus der organischen Bodensubstanz (Balesdent et al., 1993; Boutton et al., 1998), wird die Stabilisotopentechnik zur Quantifizierung des Beitrages zweier verschiedener Kohlenstoffquellen zu einem gemeinsamen Pool in Markierungsexperimenten verwendet (z.B. Hart and Myrold, 1996). Zwei verschiedene Quellen mit unterschiedlicher Isotopenzusammensetzung bilden einen dritten Pool, das resultierende Isotopensignal ist eine Mischung des Isotopensignals der zwei Quellen. Wenn die isotopische Zusammensetzung der beiden Quellen und die des gemischten Pools bekannt ist, kann der quantitative Beitrag der beiden Quellen zum resultierenden Pool berechnet werden. Auf diese Weise kann auch eine Anwendung im Gartenbau zur Quantifizierung des Abbaus eines Kultursubstrats in Betracht gezogen werden.

Kapitel 5: Experimente zur Methodenentwicklung

5.2.2 Experiment zur Bestimmung der Abbaustabilität mit *Miscanthus giganteus*

5.2.2.1 Versuchsbeschreibung

Über eine Versuchsdauer von sechs Monaten wurde *Miscanthus giganteus* (C4-Pflanze, siehe Abb. 34) im Freiland als 5 L-Containerkultur in zwei verschiedene Substrate der Firma Brill Substrate getopft (beides C3-Substrate; LignoPot50 - torfreduziert und ProClassic - 100 % Torf). Es wurden jeweils zwei, bzw. vier Rhizome je Container und Substrat getopft, in vier Wiederholungen mit jeweils vier Containern. Es gab pro Erntetermin je 16 Container mit ursprünglich zwei bzw. vier getopften Rhizomen für jedes Substrat. Für die Kontrollgruppen wurden pro Erntetermin für jedes Substrat vier Container ohne Rhizome getopft. In sechs räumlich getrennten Blöcken wurden die Container nach der Anzuchtzeit auf die Containerstellfläche überführt (siehe Abb. 35), alle Varianten zu Beginn des Versuches gleichmäßig mit 3 kg m^{-3} Osmocote® Exakt® gedüngt und während der Versuchszeit mit einer Tropfbewässerung nach Bedarf bewässert.



Abb. 34: Beispiel für *Miscanthus giganteus* auf einem Feld (©Wikipedia)

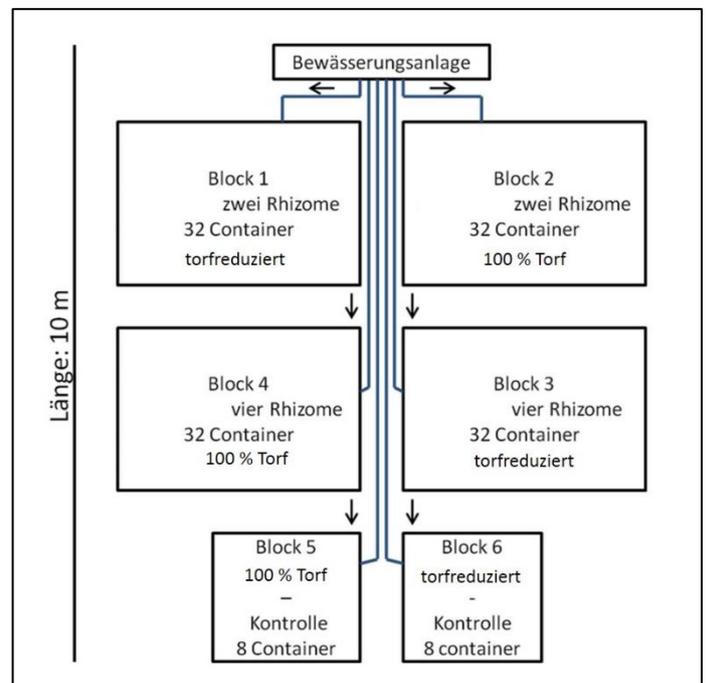


Abb. 35: Schematische Darstellung der Versuchsanlage. Bewässerungsanlage mit sechs angeschlossenen Versuchsblöcken

5.2.2.2 Probenahme

An zwei Ernteterminen wurde der Abbau des Substratkohlenstoffs in Abhängigkeit von der Rhizomanzahl mittels der natural abundance Technik bestimmt.

An jedem Erntetermin wurden vor der Substratuntersuchung alle Container inklusive aller Pflanzenteile gewogen. Nachdem die oberirdischen Teile der Pflanze sowie alle unterhalb des Containers herausstehenden Wurzeln entfernt waren, wurden Gewichtsmessungen der Container durchgeführt. Mit einer Säbelsäge wurden die Ballen in vier gleiche Teile geteilt und jeweils gewogen und verpackt. Eine Hälfte des ursprünglichen Ballens wurde für die Wassergehaltsbestimmung verwendet, ein Viertel für die Stabilisotopenanalytik und ein Viertel für die Wurzeluntersuchung.

Für die Wassergehaltsbestimmung wurden die Hälften für 7 Tage bei $60 \text{ }^\circ\text{C}$ vorgetrocknet und

Kapitel 5: Experimente zur Methodenentwicklung

anschließend für drei Tage bei 105 °C weiter getrocknet. Das Viertel für die Wurzeluntersuchung wurde 24 Stunden bei 60 °C getrocknet. Danach wurden zuerst die äußeren Wurzeln abgetrennt und die restlichen Wurzeln ausgewaschen. Beide Wurzelfractionen wurden für 3 Tage bei 105 °C getrocknet und anschließend gewogen. Das Viertel für die Stabilisotopenmethode wurde 7 Tage bei 60 °C getrocknet und dann mit einer Schneidmühle (Retsch) zerkleinert. Mit Hilfe eines Probenteilers (Riffelteiler 12,5, Retsch) wurde die zerkleinerte Probe fünfmal behandelt. Nach fünf Durchläufen wurde der Rest der Probe, ca. 15 g, in ein Schnappdeckelglas überführt. Die Proben wurden für 24 h bei 60 °C getrocknet und mit einer Schwingmühle (MM 200, Retsch) fein gemahlen.

5.2.2.3 Bestimmung der $\delta^{13}\text{C}$ Werte und des Kohlenstoffabbaus

Die Messung der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte der Proben erfolgte an einem Elementaranalysator (Vario isotope cube, Elementar Analysensysteme GmbH) gekoppelt mit einem Isotopen-Verhältnis-Massenspektrometer (Isoprime 100, Elementar). Von den einzelnen Substrat- und Pflanzenproben wurden je 15 – 20 mg in Zinnschiffchen eingewogen.

Der $\delta^{13}\text{C}$ -Wert der Proben wurde mit Gleichung 3 bestimmt:

$$\delta^{13}\text{C} = \frac{R_{\text{probe}} - R_{\text{Standard}}}{R_{\text{Standard}}} * 1000 = \left(\frac{R_{\text{Probe}}}{R_{\text{Standard}}} - 1 \right) * 1000 \quad \text{Gl.3}$$

Der Standard der $\delta^{13}\text{C}$ - Messung ist relativ zum Vienna Pee Dee Belemnite (VPDB) der Internationalen Atomenergiebehörde IAEA berechnet ($R_{\text{VPDB}} = 0,011237$).

Zur Bestimmung des Kohlenstoffabbaus im Substrat wurde je Container die Differenz der Menge an Kohlenstoff zum Anfangszeitpunkt T_0 und dem Erntetermin T_x bestimmt. Vor dem Topfen der Rhizome in die Substrate wurde jeweils der $\delta^{13}\text{C}$ -Wert bestimmt, die im Folgenden als Ausgangs-, bzw. Referenzwerte für das C3-Substrat bzw. für typischen *Miscanthus* dienten (Details siehe Rohr, 2017).

5.2.2.4 Ergebnisse

Mit zunehmender Kulturdauer von *Miscanthus giganteus* wurden positivere $\delta^{13}\text{C}$ -Werte der Containersubstrate gemessen. Dies gilt für beide Kultursubstrate unabhängig von der Anzahl der getopften Rhizome (siehe Abb. 36). Dies lässt sich mit der mit zunehmender Kulturzeit steigenden Masse von *Miscanthus*Wurzeln begründen (Rohr, 2017). Da zur Bestimmung der Isotope Mischproben aus Substrat und Wurzel benutzt wurden, steigt der $\delta^{13}\text{C}$ -Wert an. Nach drei Monaten Kulturzeit und besonders deutlich nach sechs Monaten Kulturzeit nähert sich der $\delta^{13}\text{C}$ -Wert der Mischproben dem natürlichen Wert von C4-Pflanzen von -13 ‰ an (Glaser 2005).

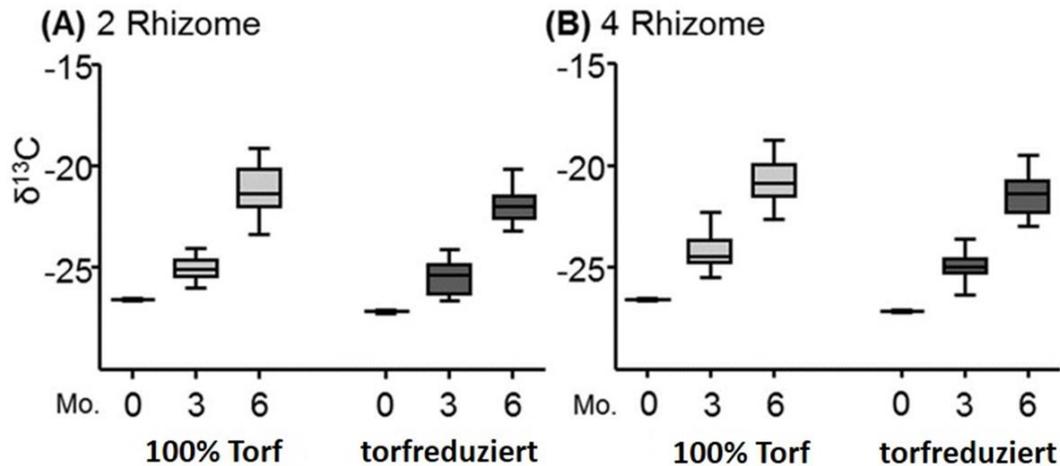


Abb. 36: $\delta^{13}C$ Werte des 100% Torfsubstrats und des torf-reduzierten Substrats in Abhängigkeit von der Anzahl der getopften Rhizome; $n=16$, MW \pm Standardabweichung.

Die Kohlenstoffgehalte der einzelnen Mischproben nehmen über die Versuchszeit zu. Nach sechs Monaten nimmt auch die Wurzelkohlenstoffmenge zu, gleichzeitig nimmt in den Kontrollgruppen ohne getopfte Rhizome der Anteil von Kohlenstoff über die Zeit ab. Dies zeigt, dass die Substrate über die Zeit durch die mikrobielle Atmung an Kohlenstoff verlieren. Der Gesamtkohlenstoffgehalt im Substrat gibt allein keine Aussage über die Kohlenstoffabbaurate unter *Miscanthuskultur*. In beiden Substraten wurde unter *Miscanthuskultur* Substratkohlenstoff abgebaut und neuer Kohlenstoff in Form von Wurzelexsudaten und Wurzeln hinzugefügt.

Der Anteil an pflanzeninduziertem Kohlenstoff (YOC) wurde über die Stabilisotopenmethode bestimmt und es wurde untersucht wieviel YOC im Gesamtkohlenstoff (SOC) vorhanden ist (Balesdent and Mariotti, 1987). Durch die Kultur mit *Miscanthus* als C4-Pflanze und damit einhergehendem C4-YOC lässt sich über die $\delta^{13}C$ -Werte und die Differenz von C3-C4 bestimmen, wieviel C4-YOC im SOC vorhanden ist. Es lässt sich genau herausfinden, wie viel Kohlenstoff aus einer C4-Pflanze stammt und im Vergleich mit den Ausgangswerten lässt sich eine Aussage über den Abbau von C3 Kohlenstoff im Substrat treffen.

In den ersten drei Monaten nach Versuchsbeginn konnte in den eingesetzten Substraten ein Kohlenstoffabbau von ca. 10 % nachgewiesen werden. Nach sechs Monaten gab es keinen weiteren Anstieg des Kohlenstoffabbaus bis zum Ende des Versuches (siehe Abb. 37). Somit konnte die Quantifizierung des Kohlenstoffabbaus in situ erstmals durch den Einsatz der Stabilisotopenmethode unter Kulturbedingungen erfolgen.

Wegen der starken Wurzelbildung von *Miscanthus* sowie der nicht kontrollierbaren Bedingungen im Freiland, wurde das Experiment mit einer anderen C4-Pflanze im Gewächshaus wiederholt.

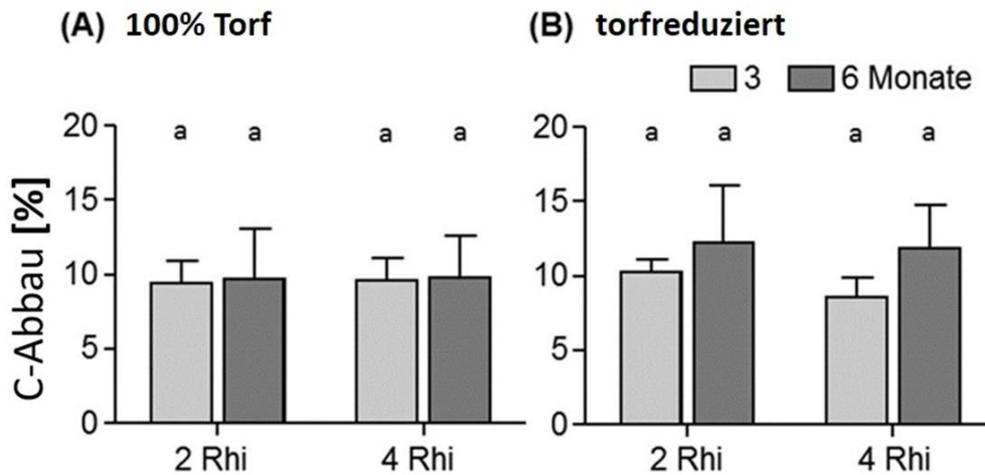


Abb. 37: Abbau des Substratkohlenstoffes des 100% Torfsubstrats (A) und des torf reduzierten Substrats (B) in Abhängigkeit von der Anzahl der getopften Rhizome nach 3 bzw. 6 Monaten Kulturzeit; n=16, MW ± Standardabweichung, zweiseitiger t-Test, p< 0,05.

5.2.3 Experiment zur Bestimmung der Abbaustabilität mit *Zea mays*

Zur Überprüfung der Allgemeingültigkeit der Methode zur Bestimmung der Abbaustabilität in Kultursubstraten mittels der Stabilisotopentechnik wurde ein Versuch mit der C4-Pflanzen Mais (*Zea mays*) durchgeführt.

5.2.3.1 Versuchsbeschreibung

Über eine Versuchsdauer von vier Monaten wurde *Zea mays* (Sorte Golden Bantam) im Gewächshaus in 5 L-Container kultiviert. Drei verschiedene Kultursubstrate (C3) der Firma Brill Substrate wurden verwendet: ProClassic - 100 % Torf, LignoPot50 - torf reduziert und TF Pot PE 10 - torffrei. Je Kultursubstrat wurden 30 Container mit der gleichen Menge an Substrat getopft. In 20 Töpfe je Kultursubstrat wurde je ein Maiskorn gesät und die restlichen 10 Töpfe dienten zur Bestimmung des Hintergrundsignals der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte. Die Töpfe wurden randomisiert auf Tischen aufgestellt und täglich einmal manuell gewässert, bei hohen Temperaturen zweimal täglich. Eine Düngung erfolgte nach Bedarf. Nach 7 Wochen Kulturzeit erfolgte eine Düngung mit einem mineralischen Düngemittel (Ferty® 3 Mega), bei der je Topf 200 mg N zugegeben wurde.

5.2.3.2 Probenahme und -analyse

Am ersten Erntetermin nach 10 Wochen wurden je Substrat 6 Töpfe mit Maispflanzen und 5 Kontrolltöpfe geerntet.

An jedem Erntetermin wurden vor der Substratuntersuchung alle Container inklusive aller Pflanzenteile gewogen. Nachdem die oberirdischen Teile der Pflanze entfernt waren, wurden Gewichtsmessungen durchgeführt. Mit einem Messer wurden die Ballen in zwei gleiche Teile geteilt und jeweils gewogen und verpackt. Eine Hälfte des ursprünglichen Ballens wurde für die Wassergehaltsbestimmung verwendet und die andere Hälfte für die Stabilisotopenanalytik.

Kapitel 5: Experimente zur Methodenentwicklung

Für die Wassergehaltsbestimmung wurden die Hälften für 7 Tage bei 60 °C vorgetrocknet und anschließend für 3 Tage bei 105 °C weiter getrocknet. Die Hälfte für die Stabilisotopenanalytik wurde 7 Tage bei 60 °C getrocknet und dann mit einer Schneidmühle (Retsch) zerkleinert. Mit Hilfe eines Probenteilers (Riffelteiler 12,5, Retsch) wurde die zerkleinerte Probe fünfmal behandelt. Nach fünf Durchläufen wurde der Rest der Probe, ca. 15 g, in ein Schnappdeckelglas überführt. Die Proben wurden für 24 h bei 60 °C getrocknet und mit einer Schwingmühle (MM 200, Retsch) fein gemahlen.

Die Bestimmung der $\delta^{13}\text{C}$ Werte und des Kohlenstoffabbaus erfolgte wie im *Miscanthus*-Versuch (siehe Kapitel 5.2.2.3).

5.2.3.3 Ergebnisse

Wie aufgrund der geringeren Wurzelbiomasse bei *Zea mays* zu erwarten war, stiegen die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte der eingesetzten Substrate weniger stark an, als dies bei *Miscanthus* der Fall war (siehe Abb. 38). Wie bereits im vorangegangenen Experiment beobachtet, vergrößerte sich dabei der Anteil der Wurzeln mit zunehmender Versuchsdauer (siehe Abb. 39).

Über die gesamte Versuchsdauer und über alle Substrate hinweg, waren dabei die $\delta^{13}\text{C}$ -Differenzen zwischen Kontrollen und durchwurzelt Substraten signifikant positiv ($p < 0,05$) und damit eine statistisch gesicherte Differenzierung von wurzel- und substratbürtigem Kohlenstoff möglich.

Aufgrund der im Vergleich zum *Miscanthus*-Experiment kürzeren Beobachtungszeiten, waren die gravimetrischen Differenzen zwischen Substratmengen zu Beginn und zum Beprobungszeitpunkt dabei nicht immer signifikant von Null verschieden (siehe Abb. 40). Damit war ein quantitativer Substratabbau noch nicht statistisch gesichert nachweisbar. Hier sollten künftig längere Beobachtungszeiträume gewählt werden, was aber aufgrund der abgeschlossenen Pflanzenentwicklung bei diesem Experiment nicht möglich war.

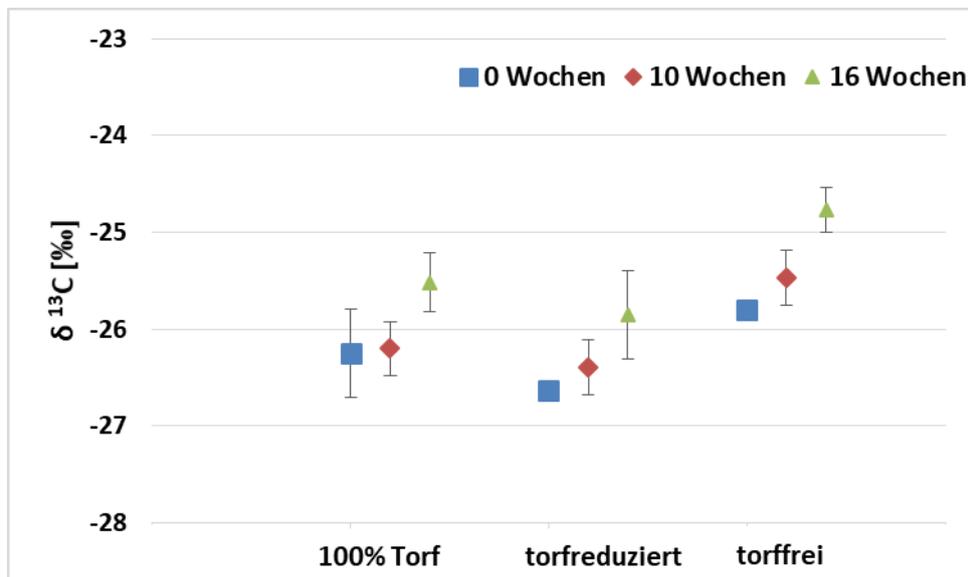


Abb. 38: $\delta^{13}\text{C}$ -Werte des 100% Torfsubstrats, des torf reduzierten und des torffreien Substrats zu den verschiedenen Probenahmeterminen; n=6

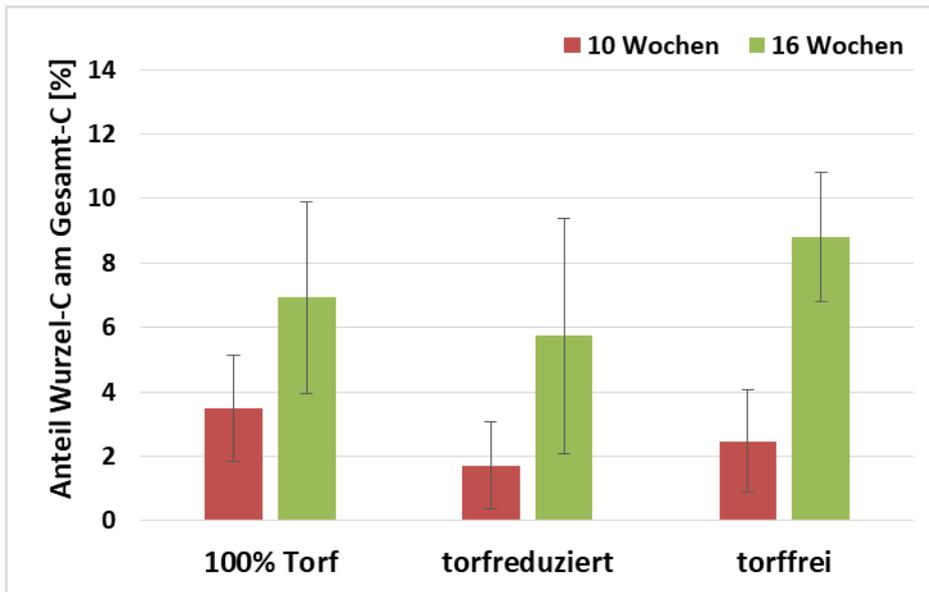


Abb. 39: Anteil der Wurzelbiomasse am Gesamtgewicht des Topfes bei der Probenahme nach 10 und 16 Wochen; n=6.

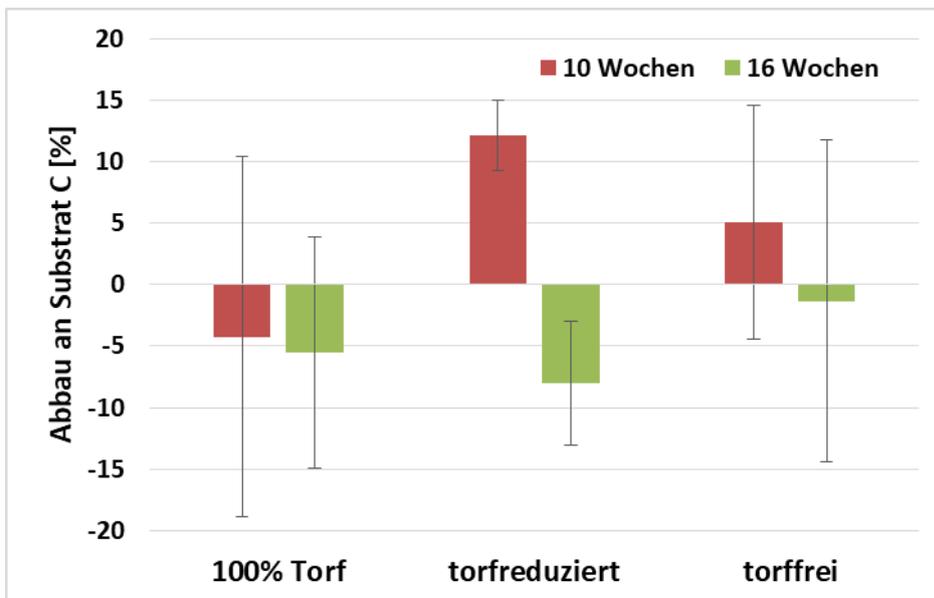


Abb. 40: Abbau des 100% Torfsubstrats, des torfreduzierten und des torffreien Substrats nach 10 und 16 Wochen Kulturzeit; n=6.

Um die Abbaubarkeit von Substraten unter gärtnerischen Bedingungen sicher untersuchen zu können, ist es unabdingbar dies unter Anwesenheit von Pflanzenwurzeln durchzuführen. Da aus einer großen Anzahl von Studien bekannt ist (Bengtson et al., 2012; Kuzyakov, 2002; Paterson, 2003), dass auch schwer abbaubare organische Substanz bei der Zufuhr von leicht verfügbarem Kohlenstoff, wie z.B. über Wurzelexsudate, cometabolisch abgebaut wird, würde ohne Pflanzen die Abbaubarkeit der Substrate unterschätzt. Für eine korrekte Quantifizierung ist es dabei notwendig, die in den Substraten am Ende der Inkubation vorhandenen Wurzeln quantitativ und mit geringem Arbeitsaufwand vom Substrat zu differenzieren.

Unsere Untersuchungen haben gezeigt, dass die Stabilisotopentechnik dabei das Mittel der Wahl ist, da sie selbst bei kurzer Inkubationsdauer eine sichere Differenzierung zwischen

Wurzel und Substrat zulässt. Im Vergleich zur mechanischen Wurzelentfernung ist sie dabei deutlich weniger arbeitsintensiv und erreicht eine höhere Richtigkeit des Ergebnisses, da auch Feinwurzeln erfasst werden, die bei klassischen Methoden zu einem großen Teil verloren gehen.

5.3 Kompostierung von *Typha*-Material

In Phase 2 (2018) wurde durch die Lieferung ganzer *Typha latifolia* -Pflanzen die Möglichkeit gegeben, einen weiteren Aufarbeitungsschritt von *Typha* im Prüfraster zu untersuchen. Durch die positiven Ergebnisse mit *Typha* in den Wachstumsversuchen mit Chinakohl und positive Tendenzen in den N-Immobilisierungsversuchen lag es trotz des hohen C/N-Verhältnisses nahe, an *Typha* als Torfersatzstoff weiter zu forschen. Daher wurde versucht mit Hilfe einer Kompostierung die pflanzenbaulichen Eigenschaften von *Typha* zu verbessern. Hierzu wurde drei verschiedene Komposte angesetzt: *Typha* ohne zusätzliche N-Quelle, *Typha* mit Brennesselsud und *Typha* mit Hornspänen. Im Folgenden werden nur die Ergebnisse von *Typha* mit Hornspänen dargestellt, da diese Kompostierungsvariante die besten Ergebnisse lieferte.

In einem Kompostiergefäße (1 m x 1 m x 0,7 m) wurde der luftgetrocknete Rohstoff *Typha* bis 5 cm unter den oberen Rand locker geschichtet. Um den Kompostierprozess zu starten und generell zu beschleunigen, wurde zum Typhamaterial Frischkompost (Rottegrad II – III) hinzugefügt. Das Material wurde mit 3 g Hornspänen pro Liter versetzt. Die Hornspäne wurden während des Einfüllens in das Kompostiergefäß mit dem Typhamaterial gemischt. Zu Beginn der Kompostierung wurde das Material angefeuchtet, in den Sommermonaten regelmäßig so viel Wasser zugefügt, dass eine optimale Kompostierung gewährleistet war und während der achtmonatigen Kompostierung insgesamt fünfmal gewendet. Zusätzlich wurde die Temperatur in dem Material über den Zeitraum der Kompostierung gemessen. Zu diesem Zweck wurden ein Temperaturlogger (Tinytag Plus 2 – TGP-4510, Gemini Data-Logger, Großbritannien) eingesetzt und stündlich die Temperaturen gemessen. Die Beprobung des Materials erfolgte Ende Mai 2019 nach einer Kompostierdauer von 8 Monaten. Dafür wurde die Miete ein weiteres Mal gewendet und ca. 65 l Material entnommen. Dieses wurde mit einem Mixer (Blixer 3, robot coupe, Vincennes, Frankreich) zerkleinert (< 2mm) und bis zu den Versuchen bei 4 °C, lichtgeschützt im Kühlhaus gelagert (Rohr, 2019)

Um die Eignung des *Typha*-Kompostes als Torfersatzstoff beurteilen zu können, wurden verschiedene chemische, physikalische und biologische Analysen durchgeführt (siehe Tab. 14). Hierzu wurde der *Typha*-Kompost in verschiedenen Mischungsverhältnissen mit Weißtorf untersucht: *Typha*-Kompost 100 Vol. % (Tyko 100), *Typha*-Kompost 50 Vol. % (+50 Vol.% Weißtorf; Tyko 50) und *Typha*-Kompost 25 Vol. % (+75 Vol.% Weißtorf; Tyko 25). Als Vergleichsvariante wurde 100% Weißtorf verwendet (Torf 100).

Die Rohdichten topffeucht der verschiedenen Varianten mit *Typha*-Kompost sind signifikant höher als die von Torf 100, was aus gartenbaulicher Sicht aber als unkritisch zu beurteilen ist. Die maximale Wasserkapazität der Variante Tyko 100 ist geringer als bei Torf. Durch die Mischung von *Typha* mit Torf (Tyko 50, Tyko 25) kann nahezu eine gleich hohe Wasserkapazität wie bei reinem Torf erzielt werden.

Kapitel 5: Experimente zur Methodenentwicklung

Der pH-Wert von Tyko 100 ist gegenüber Torf 100 leicht erhöht. Alle Varianten lassen sich durch eine Zugabe von Kalk auf ein gärtnerisches Niveau einstellen.

Der Salzgehalt bei Tyko 100 ist mit 2,3 g/l Substrat deutlich gegenüber Torf 100 erhöht. Damit liegt der Rohstoff aber noch unter dem Grenzwert für einen Typ I Substratkompost ($\leq 2,5$ g/l; bis zu 40 % Beimischung) laut BGK (2018).

Durch die hohen N_{\min} -Gehalte des *Typha*-Kompostes müssen Kulturen in Abhängigkeit von ihrem N-Bedarf eventuell mit weniger Stickstoff gedüngt werden. Die Phosphor- sowie die Kaliumgehalte sind im Vergleich zu Torf 100 ebenfalls erhöht. Der Kompost weist einen Rottegrad von 5 auf und kann somit als Fertigkompost eingeordnet werden (Prüfbericht Agrolab vom 13.08.2019). Entsprechend der Ergebnisse des Prüfberichtes kann bei *Typha*-Kompost von einem Typ II Substratkompost nach Bundesgütegemeinschaft Kompost ausgegangen werden.

Zudem ist der *Typha*-Kompost frei von potentiellen Schadstoffen (Pb, Cd, Cr, Ni, Hg, Cu, Zn) sowie frei von Salmonellen (Prüfbericht Agrolab vom 13.08.2019).

Tab. 14: Chemische, physikalische und biologische Analyseparameter der verschiedenen Varianten mit *Typha*-Kompost und der Torf-Kontrolle. Angegeben sind Mittelwerte \pm Standardabweichung, n=4 (ausgenommen Salzgehalt mit n=3). Varianzanalyse: Kruskal-Wallis, post-hoc Test: paarweiser t-Test $p < 0.05$.

Parameter	Einheit	Torf 100	Tyko 100	Tyko 50	Tyko 25	Methode
Rohdichte topffeucht	g L ⁻¹ Substrat	283 \pm 24 a	400 \pm 11 b	390 \pm 9 b	402 \pm 5 b	VDLUFA 1997a- A13.2.2
N_{\min} -CAT	mg L ⁻¹ Substrat	15 \pm 1 a	474 \pm 18 b	232 \pm 3 c	122 \pm 2 d	VDLUFA 1997b- A13.1.1
P ₂ O ₅ -CAT	mg L ⁻¹ Substrat	5 \pm 1 a	67 \pm 5 b	34 \pm 5 c	18 \pm 1 d	VDLUFA 1997b- A13.1.1
K ₂ O-CAT	mg L ⁻¹ Substrat	4 \pm 0 a	104 \pm 4 b	49 \pm 1 c	25 \pm 1 d	VDLUFA 1997b- A13.1.1
WK _{max}	%	77 \pm 2 a	52 \pm 1 b	70 \pm 2 c	73 \pm 3 c	VDLUFA 2002 A13.2.3
pH	-	3,3 \pm 0,0	4,6 \pm 0,1	3,5 \pm 0,1	3,4 \pm 0,1	VDLUFA 2016a- A5.1.1
Salzgehalt	g KCl L ⁻¹ Substrat	0,04 \pm 0,0 a	2,3 \pm 0,0 b	1,4 \pm 0,1 c	0,9 \pm 0,1 d	VDLUFA 1991 A10.1.1
Stabilität des Mineralstickstoff-Haushaltes	mg L ⁻¹ Substrat	-13 \pm 49 a	43 \pm 29 *	54 \pm 45 b	-11 \pm 70 a	VDLUFA 2007 A13.5.1

*Tyko 100: Stabilität des Mineralstickstoff-Haushaltes bestimmt mit *Typha*-Material, das 10 Monate kompostiert wurde.

Kapitel 5: Experimente zur Methodenentwicklung

In den Untersuchungen zur Stabilität des N-Haushaltes über 20 Tage (siehe Abb. 41) zeigen Torf 100 und Tyko 25 einen stabilen N-Haushalt nach VDLUFA 2007. Tyko 50 liegt knapp im leicht instabilen Bereich und mobilisiert daher etwas Stickstoff. Auch wenn bei Tyko 50 die Grenze für ein stabiles Substrat leicht überschritten wurde, kann anhand der Ergebnisse von einem relativ abbaustabilen Rohstoff ausgegangen werden. Die Mobilisierung von Stickstoff über die Zeit zeigt, dass organisch gebundener Stickstoff in mineralischen Stickstoff umgewandelt wird. Dies muss bei der Berechnung der Düngermengen und bei der jeweiligen Kulturform (Jungpflanzenanzucht oder mehrmonatige Containerkultur) mitberücksichtigt werden. Ebenso erwies sich die Variante Tyko 100 als stabil, deren N-Haushalt an drei Monate länger kompostiertem Material bestimmt wurde.

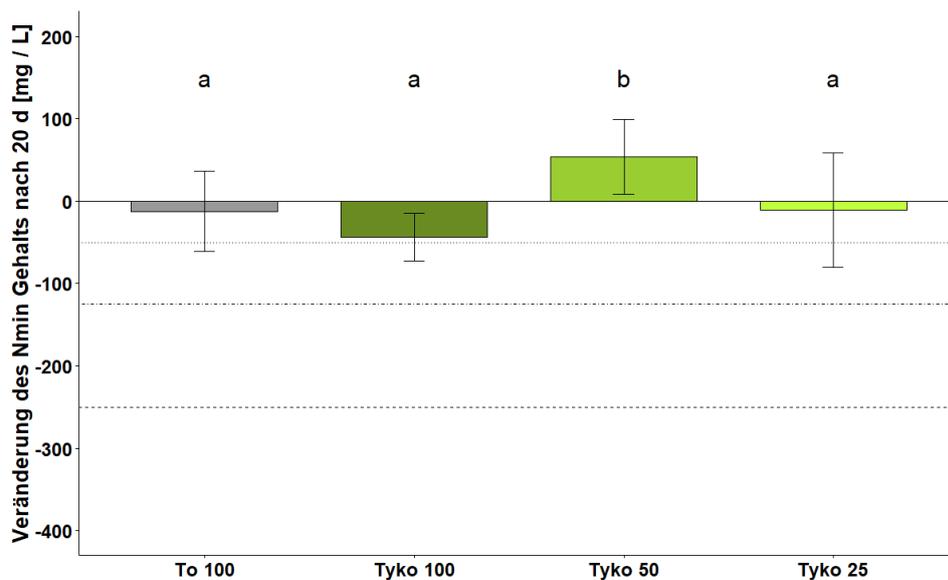


Abb. 41: Veränderung des N_{min}-Gehalts der verschiedenen Varianten von Typhakompost nach 20 Tagen Inkubation, ermittelt nach VDLUFA (2007; To 100 n= 12, Tyko 100, Tyko 50 und Tyko 25 n=16). Tyko 100: Stabilität des Mineralstickstoff-Haushaltes bestimmt mit *Typha*-Material, das 10 Monate kompostiert wurde. Linien in der Abbildung zeigen die Grenzen der verschiedenen Stabilitätsniveaus an. Varianzanalyse: ANOVA, post-hoc Test: paarweiser t-Test, p<0,05.

Somit ist grundsätzlich die Möglichkeit für einen Einsatz des *Typha*-Kompostes als Substratausgangsstoff in der gartenbaulichen Praxis gegeben, da alle untersuchten chemischen, physikalischen und biologischen Eigenschaften dafürsprechen. Der *Typha*-Kompost besitzt im Vergleich zu einem reinen Torf vergleichbar gute Eigenschaften. Als Substratkompost Typ II kann der *Typha*-Kompost ohne größere Einschränkungen bis zu 20 Vol.% beigemischt werden (BGK 2007). Berücksichtigt man die Gehalte an Stickstoff, der über die Zeit mobilisiert wird, kann auch eine 50 Vol.% Beimischung oder eventuell sogar das Produkt als zu 100% Substrat eingesetzt werden.

Zur Absicherung der pflanzenbaulichen Eignung wurde ein Wachstumstest in Anlehnung an VDLUFA (2016b) durchgeführt, der im Herbst/Winter 2019 im Gewächshaus mit Zusatzbeleuchtung für vier Wochen stattfand (siehe Abb. 42). Aufgrund des stabilen N-Haushaltes von *Typha*-Kompost wurden alle Varianten zu Beginn des Versuches gleich aufgedüngt. Am Ende des Wachstumstests zeigten alle untersuchten Varianten eine gleich

Kapitel 5: Experimente zur Methodenentwicklung

gute Entwicklung der oberirdischen Biomasse sowie gleich hohe Nährstoffgehalte in der oberirdischen Biomasse (siehe Tab. 15). Nur bei der Trockenmasse war bei der Variante Tyko 100 ein Unterschied zur Kontrolle Torf messbar.

Somit führte die Kompostierung von *Typha* zu einer Verbesserung der pflanzenbaulichen Eignung im Vergleich zum unkompostierten *Typha*-Material.

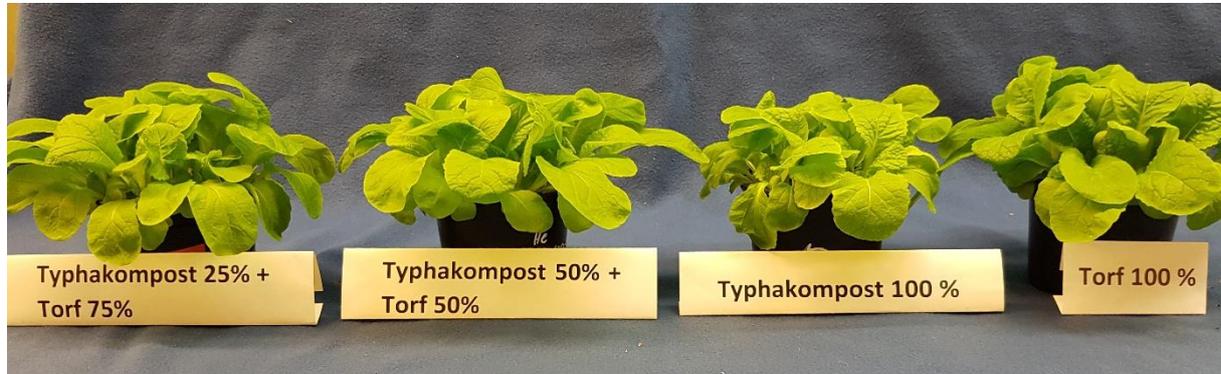


Abb. 42: Wachstum von Chinakohl am Ende des Wachstumstests mit kompostiertem *Typha*-Material (VDLUFA, 2016b), 5 Wiederholungen je Variante.

Tab. 15: Feucht- und Trockenmasse sowie NPK i.d. TS von Chinakohl. MW \pm Standardabweichung, n= 5., Varianzanalyse: ANOVA (außer K i.d. TS Kruskal-Wallis), post-hoc Test: paarweiser t-Test $p < 0,05$.

Variante	Feuchtmasse [g pro Topf]	Trockenmasse [g pro Topf]	% N i.d.TS	% P i.d.TS	% K i.d.TS
Torf 100	28,6 \pm 13,6 a	2,0 \pm 0,2 a	6,1 \pm 0,9 a	0,82 \pm 0,04 a	4,1 \pm 0,5 a
Tyko 100	22,9 \pm 2,6 a	1,3 \pm 0,2 b	6,7 \pm 0,1 a	0,78 \pm 0,02 a	3,8 \pm 0,6 a
Tyko 50	33,9 \pm 2,9 a	1,8 \pm 0,1 a	6,6 \pm 0,4 a	0,78 \pm 0,03 a	3,0 \pm 0,2 a
Tyko 25	32,8 \pm 2,8 a	1,8 \pm 0,2 a	6,4 \pm 0,7 a	0,81 \pm 0,03 a	3,7 \pm 0,9 a

5.4 Einfluss der Lagerung von Erle, Heidekompost und *Typha*

Auf Empfehlung des Projektbeirates wurde bei den Rohstoffen Heidekompost, Erle und *Typha* der Einfluss der Lagerung auf die physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften überprüft. Aus der zweiten Projektphase 2018 lagen noch gelagerten Proben von Erle, Heidekompost und *Typha* vor. Diese wurden im Falle von Heidekompost und Erle bis April 2019 gelagert und dann analysiert. Im Falle von *Typha* stellt die Lagerung eine Kompostierung von Oktober 2018 bis Mai 2019 dar (Ergebnisse siehe Kapitel 5.3).

Im Rahmen einer Masterarbeit (Rohr, 2019) wurden die gelagerten Rohstoffe in den Varianten Heide 100, Heide 50, Erle 50 und Erle 25 untersucht. Eine Übersicht der Basisparameter sowie der Stabilität des N-Haushaltes befindet sich in Tab. 16.

Die physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften von Heide wurden durch die Lagerung kaum verändert (vergleiche Tab. 8 und Abb. 20).

Verglichen mit dem nicht gelagerten Rohstoff Erle zeigt Erle durch die Lagerung günstigere gartenbauliche Eigenschaften. Im Vergleich mit den Ergebnissen von Beyer (2018) mit dem

Kapitel 5: Experimente zur Methodenentwicklung

nicht gelagerten Material erhöhte sich bei der Variante Erle 50 die Rohdichte trocken minimal (+43 g L⁻¹), die Wasserkapazität verändert sich kaum (+2,85 %) und auch die Menge an freigesetzten CO₂ über die Inkubationszeit bleibt nahezu gleich (+2,1 g CO₂ g⁻¹ TS). Es ändert sich vor allem das C/N-Verhältnis (- 30 %) und der K-Gehalt (+167 g L⁻¹). Ebenso sinken die ΔN-Werte der Termine im Brutversuch. So fällt das ΔN von -220 g L⁻¹ auf -127 g L⁻¹ (T2). Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass sich der Rohstoff Erle über die Lagerungszeit etwas stabilisierte (siehe Abb. 20 und Abb. 43).

Tab. 16: Chemische, physikalische und biologische Analyseparameter der verschiedenen Varianten mit gelagerten Rohstoffen. Angegeben sind Mittelwerte ± Standardabweichung, n=4 (ausgenommen Salzgehalt mit n=3), Varianzanalyse: Kruskal-Wallis (außer WK_{max} ANOVA), post-hoc Test: paarweiser t-Test p<0,05.

Parameter	Einheit	Torf 100	Heide 100	Heide 50	Erle 50	Erle 25
Rohdichte trocken	g L ⁻¹ Substrat	89 ± 7 a	268 ± 6 b	198 ± 7 c	152 ± 7 d	137 ± 2 e
N_{min}-CAT	mg L ⁻¹ Substrat	15 ± 1 a	147 ± 6 b	238 ± 9 c	0 ± 0 d	0 ± 0 d
P₂O₅-CAT	mg L ⁻¹ Substrat	5 ± 1 a	97 ± 1 b	54 ± 8 c	55 ± 3 c	23 ± 1 d
K₂O-CAT	mg L ⁻¹ Substrat	4 ± 0 a	724 ± 20 b	374 ± 7 c	310 ± 6 d	158 ± 3 e
WK_{max}	%	77 ± 2 a	84 ± 2 b	84 ± 2 b	71 ± 2 c	77 ± 2 a
pH	-	3,3 ± 0,0	4,5 ± 0,0	3,9	3,7	3,5
Salzgehalt	g KCl L ⁻¹ Substrat	0,03 ± 0,00 a	1,20 ± 0,02 b	0,74 ± 0,00 c	0,28 ± 0,00 d	0,18 ± 0,01 e
C/N	-	55 ± 1 a	18 ± 0 b	24 ± 0 c	45 ± 0 d	52 ± 1 e
Stabilität des Mineralstickstoff-Haushaltes	mg L ⁻¹ Substrat	-13 ± 49 a	6 ± 23 a	-10 ± 54 a	-128 ± 22 b	-117 ± 31 b

Kapitel 5: Experimente zur Methodenentwicklung

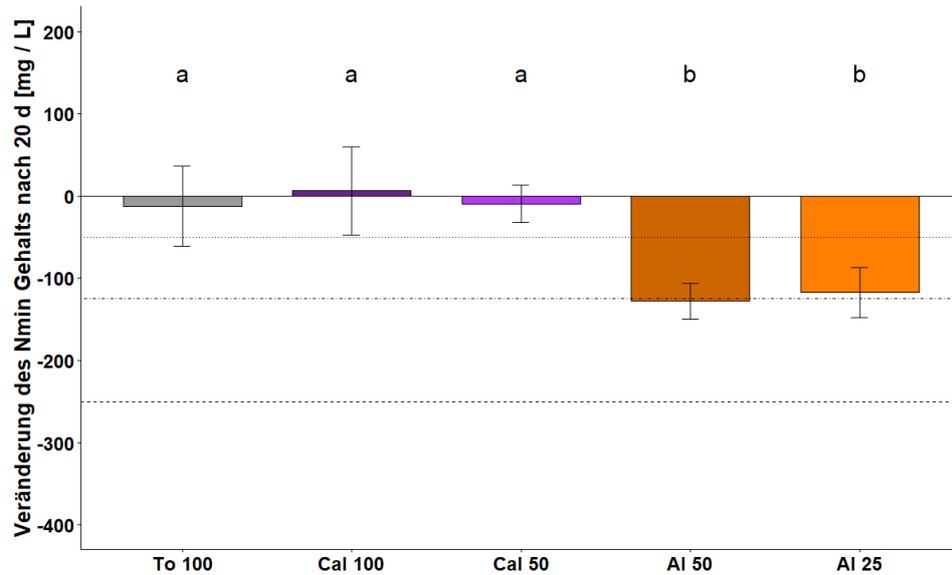


Abb. 43: Veränderung des N_{min}-Gehalts der verschiedenen Varianten mit gelagerten Rohstoffen nach 20 Tagen Inkubation, ermittelt nach VDLUFA (2007; To 100 n= 9, Cal 100 n=12, Cal 50 n=8, Al 50 n=16, Al 25 n=9). Linien in der Abbildung zeigen die Grenzen der verschiedenen Stabilitätsniveaus an. Varianzanalyse: Kruskal-Wallis, post-hoc Test: paarweiser t-Test, p<0,05.

6. Öffentlichkeitsarbeit

Das DBU Projekt „Entwicklung eines Prüfrasters für die Herstellung von Torfersatzstoffen mit hoher Kultursicherheit für den Erwerbsgartenbau“ wurde auf verschiedenen Veranstaltungen und Tagungen im Bereich Gartenbau, Bodenkunde und Nachwachsende Rohstoffe präsentiert (siehe Tab. 17). Darüber hinaus wurden das Projekt und die Projektergebnisse in verschiedenen Beiträgen in Fachzeitschriften veröffentlicht (siehe Tab. 18). Während der gesamten Projektlaufzeit wurden zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses eine Reihe von Abschlussarbeiten verfasst (siehe Tab. 19). Gegen Ende der Projektlaufzeit wurde an der Leibniz Universität Hannover eine Abschlussveranstaltung organisiert und durchgeführt. Hierbei wurden die Projektergebnisse einem breiten Fachpublikum präsentiert und von geladenen Fachleuten weitere Vorträge zu projektbezogenen Inhalten gehalten (siehe Anhang III).

Tab. 17: Übersicht der im Rahmen des Projektes besuchten Fachveranstaltungen mit Beitrag

Veranstaltung	Ort	Datum	Titel
Niedersächsisches Torfersatzforum - AK Gartenbau	Bad Zwischenahn	18.05.2017	Vorstellung des DBU Projekts (Präsentation)
Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft (DBG)	Göttingen	02.09.- 07.09.2017	Evaluierung potentieller Torfersatzstoffe für den Erwerbsgartenbau mit bodenkundlichen Methoden (Poster)
Renewable resources from wet and rewetted peatlands (RRR)	Greifswald	25.09.- 28.09.2017	Development of a tool for the decision making process in identifying peat substitutes for growing media (Poster)
Jahrestagung der Arbeitsgemeinschaft Stabile Isotope	Hannover	09.10.- 11.10.2017	Quantifizierung des Kohlenstoffabbaus in gärtnerischen Substraten unter Kulturbedingungen, Methodenentwicklung mit Hilfe der $\delta^{13}\text{C}$ – Analytik (Poster)
IPS Convention Bremen	Bremen	13.05.- 15.05.2019	Utilization of peat substitutes derived from paludiculture or landscape conservation – Results of a newly developed test procedure
DBG und BGS Konferenz	Bern	24.08.– 29.08.2019	Utilization of composted heather as a potential peat substitute for commercial horticulture and a possibility for landscape conservation (Poster)

Tab. 18: Übersicht der im Rahmen des Projektes veröffentlichten Beiträge

Autoren	Titel	Journal / Zeitschrift	Jahr
H. Bohne, K. Leiber-Sauheitl, J. Böttcher	Prüfraster für die systematische Suche nach Torfersatzstoffen	TASPO	2017 (13.04.17)
K. Leiber-Sauheitl, H. Bohne, J. Böttcher	Heide statt Torf – neue Rohstoffe für Blumenerden	ti! - Technologie Information	2017- Ausgabe 4
K. Leiber-Sauheitl, H. Bohne, J. Böttcher	Peat substitutes from renewable resources and landscape conservation materials	Acta Horticulturae (akzeptiert zur Veröffentlichung)	2020

Tab. 19: Liste der im Rahmen dieses Projektes verfassten Abschlussarbeiten

Autor	Titel	Art der Abschlussarbeit	Jahr
Christian Rohr	Kohlenstoffabbau in gärtnerischen Substraten unter Kulturbedingungen, Methodenentwicklung mit Hilfe der $\delta^{13}\text{C}$ -Analyse	Bachelorarbeit	2017
Fabian Watermann	Physikalische Eigenschaften ausgewählter Torfersatzstoffe	Bachelorarbeit	2017
Jake Beyer	Untersuchung der Abbaustabilität potenzieller Torfersatzstoffe im Vergleich zu einem Kultursubstrat	Masterarbeit	2018
Tristan Lohmeyer	Untersuchung verschiedener Faktoren zur Abbaustabilität potenzieller Torfersatzstoffe im Vergleich zu einem Weißtorf	Bachelorarbeit	2018
Caroline Remmert	Pflanzenverträglichkeit und Stickstoff-Immobilisierung von neuen Torfersatzstoffen	Bachelorarbeit	2019
Christian Rohr	Veränderung der chemischen, physikalischen und biologischen Eigenschaften potenzieller Substratausgangsstoffe durch Lagerung und Kompostierung	Masterarbeit	2019
Leo Eibes	Untersuchung des Stickstoffhaushaltes und der Pflanzenverträglichkeit von kompostiertem Rohrkolben als neuen Torfersatzstoff	Bachelorarbeit	2020

7. Literatur

- AG Boden, 2005. Bodenkundliche Kartieranleitung (German soil mapping guide) - KA5.
- Alef, K., 1991. Methodenhandbuch Bodenmikrobiologie. ecomed Verlag.
- Amelung, W., Flach, K.-W., Zech, W., 1999. Lignin in particle-size fractions of native grassland soils as influenced by climate. *JSSA* 63, 1222–1228.
- Amha Amde, Y., 2011. Microbial activity and biomass of peats in relation to the intrinsic organic matter composition, pH, moisture, and C and N inputs. Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.
- Balesdent, J., Girardin, C., Mariotti, A., 1993. Site-related $\delta^{13}C$ of tree leaves and soil organic matter in a temperate forest. *Ecology* 74, 1713–1721.
- Balesdent, J., Mariotti, A., 1987. Natural ^{13}C abundance as a tracer for studies of soil organic matter dynamics. *Soil Biology and Biochemistry* 19, 25–30.
- Bengtson, P., Barker, J., Grayston, S.J., 2012. Evidence of a strong coupling between root exudation, C and N availability, and stimulated SOM decomposition caused by rhizosphere priming effects. *Ecology and Evolution* 2, 1843–1852.
- Beyer, J., 2018. Untersuchung der Abbaustabilität potenzieller Torfersatzstoffe im Vergleich zu einem Kultursubstrat. Masterarbeit, Leibniz Universität Hannover.
- BGK, 2018. RAL Gütesicherung Kompost – Qualitätskriterien für Substratkompost. Dok. 251-006-3 Stand 07.11.2018.
- BGK, 2006. Rottegrad im Selbsterhitzungsversuch. Methodenbuch Zur Analyse Organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel Und Substrate Kapitel IV.
- Bohne, H., 2007. Influence of a peat-free substrate and kind of fertilizer on the nitrogen- and water balance and on plant growth. *European Journal of Horticultural Science* 72, 53–59.
- Bohne, H., 2004. Growth of nursery crops in peat-reduced and in peat-free substrates. *Acta Horticulturae* 644, 103–106.
- Bohne, H., 1996. Holzfasern statt Torf: Wachstum gleich oder besser. *Deutsche Baumschule* 48, 282–283.
- Boutton, T.W., Archer, S.R., Midwood, A.J., Zitzer, S.F., Bol, R., 1998. $\delta^{13}C$ values of soil organic carbon and their use in documenting vegetation change in a subtropical savanna ecosystem. *Geoderma* 82, 5–41.
- Craig, H., 1953. The geochemistry of the stable carbon isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 3, 53–92.
- D'Angelo, G., Pusterla, M., Castelnovo, M., 1995. Response of peat- and compost-based substrates to different levels of irrigation and fertilization in cyclamen. *Acta Horticulturae* 401, 537–543.
- Dahms, T., Oehmke, C., Kowatsch, A., Abel, S., Wichmann, S., Wichtmann, W., Schröder, C., 2017. Halmgutartige Festbrennstoffe aus nassen Mooren. Universität Greifswald (Hrsg.).

Kapitel 7: Literatur

- Dao, T.T., Gentsch, N., Mikutta, R., Sauheitl, L., Shibistova, O., Wild, B., Schnecker, J., Bárta, J., Čapek, P., Gittel, A., Lashchinskiy, N., Urich, T., Šantrůčková, H., Richter, A., Guggenberger, G., 2018. Fate of carbohydrates and lignin in north-east Siberian permafrost soils. *Soil Biology and Biochemistry* 116, 311–322.
- DIN EN 11540, 2005. Torf und Torfprodukte für den Gartenbau und Garten- und Landschaftsbau – Prüfverfahren, Eigenschaften, Technische Lieferbedingungen. DIN Deutsches Institut Für Normung e. V.
- DIN EN 13041, 2011. Bodenverbesserungsmittel und Kultursubstrate – Bestimmung der physikalischen Eigenschaften – Rohdichte (trocken), Luftkapazität, Wasserkapazität, Schrumpfungswert und Gesamtporenvolumen. DIN Deutsches Institut Für Normung e. V.
- Ertel, J.R., Hedges, J.I., 1984. The lignin component of humic substances: Distribution among soil and sedimentary humic, fulvic, and base-insoluble fractions. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 48, 2065–2074.
- Glaser, B., 2005. Compound-specific stable-isotope ($\delta^{13}\text{C}$) analysis in soil science. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 168, 633–648.
- Härdtle, W., Assmann, T., Van Diggelen, R., Von Oheim, G., 2009. Renaturierung und Management von Heiden, in: Zerbe, Wiegand (Eds.), *Renaturierung von Ökosystemen in Mitteleuropa*. Spektrum, pp. 317–348.
- Hart, S.C., Myrold, D.D., 1996. ^{15}N tracer studies of soil nitrogen transformations, in: Boutton, T.W., Yamasaki, S. (Eds.), *Mass Spectrometry of Soils*. Marcel Dekker Inc., New York, Basel, Hongkong, pp. 225–246.
- Hedges, J.I., Blanchette, R.A., Weliky, K., Devol, A.H., 1988. Effects of fungal degradation on the CuO oxidation products of lignin: A controlled laboratory study. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 52, 2717–2726.
- Hedges, J.I., Ertel, J.R., 1982. Characterization of Lignin by Gas Capillary Chromatography of Cupric Oxide Oxidation Products. *Analytical Chemistry* 54, 174–178.
- Höper, H., 2007. Freisetzung von Treibhausgasen aus deutschen Mooren. *Telma* 37, 85–116.
- Isermeyer, H., 1952. Eine einfache Methode zur Bestimmung der Bodenatmung und der Karbonate im Boden. *Zeitschrift Für Pflanzenernährung Und Bodenkunde* 56, 26–38.
- Joosten, H., Tapio-Biström, M.-L., Tol, S., (eds.), International, F.A.O. and W., 2012. *Peatlands - guidance for climate change mitigation through conservation, rehabilitation and sustainable use*, Mitigation of climate change in agriculture series. FAO and Wetlands International, Rome.
- Katz, R., Hagin, J., Kurtz, L.T., 1985. Participation of soluble and oxidizable soil organic compounds in denitrification. *Biology and Fertility of Soils* 1, 209–213.
- Kögel, I., Bochter, R., 1985. Characterization of lignin in forest humus layers by high-performance liquid chromatography of cupric oxide oxidation products. *Soil Biology and Biochemistry* 17, 637–640.
- Kuzyakov, Y., 2002. Review: Factors affecting rhizosphere priming effects. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 165, 382–396.

Kapitel 7: Literatur

- Leiber-Sauheitl, K., Bohne, H., Böttcher, J., 2020. Peat substitutes from renewable resources and land-scape conservation materials (accepted manuscript). 3rd International Symposium on Growing Media, Compost and Substrate Analysis in Milano, June 24-28 2019. *Acta Horticulturae* xy, xy.
- Leonowicz, A., Matuszewska, A., Luterek, J., Ziegenhagen, D., Wojtaś-Wasilewska, M., Cho, N.S., Hofrichter, M., Rogalski, J., 1999. Biodegradation of lignin by white rot fungi. *Fungal Genetics and Biology* 27, 175–185.
- McGill, W.B., Cannon, K.R., Robertson, J. a., D., C.F., 1986. Organic C in Breton L After 50 Years of Cropping To Two. *Canadian Journal of Soil Science* 66, 1–19.
- Ministerium für Landwirtschaft Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern, 2009. Konzept zum Schutz und zur Nutzung von Mooren.
- Otto, A., Simpson, M.J., 2006. Evaluation of CuO oxidation parameters for determining the source and stage of lignin degradation in soil. *Biogeochemistry* 80, 121–142.
- Paterson, E., 2003. Importance of rhizodeposition in the coupling of plant and microbial productivity. *European Journal of Soil Science* 54, 741–750.
- RAL, 2015. Substrate für Pflanzen - Gütesicherung RAL-GZ 250, Ausgabe Ja. ed. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- Rohr, C., 2019. Veränderung der chemischen, physikalischen und biologischen Eigenschaften potenzieller Substratausgangsstoffe durch Lagerung und Kompostierung. Masterarbeit, Leibniz Universität Hannover.
- Rohr, C., 2017. Kohlenstoffabbau in gärtnerischen Substraten unter Kulturbedingungen, Methodenentwicklung mit Hilfe der d13C-Analyse. Bachelorarbeit, Leibniz Universität Hannover.
- Schäfer, A., Joosten, H., 2005. Erlenaufforstung auf wiedervernässten Niedermooren-ALNUS Leitfaden. DUENE, Greifswald.
- Schmilewski, G.K., 2018. Kultursubstrate und Blumenerden - Eigenschaften, Ausgangsstoffe, Verwendung, Industrieverband Garten e.V. (Hrsg.).
- Succow, M., Joosten, H., 2001. Landschaftsökologische Moorkunde. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Tiemeyer, B., Freibauer, A., Borraz, E.A., Augustin, J., Bechtold, M., Beetz, S., Beyer, C., Ebli, M., Eickenscheidt, T., Fiedler, S., Förster, C., Gensior, A., Giebels, M., Glatzel, S., Heinichen, J., Hoffmann, M., Höper, H., Jurasinski, G., Laggner, A., Leiber-Sauheitl, K., Peichl-Brak, M., Drösler, M., 2020. A new methodology for organic soils in national greenhouse gas inventories: Data synthesis, derivation and application. *Ecological Indicators* 109, 105838.
- Tieszen, L.L., 1991. Natural Variations in the carbon isotope values of plants: implications for archaeology, ecology and paleoecology. *Journal of Archaeological Science* 18, 227–248.
- Timmermann, T., 2003. Nutzungsmöglichkeiten der Röhrichte und Riede wiedervernässter Niedermoore Mecklenburg - Vorpommerns. *Greifswalder Geographische Arbeiten* 31, 31–42.

Kapitel 7: Literatur

- VDLUFA, 2016a. Bestimmung des pH-Wertes. Methodenbuch I A 5.1.1, 7. Teillieferung, VDLUFA-Verlag Darmstadt.
- VDLUFA, 2016b. Keimpflanzentest zum Nachweis von pflanzenschädigenden Stoffen in Kultursubstraten und Substratausgangsstoffen. Methodenbuch I A 10.2.1, 7. Teillieferung, VDLUFA-Verlag Darmstadt.
- VDLUFA, 2012a. Bestimmung der Säure-Detergenzien-Faser (ADF) und der Säure-Detergenzien-Faser nach Veraschung (ADFom). Methodenbuch III 6.5.2, 8. Ergänzungslieferung, VDLUFA-Verlag Darmstadt.
- VDLUFA, 2012b. Bestimmung der Neutral-Detergenzien-Faser nach Amylasebehandlung (aNDF) sowie nach Amylasebehandlung und Veraschung (ANDFom). Methodenbuch III 6.5.1, 8. Ergänzungslieferung, VDLUFA-Verlag Darmstadt.
- VDLUFA, 2012c. Bestimmung des Säure-Detergenzien-Lignins (ADL). Methodenbuch III 6.5.1, 8. Ergänzungslieferung, VDLUFA-Verlag Darmstadt.
- VDLUFA, 2007. Bestimmung der Stabilität des Stickstoffhaushaltes organischer Materialien. Methodenbuch I A 13.5.1, 5. Teillieferung, VDLUFA-Verlag Darmstadt.
- VDLUFA, 2002. Bestimmung der Wasserkapazität (WK) von Substraten und Komposten ohne sperrige Komponenten. Methodenbuch I A 13.2.3, 3. Teillieferung, VDLUFA-Verlag Darmstadt.
- VDLUFA, 1997a. Bestimmung der Rohdichte (Volumengewicht) von gärtnerischen Substraten mit sperrigen Komponenten. Methodenbuch I A 13.2.2, 2. Teillieferung, VDLUFA-Verlag Darmstadt.
- VDLUFA, 1997b. Bestimmung von Haupt- und Spurennährstoffen in Kultursubstraten im Calciumchlorid/ DTPA-Auszug (CAT-Methode. Methodenbuch I A 13.1.1, 2. Teillieferung, VDLUFA-Verlag Darmstadt.
- VDLUFA, 1991. Bestimmung des Salzgehaltes in Böden, gärtnerischen Erden und Substraten. Methodenbuch I A 10.1.1, VDLUFA-Verlag Darmstadt.
- Wichtmann, W., Schröder, C., Joosten, H., 2016. Paludikultur - Bewirtschaftung nasser Moore. Klimaschutz - Biodiversität - regionale Wertschöpfung. Schweizerbart, Stuttgart.
- Wichtmann, W., Wichmann, S., 2011. Paludikultur: Standortgerechte Bewirtschaftung wiedervernässter Paludikultur: Standortgerechte Bewirtschaftung wiedervernässter Moore. TELMA Beiheft 4, 215–234.
- Wrede, A., Bohne, H., 1999. Wachstum von Gehölzen in torfreduzierten/torffreien Containersubstraten unter besonderer Berücksichtigung einer substratangepassten Bewässerung. BDGL-Schriftenreihe 17, 128.
- Zollner, A., Cronauer, H., 2003. Der Wasserhaushalt von Hochmooreinzugsgebieten in Abhängigkeit von ihrer Nutzung, in: Hochwasserschutz Im Wald - Berichte Aus Der Bayerischen Landesanstalt Für Wald Und Forstwirtschaft - Nummer 40. pp. 39–47.

Substrate

Prüfraster für die systematische Suche nach Torfersatzstoffen

Projekt konzentriert sich auf Landschaftspflegematerial oder Anbaubiomasse. Kriterien und Methoden werden pflanzenbaulich überprüft

Die Verfügbarkeit geeigneter Torfe nimmt ab und zum Teil auch die der bisher verwendeten Torfersatzstoffe. Zudem gibt es noch ungelöste analytische und pflanzenbauliche Fragen bei Verwendung von torffreien Substratausgangsstoffen. Aufgrund dieser Situation ist eine über die bisher stattgefundenen Prüfung einzelner Torfersatzstoffe hinausgehende Bearbeitung des Themas „Torfersatzstoffe“ erforderlich.

Die zahlreichen bisher stattgefundenen Versuche mit Torfersatzstoffen stellen einen wertvollen Erfahrungsgewinn dar, bilden aber immer nur bestimmte substrat- und kulturspezifische Situationen ab. In einem von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Forschungsprojekt am Institut für Bodenkunde der Leibniz Universität Hannover wird daher ein Prüfraster mit Kriterien und Methoden entwickelt und in pflanzenbaulichen Versuchen evaluiert.

Generelles Werkzeug zur Eignungsprüfung soll entstehen

Es soll ein generelles Werkzeug für die Eignungsprüfung potenzieller Torfersatzstoffe darstellen. Ein solches Prüfraster hat den Vorteil, dass es unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen (Kulturbedingungen, Rohstoffverfügbarkeit/-preise, Politik, Konsumverhalten) angewendet werden kann. Das Projekt konzentriert sich auf Rohstoffe, die als Landschaftspflegematerial oder Anbaubiomasse anfallen; das Prüfraster kann aber auch für Material aus anderen Quellen angewendet werden.

Mit der möglichen Nutzung von Landschaftspflegematerial und Anbaubiomasse ergeben sich verschiedene Synergieeffekte. Durch Verwenden von standortangepasster Anbaubiomasse als Rohstoff für Torfersatzstoffe wird die Freisetzung von klimarelevanten Gasen aus wiedervernässten Flächen reduziert. Ferner werden



Abb. 1: Heidefläche, die für eine Verjüngung gemäht werden muss.



Abb. 2: Kompostiertes Heidematerial.

Fotos: LUH

ergänzende alternative Einkommensmöglichkeiten für die Landwirtschaft geschaffen. Der Einsatz von Landschaftspflegematerial ermöglicht eine Verbesserung der Pflege von Naturschutzflächen (zum Beispiel Heiden) und damit einen besseren Erhalt geschützter Biotope.

Geplantes Prüfraster enthält umfangreiche Kriterien

Das geplante Prüfraster enthält umfangreiche stoffliche, technologische und pflanzenbauliche Kriterien, die eine Bewertung der Rohstoffe und der aufbereiteten Substratausgangsstoffe ermöglichen. Dazu werden analytische Methoden (chemisch, physikalisch, mikrobiologisch) speziell für die Prüfung von Rohstoffen und neuen Substratausgangsstoffen in Kooperation mit der verarbeitenden Industrie (Rohstoffaufbereitung/Kompostierung, Substratherstellung) weiterentwickelt.

Zurzeit werden im Rahmen der Gütesicherung mit standardisierten Methoden grundlegende qualitätsbestimmende Eigenschaften der bisher eingesetzten Substratausgangsstoffe ermittelt. Unterdessen gibt es neue potenzielle Rohstoffe für die Herstellung von Torfersatzstoffen mit ei-

nem großen Spektrum stofflicher Eigenschaften. Vor diesem Hintergrund sind weiter entwickelte analytische Methoden mit pflanzenbaulicher/kulturtechnischer Relevanz erforderlich, um mit Hilfe der Beratung die erforderliche Umstellung der Kulturführung zu ermöglichen.

In Versuchen mit Kulturpflanzen werden Kriterien überprüft

Nach einer ersten analytischen stofflichen Prüfung erfolgt bei positiver Bewertung des Rohstoffs die Entscheidung über die Aufbereitungstechnologie. In weiteren analytischen Schritten, mit Hilfe von erweiterten Keimpflanzentests sowie in einer späteren Projektphase durch Versuche mit Kulturpflanzen aus unterschiedlichen Sparten des Erwerbsgartenbaus werden die aus den ersten Analysen gewonnenen Ergebnisse überprüft. So werden die Anforderungen der Praxis bezüglich Kultursicherheit (Düngung, Bewässerung, Pflanzenkrankheiten, Kulturziel) berücksichtigt.

Die analytischen Ergebnisse sollen zusammen mit denen aus der Praxis zu Verwendungshinweisen für den neuen Substratausgangsstoff führen. Es ist ge-

plant, ökologische und ökonomische Aspekte entlang der Wertschöpfungskette Rohstoff – Substratausgangsstoff einzubeziehen.

Erste Ergebnisse aus Vorversuchen mit Heidekompost

Erste Ergebnisse mit verschiedenen Rohstoffen sind aus Vorversuchen vorhanden. Abbildung 1 zeigt eine zu pflegende Heidefläche. Die anfallende Menge wird erfasst. Aufgrund der durchgeführten Analysen erschien eine Verwendung von kompostiertem Material (Abbildung 2) möglich. Der Keimpflanzentest nach VDLUFA (www.vdlufa.de) zeigte in einer Mischung des Heidekomposts mit einem Torfsubstrat (50/50) ein zufriedenstellendes Wachstum der Pflanzen. Weitere Analysen und Versuche sollen zu einer endgültigen Bewertung und zu Verwendungshinweisen führen.

(Heike Bohne, Katharina Leiber-Sauheitl, Jürgen Böttcher, Institut für Bodenkunde der Leibniz Universität Hannover)
Weitere Infos beim Institut für Bodenkunde: <http://bit.ly/2nxLJPG> und der DBU: <http://bit.ly/2nUmfal>

Abb. A 2: Artikel zum DBU-Projekt veröffentlicht in „ti! Technologie-Informationen“ - Wissen und Innovationen aus niedersächsischen Hochschulen, Arbeitskreis der Technologietransferstellen niedersächsischer Hochschulen, Ausgabe 4- 2017.

20

Praxis

Heide statt Torf — neue Rohstoffe für Blumenerden

Torf wird nach wie vor großflächig für Blumenerde und Kultursubstrate für den Gartenbau abgebaut – mit weitreichenden Konsequenzen für die Umwelt und das Klima. Hannoversche Bodenkundler forschen nach umweltfreundlichen, wirtschaftlichen Alternativen. Anhand eines Prüfrasters untersuchen sie, ob andere Pflanzen, wie zum Beispiel Heide, Torf ersetzen können.

In Deutschland werden etwa 8,5 Millionen Kubikmeter Torf pro Jahr abgebaut, das entspricht dem Volumen von 3.000 olympischen Schwimmbecken. Werden Moore großflächig für Land- und Forstwirtschaft entwässert, setzt das große Mengen an Treibhausgasen frei und verändert den Wasserhaushalt negativ. Zudem geht dabei eine komplexe Landschaft verloren, die biologische Vielfalt schwindet, der Boden degeneriert. Torf ist der Hauptbestandteil von Kultursubstraten und Blumenerden, jedoch sind die einheimischen Vorräte nahezu erschöpft. Torfersatzstoffe wie Kokos- oder Holzfasern werden bisher nur in kleinen Anteilen zugesetzt, da sie andere physikalische und chemische Eigenschaften wie Torf besitzen und damit ein Risiko für Pflanzenkulturen darstellen können.

Um Rohstoffe als Torfersatz zu finden, entwickelt das Institut für Bodenkunde der Leibniz Universität Hannover ein neues Untersuchungsverfahren. Mit dem Prüfraster lassen sich potenzielle Ersatzstoffe systematisch nach stofflichen, technischen und pflanzenbaulichen Kriterien überprüfen und effektiv vergleichen. Gleichzeitig decken die Bodenkundler damit mögliche Kulturrisiken auf und entwickeln Herstellungs- und Steuerungsmaßnahmen für die

Pflanzenkulturen. Als vielversprechend untersuchen sie Heide, Erle, Schilfrohr und Rohrkolben, die zum Teil kompostiert den Ausgangsstoff für Pflanzensubstrate bilden.

Diese Rohstoffe bieten Synergieeffekte: Sie fallen als Schnittmaterial bei der Landschaftspflege an oder stammen als erneuerbare Ressource aus Paludikultur. So nennt man den Anbau auf nassen und vernässten Mooren, um den noch bestehenden Torfkörper zu erhalten und im besten Fall zu erneuern. Das kann die Anwendung neuer Torfersatzstoffe fördern und alternative Einkommensquellen für die Landwirtschaft schaffen. Hierfür entwickeln die Forscher verschiedene physikalische, chemische und mikrobiologische Methoden aus dem Gartenbau und der Bodenkunde in Kooperation mit der verarbeitenden Industrie weiter. Das Projekt wird von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert.

**Leibniz Universität Hannover
Institut für Bodenkunde**

Dr. Katharina Leiber-Sauheitl
Prof. Dr. Heike Bohne
Prof. Dr. Jürgen Böttcher
leiber.sauheitl@ifbk.uni-hannover.de

Kann Heide zu Blumenerde verarbeitet werden? Und wenn ja, wie? Das untersuchen Forscher aus Hannover.



Anhang II: Ergänzende Tabellen

Tab. A 1: Wasser- und Luftkapazität der verschiedenen Varianten bei -10 hPa, -50 hPa und -100 hPa in Phase 1 (2017), ermittelt nach DIN EN 13041 (2011), (n=4, außer bei -100 hPa: Typha 100 n=2, Typha 50 n=1, Phragmites 50 n=5). Varianzanalyse: Kruskal-Wallis (außer LK bei -100 hPa), post-hoc Test: t-Test, p<0,05. Bei -100 hPa wurden Typha 100 und Typha 50 aus der statistischen Analyse ausgeschlossen (=n.d.), da n<3 war.

Varianten 2017	Wasser- kapazität bei -10 hPa	Luft- kapazität	Wasser- kapazität bei -50 hPa	Luft- kapazität	Wasser- kapazität bei -100 hPa	Luft- kapazität
	[Vol%]					
Torf 100	75 ± 4 a	19 ± 4 a	41 ± 1 a	53 ± 1 a	40 ± 1 a	55 ± 1 a
Heide 100	64 ± 3 b	27 ± 3 b	49 ± 2 b	42 ± 2 b	33 ± 1 b	58 ± 1 b
Heide 50	79 ± 1 c	14 ± 1 c	50 ± 5 b	42 ± 5 b	41 ± 1 a	51 ± 1 c
Erle 100	31 ± 1 d	60 ± 1 d	29 ± 1 c	63 ± 1 c	25 ± 1 c	66 ± 1 d
Erle 50	52 ± 2 e	41 ± 2 e	37 ± 2 a	56 ± 5 a	32 ± 1 b	61 ± 1 e
Typha 100	13 ± 1 f	85 ± 1 f	13 ± 1 d	85 ± 1 d	16 ± 1 (n.d.)	82 ± 1 (n.d.)
Typha 50	38 ± 1 g	58 ± 1 d	24 ± 1 e	72 ± 1 e	22 (n.d.)	74 (n.d.)
Phragmites 100	15 ± 1 f	78 ± 1 g	15 ± 0 d	78 ± 0 f	15 ± 1 d	78 ± 1 f
Phragmites 50	40 ± 2 g	54 ± 2 h	26 ± 2 c,e	68 ± 2 g	22 ± 1 e	72 ± 1 g

Tab. A 2: Wasser- und Luftkapazität der verschiedenen Varianten bei -10 hPa, -50 hPa und -100 hPa in Phase 2 (2018), ermittelt nach DIN EN 13041 (2011), (n=4, außer bei -100 hPa: Heide 100 n=2, Typha 50 n=3). Varianzanalyse: Kruskal-Wallis (außer LK bei -100 hPa), post-hoc Test: t-Test, p<0.05. Bei -100 hPa wurden Heide 100 aus der statistischen Analyse ausgeschlossen (=n.d.), da n<3 war.

Varianten 2018	Wasser- kapazität bei -10 hPa	Luft- kapazität	Wasser- kapazität bei -50 hPa	Luft- kapazität	Wasser- kapazität bei -100 hPa	Luft- kapazität
	[Vol%]					
Torf 100	76 ± 2 a	17 ± 2 a	39 ± 1 a	54 ± 1 a	35 ± 2 a,b	58 ± 2 a,b
Heide 100	57 ± 2 b	35 ± 2 b	34 ± 1 a,b	57 ± 1 a	34 ± 0 (n.d.)	58 ± 0 (n.d.)
Heide 50	67 ± 3 c	25 ± 3 c	36 ± 1 a,b	56 ± 1 a	37 ± 2 a	55 ± 2 b
Erle 50	44 ± 1 d	47 ± 1 d	30 ± 1 b	61 ± 1 a	30 ± 1 b	61 ± 1 a
Erle 25	60 ± 1 e	32 ± 1 b	6 ± 3 a,b	55 ± 3 a	36 ± 2 a	56 ± 2 b
Typha 50	66 ± 1 c	27 ± 1 c	38 ± 3 a	55 ± 4 a	36 ± 4 a	57 ± 4 a,b
Typha 25	60 ± 1 e	34 ± 1 b	35 ± 6 a,b	59 ± 6 a	32 ± 1 a,b	62 ± 1 a

Anhang II: Ergänzende Tabellen

Tab. A 3: Frisch- und Trockenmasse sowie NPK-Gehalte der Chinakohlbiomasse in Phase 1 (2017), n=4. Varianzanalyse: Kruskal-Wallis, post-hoc Test: t-Test, p<0,05.

Varianten 2017	Frischmasse [g]	Trockenmasse [g]	N i.d. TS [%]	P i.d. TS [%]	K i.d. TS [%]
Torf 100	41,3 ± 2,2 a	3,4 ± 0,3 a	3,1 ± 0,3 a	0,52 ± 0,05 a	2,1 ± 0,3 a
Heide 100	38,1 ± 3,3 a	3,0 ± 0,5 a	2,8 ± 0,3 a	0,48 ± 0,08 a	4,1 ± 0,6 b
Heide 50	39,0 ± 1,1 a	3,0 ± 0,3 a	2,9 ± 0,3 a	0,49 ± 0,05 a	3,8 ± 0,3 b
Erle 100	8,3 ± 0,3 b	0,9 ± 0,5 b	1,1 ± 0,0 b	0,40 ± 0,10 a	2,1 ± 0,7 a
Erle 50	7,4 ± 1,1 b	0,8 ± 0,4 b	1,0 ± 0,1 b	0,44 ± 0,02 a	2,5 ± 0,1 a
Typha 100	-	-	-	-	-
Typha 50	21,3 ± 1,3 c	2,2 ± 0,2 c	2,0 ± 0,1 c	0,42 ± 0,03 a	2,5 ± 0,3 a
Phragmites 100	-	-	-	-	-
Phragmites 50	6,2 ± 1,2 b	1,0 ± 0,2 b	1,0 ± 0,0 b	0,37 ± 0,09 a	1,9 ± 0,5 a

Tab. A 4: Frisch- und Trockenmasse sowie NPK-Gehalte der Chinakohlbiomasse in Phase 2 (2018), n=4. Varianzanalyse: Kruskal-Wallis (außer P i.d.TS: ANOVA), post-hoc Test: t-Test, p<0,05.

Varianten 2018	Frischmasse [g]	Trockenmasse [g]	N i.d. TS [%]	P i.d. TS [%]	K i.d. TS [%]
Torf 100	39,8 ± 5,2 a,c	3,9 ± 0,5 a	2,2 ± 0,2 a	0,40 ± 0,05 a	1,3 ± 0,1 a
Heide 100	47,1 ± 1,9 b	4,1 ± 0,2 a	2,2 ± 0,2 a	0,44 ± 0,02 a	4,0 ± 0,3 b
Heide 50	43,4 ± 1,4 a,b	4,1 ± 0,2 a	1,9 ± 0,2 a	0,40 ± 0,02 a,c	2,2 ± 0,1 c
Erle 50	43,2 ± 1,8 a,b	3,2 ± 0,3 b,c	3,9 ± 0,4 b	0,20 ± 0,02 b	1,9 ± 0,2 c,d
Erle 25	47,9 ± 3,7 b	3,9 ± 0,2 a,c	3,1 ± 0,1 c	0,24 ± 0,02 b,e	1,7 ± 0,2 d
Typha 50	34,0 ± 4,6 c,d	2,8 ± 0,3 b	3,0 ± 0,3 c	0,34 ± 0,04 c,d	1,1 ± 0,2 a
Typha 25	32,3 ± 1,6 d	3,2 ± 0,1 b,c	2,3 ± 0,2 a	0,30 ± 0,02 d,e	1,3 ± 0,1 a

Anhang II: Ergänzende Tabellen

Tab. A 5: Salzextrahierbare N-Verbindungen der verschiedenen Varianten in Phase 1 (2017) bei 20 °C und 80°C (n=4). Varianzanalyse: Kruskal-Wallis, post hoc Test: t-Test, p<0,05. SSN: Salt Soluble Nitrogen.

Varianten 2017	SSN 20°C [mg N g⁻¹ TM]	SSN 80°C [mg N g⁻¹ TM]
Torf 100	0,28 ± 0,05 a	0,65 ± 0,04 a
Heide 100	0,28 ± 0,04 a	0,78 ± 0,05 b
Heide 50	0,30 ± 0,01 a	0,84 ± 0,02 b
Erle 100	0,03 ± 0,01 b	0,37 ± 0,02 c
Erle 50	0,07 ± 0,01 b	0,41 ± 0,02 c
Typha 100	0,47 ± 0,01 c	0,85 ± 0,07 b
Typha 50	0,32 ± 0,01 a	0,61 ± 0,02 a
Phragmites 100	0,32 ± 0,03 a	0,76 ± 0,08 b
Phragmites 50	0,32 ± 0,01 a	0,61 ± 0,02 a

Tab. A 6: Wasserextrahierbare N-Verbindungen der verschiedenen Varianten in Phase 2 (2018) bei 20 °C und 80°C (n=4). Varianzanalyse: Kruskal-Wallis (außer SSN 20°C: ANOVA), post hoc Test: t-Test, p<0,05. SSN: Salt Soluble Nitrogen, WSN: Water Soluble Nitrogen.

Varianten 2018	SSN 20°C [mg N g⁻¹ TM]	SSN 80°C [mg N g⁻¹ TM]	WSN 20°C [mg N g⁻¹ TM]	WSN 80°C [mg N g⁻¹ TM]
Torf 100	0,25 ± 0,01 a	0,52 ± 0,02 a	0,11 ± 0,01 a	0,41 ± 0,01 a
Heide 100	0,27 ± 0,01 a	0,89 ± 0,02 b	0,34 ± 0,01 b	0,88 ± 0,02 b
Heide 50	0,22 ± 0,02 a	0,69 ± 0,01 c	0,30 ± 0,01 c	0,73 ± 0,01 c
Erle 50	0,05 ± 0,01 b	0,41 ± 0,01 d	0,05 ± 0,01 d	0,41 ± 0,02 a
Erle 25	0,14 ± 0,02 c	0,41 ± 0,03 d	0,14 ± 0,02 a,e	0,41 ± 0,03 a
Typha 50	0,40 ± 0,05 d	0,93 ± 0,05 b	0,28 ± 0,03 c	0,72 ± 0,05 c
Typha 25	0,33 ± 0,04 e	0,70 ± 0,03 c	0,16 ± 0,01 e	0,48 ± 0,02 d

Anhang II: Ergänzende Tabellen

Tab. A 7: Praxisversuche in der Sparte Gemüsebau. Daten zu Frisch- und Trockenmasse (n=10) sowie NPK i.d. TS (n=5) der oberirdischen Biomasse von *Ocimum basilicum* - Sorte Marian. Varianzanalyse: Kruskal-Wallis (außer K i.d. TS: ANOVA), post-hoc Test: t-Test, p<0,05.

Varianten 2018	Frischmasse [g]	Trockenmasse [g]	N i.d. TS [%]	P i.d. TS [%]	K i.d. TS [%]
Torf 100	10 ± 2 a	1,1 ± 0,3 a	4,7 ± 0,2 a,b	0,15 ± 0,04 a	3,9 ± 0,7 a,b
Heide 100	40 ± 7 b	3,9 ± 0,5 b	4,9 ± 0,1 a	0,31 ± 0,04 b	4,5 ± 1,4 a
Heide 50	35 ± 1 b	3,7 ± 0,1 b	4,5 ± 0,1 b	0,14 ± 0,01 a,c	4,0 ± 0,2 a,b
Erle 50	7 ± 1 a	0,9 ± 0,2 a	4,9 ± 0,2 a	0,10 ± 0,02 c	3,3 ± 0,2 a,b
Erle 25	5 ± 1 a	0,7 ± 0,2 a	5,6 ± 0,2 c	0,10 ± 0,01 c	3,3 ± 0,2 b
Betriebseigenes Substrat	51 ± 4 c	5,1 ± 0,3 c	4,6 ± 0,2 a,b	0,18 ± 0,02 a	3,2 ± 0,3 a,b

Tab. A 8: Praxisversuche in der Sparte Zierpflanzenbau. Daten zu Frisch- und Trockenmasse (n=10) sowie NPK i.d. TS (n=5) der oberirdischen Biomasse von *Cyclamen persicum* - Sorte Verano. Varianzanalyse: K i.d. TS und Anzahl der Blüten+Knospen Kruskal-Wallis, Frisch- und Trockenmasse, N i.d. TS und P N i.d. TS: ANOVA, post-hoc Test: t-Test, p<0,05.

Varianten 2018	Frischmasse [g]	Trockenmasse [g]	N i.d. TS [%]	P i.d. TS [%]	K i.d. TS [%]	Anzahl Blüten + Knospen
Torf 100	86 ± 12 a	7,2 ± 0,9 a	2,9 ± 0,1 a	0,28 ± 0,03 a	5,9 ± 0,3 a	49 ± 16 a,b
Heide 100	49 ± 4 b	4,1 ± 0,3 b	2,9 ± 0,2 a	0,27 ± 0,01 a	6,5 ± 0,6 a	45 ± 2 a,b
Heide 50	87 ± 11 a	6,9 ± 1,0 a	3,1 ± 0,2 a,b	0,27 ± 0,05 a	6,8 ± 0,5 a	58 ± 7 b
Erle 50	46 ± 11 b	3,9 ± 0,7 b	2,8 ± 0,2 a	0,27 ± 0,03 a	7,3 ± 1,5 a	34 ± 3 a
Erle 25	66 ± 11 a	5,9 ± 0,8 a	2,7 ± 0,4 a	0,30 ± 0,02 a	6,7 ± 0,5 a	36 ± 13 a,b
Betriebseigenes Substrat	89 ± 20 a	7,3 ± 1,3 a	3,4 ± 0,2 b	0,29 ± 0,03 a	6,8 ± 0,7 a	46 ± 8 a,b

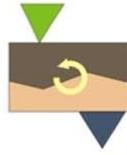
Anhang II: Ergänzende Tabellen

Tab. A 9: Praxisversuche in der Sparte Baumschule. Daten zu Frisch- und Trockenmasse (n=10) sowie NPK i.d. TS (n=5) der oberirdischen Biomasse von *Taxus baccata* - Sorte Renkes Kleiner Grüner. Varianzanalyse: Frisch- und Trockenmasse sowie P i.d. TS Kruskal-Wallis, N i.d. TS, K i.d. TS sowie Sprosslänge: ANOVA, post-hoc Test: t-Test, p<0,05.

Varianten 2018	Frischmasse [g]	Trockenmasse [g]	N i.d. TS [%]	P i.d. TS [%]	K i.d. TS [%]	Sprosslänge [cm]
Torf 100	84 ± 15 a	31 ± 6 a	2,6 ± 0,1 a	0,28 ± 0,03 a	2,0 ± 0,1 a	22 ± 3 a,b
Heide 100	85 ± 10 a	31 ± 4 a	2,5 ± 0,2 a	0,28 ± 0,04 a	2,1 ± 0,1 a	22 ± 1 a,b
Heide 50	102 ± 10 a	38 ± 4 a	2,4 ± 0,1 a	0,26 ± 0,03 a	1,8 ± 0,2 a	24 ± 1 a,b
Erle 50	84 ± 14 a	31 ± 4 a	2,6 ± 0,2 a	0,28 ± 0,04 a	2,0 ± 0,2 a	21 ± 2 a
Erle 25	83 ± 11 a	31 ± 4 a	2,6 ± 0,1 a	0,24 ± 0,06 a	1,9 ± 0,2 a	22 ± 2 a,b
Betriebseigenes Substrat	93 ± 14 a	35 ± 5 a	2,7 ± 0,1 a	0,28 ± 0,01 a	1,8 ± 0,1 a	25 ± 2 b

Tab. A 10: Frisch- und Trockenmasse von Chinakohl pro Topf (n=4) des erweiterten Keimpflanzentests in Phase 2 (2018). Varianzanalyse: Kruskal-Wallis, post-hoc Test: t-Test, p<0,05.

Varianten 2018	Frischmasse [g]	Trockenmasse [g]
Torf 100	29 ± 7 a,c	5,2 ± 0,9 a,b
Heide 100	51 ± 7 b	5,6 ± 0,5 b
Heide 50	40 ± 6 a,b	5,1 ± 0,5 a,b
Erle 50	29 ± 5 a,c	5,0 ± 0,2 a,b
Erle 25	29 ± 3 a,c	5,8 ± 0,5 b
Typha 50	27 ± 4 a,c	4,0 ± 0,2 a
Typha 25	24 ± 4 c	4,5 ± 0,2 a,b



Projektabschlussveranstaltung
Entwicklung eines Prüfrasters
für die Herstellung von Torfersatzstoffen
mit hoher Kultursicherheit für den Erwerbsgartenbau

am 25.02.2020

im Institut für Bodenkunde an der Leibniz Universität in Hannover

Programm

Moderation: Prof. Dr. Jürgen Böttcher

9:30 Uhr *Einlass und Begrüßungskaffee*

10:00 Uhr **Begrüßung und Eröffnung**

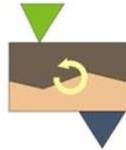
10:10 Uhr **Notwendigkeit von Torfersatzstoffen im Erwerbsgartenbau**
Christopher Straeter,
ML Referat 105 - Nachwachsende Rohstoffe und Bioökonomie

10:35 Uhr **Systematische Untersuchungen zur Ermittlung neuer Torfersatzstoffe mithilfe eines Prüfrasters**
Dr. Katharina Leiber-Sauheitl & Prof. Dr. Heike Bohne,
Institut für Bodenkunde, LUH

11:05 Uhr **Potenzial von Heide als Torfersatzstoff**
Prof. Dr. Michael Rode,
Institut für Umweltplanung, LUH

11:30 Uhr **Potenziale von Paludikulturen als Torfersatzstoffe**
Dr. Colja Beyer,
3N Kompetenzzentrum Niedersachsen, Netzwerk Nachwachsende Rohstoffe und Bioökonomie e.V

11:55 Uhr *Mittagspause*



- 12:55 Uhr **Komposte für den Erwerbsgartenbau - Potenziale und Herausforderungen bei neuen Torfersatzstoffen**
Ulf Meyer zu Westerhausen,
Verband der Humus- und Erdenwirtschaft Region Nord e.V. und
André Nyhoegen,
Olde Bolhaar Eco-Service GmbH
- 13:20 Uhr **Neue Torfersatzstoffe - Chance und Risiko für Substratproduzenten**
Josef Gramann,
Gramoflor GmbH & Co. KG
- 13:45 Uhr **Praktische Erfahrungen mit neuen Torfersatzstoffen in einem Baumschulbetrieb**
Renke zur Mühlen,
Baumschule, Bad Zwischenahn
- 14:00 Uhr **Praktische Erfahrungen mit neuen Torfersatzstoffen in einem Zierpflanzenbaubetrieb**
Wilhelm Westhoff,
Gärtnerei Schulze Eckel, Ahlen
- 14:15 Uhr **Praktische Erfahrungen mit neuen Torfersatzstoffen in einem Gemüsebaubetrieb**
Ludwig Kupke,
Gartenbau Kupke, Papenburg und
Renate Schepers,
Gebr. Brill Substrate GmbH & Co. KG.
- 14:30 Uhr *Kaffeepause*
- 15:00 Uhr **Abschlussdiskussion**
- 15:30 Uhr **Zusammenfassung und Ausblick**
- 15:45 Uhr *Ende der Veranstaltung*