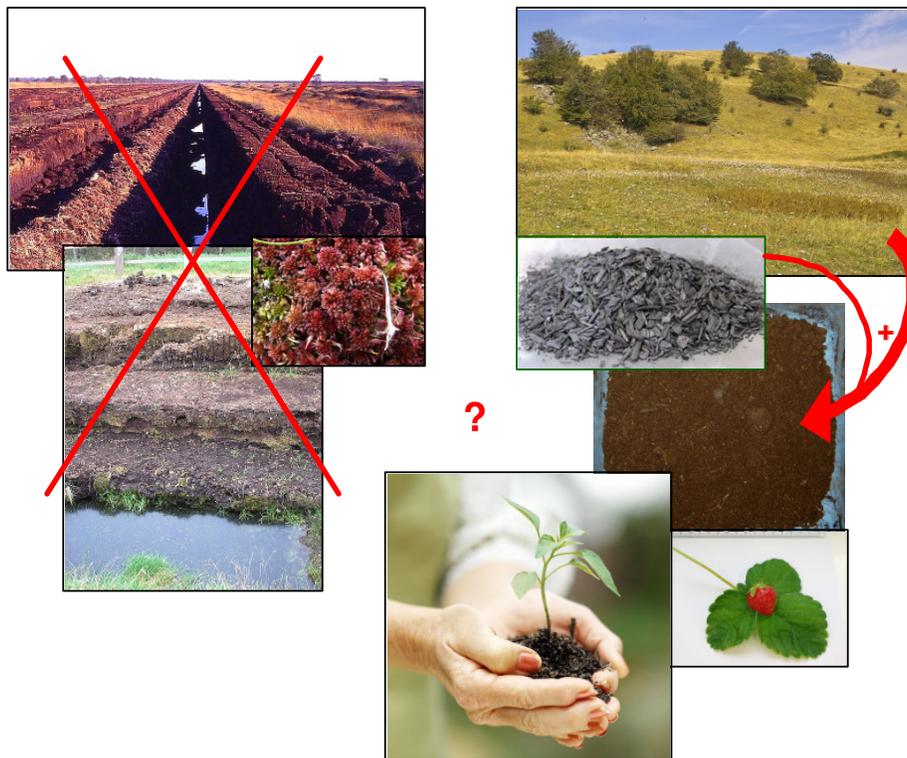


Abschlussbericht
des Projekts



**"C-Sequestrierungspotential und Eignung von Torfersatzstoffen,
hergestellt aus Produkten der Landschaftspflege und Biochar"**

06. Dezember 2010



**Projektdurchführung und Berichtserstellung durch
Dr. Claudia Kammann, Dipl.-Biol. Yvette Kühnel, Dipl.- Biol. Christoph von Bredow und
B.Sc Johannes Gößling**

Projektverantwortlicher: Prof. Dr. Christoph Müller

Projektleitung: Dr. Claudia Kammann (claudia.kammann@uni-giessen.de)

**Institut für Pflanzenökologie, Justus-Liebig-Universität Gießen
Interdisziplinäres Forschungszentrum, Heinrich-Buff-Ring 26-32
35392 Gießen**

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Fragestellung	4
1.1	Moore, Torfgewinnung und der globale Klimawandel	4
1.2	Terra preta und Biochar in Böden: eine neue Idee	5
1.3	Fragestellung des bearbeiteten Projekts	6
1.4	Abkürzungsverzeichnis	7
2	Material und Methoden	8
2.1	Charakterisierung und Vorbereitung der verwendeten Substrate	10
2.1.1	<i>Physikalisch-chemische Substrateigenschaften</i>	10
2.1.2	<i>Zusammenstellen der Substratmischungen</i>	11
2.2	Die Haupt-Pflanzexperimente mit Bewässerungssystem	12
2.2.1	<i>Versuchspflanzen des Hauptversuchs</i>	12
2.2.2	<i>Kulturbedingungen</i>	14
2.2.3	<i>Volldüngung: Verwendete Nährlösung</i>	14
2.2.4	<i>Ernte der Pflanzversuche</i>	15
2.2.5	<i>Statistische Auswertung</i>	15
2.3	Zusatzversuch 1: Erneute Radies.aussaat ohne Bewässerungssystem ...	16
2.4	Zusatzversuch 2: Wachstum von Gerste auf unvermischten Substraten .	16
2.4.1	<i>Verwendete Substrate und Substratmischungen</i>	16
2.4.2	<i>Messung physikalischer und chemischer Bodeneigenschaften</i>	17
2.4.3	<i>Kultivierung, Kulturbedingungen und Bonitierung</i>	17
2.5	Treibhausgasflüsse aus 11 Substratmischungen des Hauptversuchs	17
2.5.1	<i>Versuchsaufbau, untersuchte Substrate</i>	17
2.5.2	<i>Probenahme zur gaschromatographischen Analyse</i>	18
2.5.3	<i>Gaschromatographische Analyse, THG-Flussberechnung und Statistik</i> ...	19
3	Ergebnisse	20
3.1	Ergebnisse zum Pflanzenwachstum	20

3.1.1	<i>Hauptexperiment 1: Radieschenwuchs mit Bewässerungssystem</i>	20
3.1.2	<i>Erdbeeren mit Bewässerungssystem</i>	28
3.1.3	<i>Zusatzversuch 1: Radieschen-Neusaat ohne Bewässerungssystem</i>	34
3.1.4	<i>Zusatzversuch 2: Gerste auf Substraten ohne Bodenbemischung</i>	35
3.2	Ergebnisse der Treibhausgas-Emissionsmessungen	38
3.2.1	<i>Inkubation der gedüngten Pflanzsubstrate – THG-Emissionen</i>	38
3.2.2	<i>Beziehung zwischen Produktivität und THG-Emissionen</i>	43
3.2.3	<i>Wasserüberstauung: CH₄-Produktion aus den Substraten</i>	44
4	Diskussion und Interpretation	45
4.1	Pflanzversuche	45
4.1.1	<i>Komposte als Torfersatzsubstrate?</i>	45
4.1.2	<i>Die Wirkung der Biokohle-Beigaben im Komposten</i>	46
4.2	Treibhausgas-Emissionen	49
4.2.1	<i>Verringerte THG-Emissionen durch Biokohlezugabe</i>	49
4.2.2	<i>Ertrags-THG-Effizienz: Mehr Ertrag bei geringeren THG-Emissionen</i>	49
4.2.3	<i>Ausblicke: Torfersatz, Pflanzenwachstum und THG-Emissionen</i>	50
5	Zusammenfassung	52
6	Danksagung	54
7	Zitierte Literatur	55
8	Anhang: Weitere Ergebnisgraphiken	59

1 Einleitung und Fragestellung

1.1 Moore, Torfgewinnung und der globale Klimawandel

Moore bedecken global etwa 400 Mio. Hektar, was 3 % der Landfläche unseres Planeten entspricht. Der größte Flächenanteil, etwa 350 Mio. ha, liegt auf der Nordhalbkugel und bedeckt große Flächen Nord-Amerikas, Russlands und Europas (Strack, 2008). Die Abtorfung und Torf-Nutzung setzt gespeicherten Kohlenstoff als CO₂ frei: Moore und Torfe speichern einen beträchtlichen Anteil des globalen Bodenkohlenstoffs; allein die Moorflächen der nördlichen Hemisphäre beherbergen 455 Gigatonnen Kohlenstoff (*third IPCC assessment report*, Prentice *et al.*, 2001). Diese C-Menge ist fast genauso groß, wie die gebundene C-Menge der lebenden Biomasse des Planeten. Torfabbau und –nutzung führen entweder früher oder später (durch Verbrennung oder Mineralisierung) zur Freisetzung des im Torf gebundenen Kohlenstoffs in Form von CO₂ (Strack, 2008)¹.

Von den 67 Millionen Kubikmetern des jährlich in der EU abgebauten Torfs werden etwa 37 Mio. m³ für Kultursubstrate und Blumenerden verwendet (ca. 86 % Torfanteil, je nach Hersteller; vgl. Tabelle 2.1). Ein m³ Torf enthält etwa 150-200 kg Kohlenstoff², was bei Freisetzung 550-730 kg CO₂ pro m³ Torf entspricht. In Nordwest- und Nordosteuropa hat Torf noch immer eine große Bedeutung als Brennstoff zur Energiegewinnung (Irland, Finnland, Estland, Schweden, Litauen, Lettland), während der gewerbsmäßige und der private Gartenbau in Deutschland die Hauptverursacher des hohen Torfverbrauchs sind. Auf Deutschland entfallen 13 % des EU-Torfabbaus, wobei ca. 60 % auf den gewerbsmäßigen Gartenbau, 25 % auf den privaten Gartenbau und der Rest auf Energiegewinnung und andere Zwecke entfallen, z.B. für Kosmetik und Medizinprodukte (Succow und Joosten, 2001). Bereits jetzt aber wird verstärkt auf Importe aus Osteuropa und Skandinavien zurückgegriffen, da die deutschen Moorflächen schwinden. In einer Notiz vom 05.04.2010 merkt das BMU an, dass bei einem Fortgang der derzeitigen Zerstörung die zum Abbau genehmigten Torfvorräte in Deutschland spätestens in 10 Jahren erschöpft sein werden³. Dennoch ist Torf gerade für den Erwerbsgartenbau als Substrat bislang aufgrund seiner zahlreichen unübertroffenen Eigenschaften kaum substituierbar (Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen⁴; König und Eysel, 2004). Im Hobbygartenbau wird den käuflichen Substraten jedoch jetzt schon ein gewisser Anteil Kompost zugemischt, auch deshalb, weil die fossile Ressource "Torf" knapper zu werden beginnt.

Theoretisch könnte Torf als erneuerbare Ressource betrachtet werden – über hinreichend lange geologische Zeiträume (Jahrtausende) betrachtet, oder bei entsprechend geringer Entnahmemenge. Faktisch jedoch, über einen geologisch kurzen Zeitraum von einigen Jahrzehnten be-

¹ Zitat aus "Peatlands and Global Change", Executive Summary (Strack, 2008): "As with the extraction of energy peat, horticultural peat extraction requires drainage of the peatland to accommodate machinery and facilitate drying of peat prior to extraction. [...] Although horticultural peat is not consumed instantaneously, it will decompose over time following extraction and result in CO₂ emissions."

² Berechnet mit einer Lagerungsdichte von 300 – 400 kg pro m³ Torf-Trockenmasse

³ www.bmu.de/publikationen/bildungsservice/tipps_der_woche/doc/print/45849.php

⁴ www.lbeg.niedersachsen.de

trachtet, muss Torf als fossiler Kohlenstoff betrachtet werden, der der Atmosphäre durch Verbrennung oder Zersetzung in Gärten in Form von CO₂ wieder hinzugefügt wird (König und Eysel, 2004; Strack, 2008). Damit stellt CO₂ aus Torfabbau für die Atmosphäre ein "Plus" dar, das im Ungleichgewicht mit dem Zustand der letzten Jahrtausende seit Ende der letzten Eiszeit steht.

Moorgebiete setzen Treibhausgase wie Methan frei, binden jedoch CO₂, wenn sie wachsen (z.B. unberührte Moore, oder degradierte Moore durch Renaturierungsmaßnahmen). Werden sie zur Abtorfung trockengelegt, wird der gespeicherte Kohlenstoff oxidiert und zu CO₂, zudem können durch die Belüftung oder bei Düngung große Mengen des starken Treibhausgases N₂O emittiert werden. Der Stand des Wissens derzeit ist, dass bei Bilanzierung dieser gegenläufigen Mechanismen Torfmoore "CO₂-neutral" oder leichte Senken für Treibhausgase sind – auf jeden Fall aber sind sie gigantische Kohlenstoffspeicher, die besser unangetastet bleiben sollten!

Die Entwicklung von Pflanzsubstraten, die keinen Torf enthalten, ist ein langwieriger Prozess, der bisweilen im Bezug auf die Nachhaltigkeit und Klimabilanz kuriose Züge annimmt. So ist z.B. das torffreie Substrat "Kokohum® Blumenerde" der Firma Neudorff tatsächlich frei von Torf (Herstellerangaben). Als Ersatzstoff dienen jedoch Kokosfasern, die über viele tausend Kilometer transportiert worden sind, und im ungünstigen Fall von Urwald- und Moorvernichtenden Kokosplantagen-Monokulturen stammen könnte. Ein weiteres Beispiel: Das torffreie Substrat "Neudohum®" von Neudorff enthält neben Kokosfasern Braunkohle, deren Ausbringung folglich genau wie bei Torf zu fossilen CO₂-Emissionen führt. Andere Substrate schmücken sich mit dem Zusatz "Bio", was bei oberflächlicher Betrachtung auf ein umweltverträgliches, nachhaltig produziertes Substrat hinweist, und dennoch oft auf Torf basiert (Bsp. "Compo Bio Universal Erde", COMPO GmbH & Co. KG). Ansätze, einen Ersatz für Torfprodukte auf Basis von Komposten und Strukturgebenden Stoffen (wie Holzfasern, Hanffasern, Baumnadeln, Stroh, Schilf und ähnlichen als Abfallprodukte anfallende organischen Substanzen) zu schaffen, gibt es bereits in vielfältiger Form (König und Eysel, 2004); einige davon sind bereits für den Endverbraucher erhältlich. Bislang können diese aber oft noch nicht mit den gewohnten positiven Eigenschaften der Torfsubstrate konkurrieren und werden im gewerblichen Gartenbau noch nicht als echte Alternative gesehen⁴ (König und Eysel, 2004).

1.2 Terra preta und Biochar in Böden: eine neue Idee

Angeregt durch die Erforschung der Amazonasschwarzerden (Terra preta) entwickelte sich in den letzten Jahren die Idee, die Bodeneigenschaften vor allem unfruchtbarer, armer Böden durch die Zugabe von "Biochar" (Pyrolyse-Biokohle) zu verbessern (Glaser *et al.*, 2001; Lehmann, 2007). Bisher existieren vornehmlich Studien an tropischen oder stark degradierten Böden, bei denen v.a. bei zusätzlicher Nährstoffgabe diverse pflanzliche Wachstumsparameter signifikant verbessert wurden (Zusammenfassung in Blackwell *et al.*, 2009). Jedoch tritt nicht grundsätzlich in allen Bodenarten und bei allen Nutzpflanzen eine Wachstumsverbesserung ein (z.B. Blackwell *et al.*, 2010; Gaskin *et al.*, 2010; Solaiman *et al.*, 2010; Van Zwieten *et al.*, 2010a); oft sind die Effekte gemischt, positiv wie negativ. Die systematische Erforschung der Wirkung ver-

schiedener Biokohlen auf verschiedene Böden / Pflanzen hat gerade erst begonnen, und für mitteleuropäische Verhältnisse liegen bisher nur wenige Ergebnisse vor.

Unbestritten ist jedoch mittlerweile, dass schwarzer hocharomatischer Pyrolyse-Kohlenstoff zu den langlebigsten Bodenkohlenstoff-Pools überhaupt zählt, langlebiger noch als die dauerhaftesten Humusfraktionen (Brodowski *et al.*, 2006; Cheng *et al.*, 2008; Lehmann *et al.*, 2009). Diese Stabilität (siehe (Kuzyakov *et al.*, 2009) macht "Biochar" als Mittel zur langfristigen Sequestrierung von Kohlenstoff in Böden bzw. Bodensubstratmischungen interessant: Pflanzlicher Kohlenstoff, der zuvor der Atmosphäre mittels Photosynthese entzogen wurde, könnte in stabiler Form als C-Speicherform genutzt werden.

Sinnvoll ist dieses Vorgehen jedoch nur, wenn die Einbringung von Biokohle in Böden, in Komposte oder andere Substrate keine negativen Effekte hat wie z.B. verstärkte Treibhausgas-Emissionen (CO₂, N₂O, ggf. CH₄), oder schlechteres Pflanzenwachstum. In der Praxis könnten Biokohle-Substrate zudem nur dann sinnvoll erzeugt und angewendet werden, wenn sie aus zuvor wertlosen Reststoffen einen "Mehrwert" schaffen, oder sogar aus zuvor teuer zu entsorgenden Abfällen. Ein Beispiel für eine mögliche gewinnbringende⁵ Nutzung wäre die Pyrolyse von Strauchschnitt-Material aus der Landschaftspflege bei Herstellung von Biokohle-Komposten. Wenn diese sich als geeignet erweisen, könnten sie als Torfersatz-Substrate einen überaus wertvollen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Die Erzeugung geeigneter Torfersatzsubstrate, die durch ihren Biokohle-Anteil zur C-Sequestrierung (C-Einbindung) beitragen, anstatt zu einer weiteren CO₂-Freisetzung aus Torf-Mineralisierung oder gar aus weitgereisten Kokosfasern, wäre daher sowohl aus Naturschutz- wie auch aus Klimaschutzsicht ein lohnendes Ziel. Sollten sich diese Ersatzsubstrate darüber hinaus in der Pflanzkultur als gleich gut geeignet, oder sogar als überlegen erweisen, könnten gerade ländliche Räume mit höherem Anteil von Naturschutzflächen mittels geeigneter Stoffstrom-Management-Konzepte von der wertschöpfenden Erzeugung solcher Substrate profitieren. In diesem Projekt soll daher in einem ersten Schritt die prinzipielle Eignung von Biokohle-Substraten im Hinblick auf die CO₂- und N₂O-Bilanz (kurzfristiges C-Sequestrierungspotential) sowie ihre Wirkung auf Pflanzen hin untersucht werden.

1.3 Fragestellung des bearbeiteten Projekts

Die im Projekt untersuchten Fragestellungen waren, da derzeit wenig Erfahrungen mit Biokohle-Komposten als möglichen Torfersatzsubstraten bestehen, zunächst grundsätzlicher Natur: Ist die Nutzung von Biokohle-Substraten als Alternative zu Torfkultur-Substraten durchweg positiv, oder können auch negative Effekte auftreten? Bewirken Biokohle-Substrate gegenüber herkömmlichen Torfkultur-Substraten verstärkte oder verminderte Treibhausgas-Emissionen (N₂O, CH₄)? Verursacht die Zugabe von Biokohle eine raschere oder eine verzögerte Mineralisierung des vorhandenen Kohlenstoffs der Substratmischung (= erhöhte CO₂-Freisetzung)? Und bewirken Biokohlesubstrate ein verringertes oder ein verbessertes Pflanzenwachstum? – Selbst wenn eine mögliche Biokohlewirkung nur kurzfristig für ein schlechteres Wachstum sorgte und an-

⁵ Unter "Gewinn" wird hier nicht allein der wirtschaftliche Gewinn verstanden, der meist die Umsetzbarkeit von Konzepten bestimmt, sondern vor allem der "Gewinn" in Form von eingesparten CO₂-Äquivalenten.

sonsten sehr positive Wirkungen auf die THG-Bilanzen hätte, würde dies die Akzeptanz einer solchen Alternative verhindern. Die durchgeführten Versuche zielten daher darauf, erste Datensätze zu gewinnen, auf deren Basis ein Weg zur regionalen, wertschöpfenden Entwicklung von Torfersatzsubstraten auf Grundlage von Biokohle-Komposten oder –Substraten besprochen werden kann.

1.4 Abkürzungsverzeichnis

Im Projektbericht häufig verwendete Kürzel, Abkürzungen und Begriffe sind:

Begriff, Parameter	Abkürzung im Text / Abb.
Anzahl (Replikation)	n
Bayreuther Kompost	BT Kompost
Biochar	BC
Destilliertes Wasser	A. dest.
Einheitserde	EE
Feuchtwicht (frisch Einwaage)	FG
gegebenenfalls	ggf.
Gramm	g
Grundgemisch Braunerde-Sand: sandige Braunerde	sB
Mikroliter	µl
Mikro-Siemens (Leitfähigkeit)	µS/cm
Milliliter	ml
Millimolar	mM
Minuten	min
molare Masse	M
Polypropylen	PP
Raumtemperatur	RT
Stunden	h
Tag(e)	d
Treibhausgas(e)	THG
Trockengewicht	TG
Vor Allem	v.a.
Wassergehalt	WG

2 Material und Methoden

In dieser Analyse wurden **zwei Torfsubstrate** (Einheitserde ED 73 mit Langzeitdünger, und das handelsübliche Produkt "COMPO SANA® Qualitätsblumenerde") verwendet, die mit Kompost- bzw. Kompost-Biokohle-Alternativen auf deren Eignung als alternative Pflanzsubstrate verglichen wurden. Die beiden Torfprodukte wurden als typische handelsübliche Pflanzsubstrate ausgewählt, da sie einen hohen Torfgehalt aufwiesen, eine in etwa gleiche Nährstoff-Versorgung, und da beide sehr weit verbreitet sind (Tabelle 2.1). Die COMPO SANA Blumenerde war "mit aktiven Mikroorganismen versetzt", ED 73 nicht.

Als Vergleichssubstrate wurden zwei (mit Zusatzversuch: drei) verschiedene **Biochars** pur oder mit verschiedenen Grünschnittkomposten vermischt eingesetzt. Alle Substrate bzw. Substrat-Biochar-Gemische wurden mit einem Braunerde-Sand-Grundgemisch (= sandige Braunerde, im Folgenden "sB" abgekürzt) in einem Anteil von 50:50 Vol.-% (Volumen des Trockenmaterials) angemischt. Bei den verwendeten Biochars handelt es sich um Pyreg®-8⁶ der Firma Pyreg GmbH, und BC-4⁶ von B. Schottdorf, German Charcoal GmbH. Beide Biochar-Produkte waren mittels Pyrolyse aus Grünschnitt hergestellt worden (Strauch- und Heckenschnitt, Straßenrandabfälle, Rasenschnitt u.ä. gilt als "Grünschnitt"). Es wurden Grünschnitt-Biochars gewählt, da diese Biochar aus Landschaftspflegeabfällen am nächsten kommen.

Die verwendeten **Komposte** wurden von der Firma Bionika AG und von einem Bayreuther Kompostierwerk hergestellt. Der Bionika® Kompost wurde mit und ohne Beimischung von 10 bzw. 30 Vol.-% Pyreg-8 verwendet, so dass die Endkonzentrationen in den sB-Substratmischungen 5 und 15 Vol.-% betragen. Vom Bayreuther Grünschnittkompost wurden drei Varianten verwendet: bei der einen wurde zu Beginn der Kompostierung Biochar untergemischt (ca. 30 Gew.-%), bei der anderen wurde nach der Kompostierung die gleiche Menge BC-4 zugesetzt, und die dritte war klassischer Grüngutkompost aus dem gleichen Ausgangsmaterial wie die beiden Komposte mit Biochar. Die im Folgenden "Bayreuther (= BT) Biokohlekomposte" genannten Substrate wurden im Herbst diesen Jahres in einem großflächigen Feldexperiment bei Bayreuth eingesetzt (Prof. Dr. Bruno Glaser, Halle, und Cand. rer. nat Daniel Fischer). Da alle Ansätze mit dem "Verarmungsfaktor" sandige Braunerde (sB) vermengt worden waren, wurden die beiden Biokohlen Pyreg-8 und BC-4 ebenfalls einer reinen sB-Mischung zugesetzt. Pro Substratmischung und Pflanzenfamilie wurden stets vier ungedüngte Replika und vier gedüngte Replika eingesetzt. Die einzelnen Komponenten der endgültig hergestellten Substratmischungen wurden vorab auf ihre abiotischen Eigenschaften untersucht. Dies diente der Gewährleistung einer exakten und vergleichbaren Zusammenstellung der Komponentenverhältnisse im Gemisch (Tabelle 2.2 und 2.3).

⁶ "BC Pyreg-8" ist eine interne Benennung des Instituts für Pflanzenökologie für eine Biokohle die von der Swiss Biochar-Anlage (<http://swiss-biochar.com>) stammt. Diese wurde im Rahmen eines ausgedehnten Ringversuchs des Delinat-Instituts für Ökologie und Klimafarming eingesetzt, siehe <http://www.delinat-institut.org/biokohle-fuer-kleingarten.html>. BC-4 ist ebenfalls eine interne Bezeichnung des Schottdorf-Biochar, welches nach einem anderen Verfahren hergestellt wurde.

Tabelle 2.1: Herstellerangaben zu handelsüblichen Pflanzsubstraten, gelb hinterlegt: die als Kontrollen ausgewählten Torfsubstrate; "ja (?)" bei der Mengenangabe des Hochmoortorfs bedeutet, dass keine näheren Angaben vom Hersteller verfügbar waren.

Handelsname	Grundsubstanz		Weitere Zusatzstoffe		pH	Salzgehalt KCl [g/l]	Nährstoffe			
	Hochmoor- torf [% Vol.]	Zersetzungs- grad	anorganisch	organisch			Stickstoff (N) [mg/l]	Phosphat (P ₂ O ₅) [mg/l]	K ₂ O [mg/l]	Magnesium (Mg) [mg/l]
Einheitserde Typ ED 73	70	H1-H7	30 % Ton	----	5,8	3	250	300	400	-
COMPO SANA® Qualitätsblumenerde	96	H3-H8	Perlite	----	5,7	1,8	280	340	400	110
Archut Fruhstorfer Erde Typ N	30	H2-H6	Perlite, Roh- ton	Rindenumus	5,9	2	100	180	250	100
Archut Fruhstorfer Erde - Blumenerde	50	H2-H4, H4-H6	Vulkanton	15 % Rindenumus	5,9	2	300	240	350	-
COMPO BIO® Univer- salerde	75	H3-H8	----	Grünschnitt-Kompost	?	1,5	220	300	600	120
COMPO SANA® Balkon & Kübel- pflanzeerde	93	H3-H8	Perlite	Pflanzenabfälle aus Garten- Landschaftsbau	5,8	1,9	300	340	490	100
Fischer BLÜH-FIX	ja (?)	H2-H4, H3-H6	----	Pflanzenmaterial aus Garten- Landschaftsbau, Forstwirt- schaft, Holzgewerbe	6,5	2,5	130	200	1000	----
Floragard Kübel- und Pflanzeerde	90	H2-H8	Blähton	----	5,25	1,5	290	160	340	80
PLANTANIA Blu- menerde	ja (?)	H2-H4, H3-H6	Ton	Pflanzenabfälle aus Garten- Landschaftsbau	6,1	2,2	180	100	900	0
NeudoHum® Pflanzeerde	0	----	Ton	Holzfasern, Kokosfasern, Braunkohle, Rindenumus	6,1	1,5	300	200	350	0

Weiter wurden **drei verschiedenen Pflanzenarten** in dieser Studie eingesetzt. Im Hauptpflanzexperiment *Raphanus sativus* (Radieschen) als Vertreter der Kreuzblütler (Brassicaceae), sowie *Fragaria × ananassa* (eine immer-tragende Erdbeersorte) als Vertreter der Rosengewächse (Rosaceae), und in Zusatzversuch 2 *Hordeum vulgare* (Gerste) als Vertreter der Grasartigen (Graminaceae). Dabei lag das Hauptaugenmerk auf dem gesamten Biomassertrag, sowie auf dem Anteil des Pflanzenteils, der als Lebensmittel verwendet wird. Zudem wurde in den Hauptversuchen der Wasserverbrauch quantifiziert und die Wassernutzungseffizienz errechnet.

2.1 Charakterisierung und Vorbereitung der verwendeten Substrate

2.1.1 Physikalisch-chemische Substrateigenschaften

Zur Charakterisierung wurden die Wasserhaltekapazität (WHK), der pH-Wert, die Leitfähigkeit und der Wassergehalt untersucht. Über diese Daten wurden zudem die Trockengewichte für die Mengen bestimmt, die eingewogen werden mussten um gleiche Mengen (1:1 Vol.%) zu vermischen.

Von den Ausgangssubstraten und den Mischungen wurde die Wasserhaltekapazität (WHK) ermittelt, d.h. die maximale vom Substrat gegen die Schwerkraft gehaltene Wassermenge. Dazu wurden Proben der Mischungen und Substrate in Gefäße eingewogen die nach unten Wasser austreten ließen (feine Gaze am Boden, abgedeckt mit Filterpapier) und nach oben offen waren. Die befüllten Probengefäße wurden für 24 h bei Raumtemperatur in einem Wasserbecken 1 cm hoch über die Substratoberkante mit Wasser überdeckt, damit sie sich aufsättigen konnten. Anschließend wurden die Substrate 24 h bei RT frei abtropfen gelassen (Drainage) und wieder rückgewogen und anschließend bis zur Gewichtskonstanz bei 105 °C getrocknet. Über die Gewichts-differenz wurde die Wasserhaltekapazität (in g H₂O / g TG des Substrats) berechnet.

Tabelle 2.2: Gemessene Parameter der einzelnen Ausgangssubstrate vor Vermischung

Einzelkomponenten	Einwaage (FG) [g]	Volumen FG [ml]	Trockengewicht [g]	Trockenvolumen [ml]
Einheitserde ED 73	100	200 ± 0,0	53,6 ± 0,6	167,5 ± 10,6
Qualitätsblumenerde	100	180 ± 0,0	27,5 ± 0,4	138,5 ± 12,0
BT Grüngutkompost	100	170 ± 0,0	50,0 ± 2,4	155 ± 21,2
BT Biokohle-Kompost	100	158 ± 3,5	45,4 ± 1,7	165 ± 0,0
BT Kompost mit Biokohle	100	155 ± 0,0	48,4 ± 1,0	152,5 ± 3,5
Bionika Kompost	100	89,7 ± 2,0	59,8 ± 1,3	78,75 ± 1,8
Braunerde	100	77,5 ± 3,5	89,7 ± 0,2	77,5 ± 3,5
Quarzsand	100	60 ± 0,0	100,0 ± 0,0	60 ± 0,0
sB Grundgemisch	100	64 ± 0,0	95,1 ± 0,1	0 ± 0,0

Pro Substanz wurden 100 g im Normal/Feuchtzustand ausgewogen. Hiervon wurde das Frischgewichtsvolumen in ml bestimmt, anschließend wurden die Substanzen bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und rückgewogen, sowie erneut das Volumen (des Trockengewichts) bestimmt. Mit Hilfe dieser Daten konnten nun die gravimetrischen Mischungsverhältnisse (Volu-

menmischung 1:1, basierend auf trockenen Substraten) für die an zu mischenden feuchten Substrate festgelegt werden (Tabelle 2.2). Ein kleiner Teil der trockenen Substrate wurden u.a. zur pH-Wert-Bestimmung fein gemahlen. Ein Gramm des gemahlenen Substrat wurde hierzu mit 19 ml A. dest (einfach destilliertes Wasser) aufgefüllt, für 30 min bei RT ausgeschüttelt (Labor-schüttler, 100 u min⁻¹) und anschließend abfiltriert. Die pH-WertBestimmung sowie die Leitfähigkeitsermittlung erfolgten aus dem Filtrat mit einem Kombigerät (Firma inoLab Model pH/Cond 720 WTW) (Tabelle 2.3).

Tabelle 2.3: Wassergehalt, pH-Wert und Leitfähigkeit der Einzelkomponenten vor Vermischung

Substrate	Wassergehalt g H ₂ O / g TS	Wassergehalt [%]	pH-Wert 1:20	Leitfähigkeit [µS/cm]
Einheitserde ED 73	0,9 ± 0,02	87 ± 2,2	6 ± 0,2	816,5 ± 24,7
Qualitätsblumenerde	2,6 ± 0,05	264 ± 4,7	5,8 ± 0,1	627,5 ± 7,8
BT Grüngutkompost	1,0 ± 0,10	100 ± 9,6	7,3 ± 0,0	498,5 ± 2,1
BT Biokohle-Kompost	1,2 ± 0,08	120 ± 8,2	7,8 ± 0,0	510 ± 14,1
BT Kompost + Biokohle	1,1 ± 0,04	107 ± 4,2	7,7 ± 0,0	467,5 ± 2,1
Bionika Kompost	0,7 ± 0,04	67 ± 3,6	6,8 ± 0,0	925,5 ± 40,3
Braunerde	0,1 ± 0	12 ± 0,3	7 ± 0,0	111,1 ± 28,4
Quarzsand	0,0 ± 0	0 ± 0	5,7 ± 0,2	22,8 ± 6,4
sB Grundgemisch	0,1 ± 0	5,2 ± 0,1	5,3 ± 0,9	123,9 ± 3,8

2.1.2 Zusammenstellen der Substratmischungen

Mit Hilfe der o.g. Trockengewichte wurden die Mischungen wie folgt zusammengesetzt: Verwendet wurde als Grundsubstrat ein Gemisch aus gleichen Teilen Braunerde und Sand (1 : 1 Vol.-%), im Folgenden als sB-Grundgemisch bezeichnet. In der nachstehenden Tabelle sind die Einzelkomponenten für die jeweiligen Versuchsansätze aufgeführt. Die jeweiligen zu untersuchenden Substrate wurden anschließend ebenfalls im Verhältnis 1 : 1 (Vol. %) mit sB vermischt. Diese Mischungen wurden ebenfalls näher charakterisiert.

Die Erdmischungen wurden homogenisiert, in einen Pflanztopf gefüllt und durch fünfmaliges Aufklopfen verdichtet. Wenn der Pflanztopf bis zur Pflanzkante befüllt war wurde das Gewicht bestimmt. Für jede Mischung wurden je vier Konstruktionstöpfe mit der nachstehenden Einwaage befüllt (Tabelle 2.3).

Die Wasserkapazitäten und pH-Werte der Mischungen wurden wie oben beschrieben bestimmt, und sind in Tabelle 2.3 angegeben. Weitere Angaben zu den Volumina-Gewichten und Wassergehalten der Mischungen finden sich in Tabelle 2.4.

Weitere Herstellerangaben zum Bionika-Kompost (Nährstoffgehalte, Keimbelastung sowie Zertifizierung) wurden in den Anhang eingefügt.

Tabelle 2.3: Die folgenden Substrate wurden 1:1 (vol-%, TS) mit sandiger Braunerde gemischt; interne Variantenbenennung sowie Einwaage pro Pflanzgefäß (ca. 400 ml Substrat)^x.

Beschreibung der Substratmischungen (sB = Grundmischung sandige Braunerde)	Var.	WHK _{max} [g H ₂ O/g TG]	pH Wert 1:5	Einwaage [g / Gefäß]
sB + Einheitserde (ED 73)	I	0,67 ± 0,02	6,0 ± 0,08	380
sB + COMPO SANA® Qualitätsblumenerde	II	0,94 ± 0,04	5,7 ± 0,01	350
sB + Bayreuth Kompost (aus Grüngut; ebenso III und IV)	V	0,56 ± 0,08	7,0 ± 0,03	420
sB + Bayreuth Biochar-Kompost (BC-4, Schottdorf)	III	0,58 ± 0,02	7,3 ± 0,05	400
sB + Bayreuth Kompost + Biochar (BC-4, Schottdorf)	IV	0,61 ± 0,03	7,5 ± 0,01	400
sB + Kompost „Bionika“	VI	0,54 ± 0,07	7,1 ± 0,02	450
sB + Kompost „Bionika“, plus 5 Vol. % BC Pyreg-8	VII	0,56 ± 0,05	7,3 ± 0,01	450
sB + Kompost „Bionika“, plus 15 Vol. % BC Pyreg-8	VIII	0,58 ± 0,06	7,4 ± 0,01	400
sB + Biochar (BC-4), Menge wie in BT-Komposten mit BC	IX	0,29 ± 0,02	7,2 ± 0,35	500
sB + 10 Vol. % BC Pyreg-8	X	0,26 ± 0,01	7,3 ± 0,26	500
sB (Braunerde-Sand-Grundgemisch ohne BC-Zugabe)	XI	0,27 ± 0,03	6,9 ± 0,11	550

^x Die Gewichtsunterschiede beruhen auf Volumendifferenzen und unterschiedlichen Frischgewichten; bei der einen Mischung mussten 380 g eingewogen werden um bis zur Gießkante (Abbildung 2.1, A) des Gefäßes aufzufüllen, bei einer anderen Mischung bis zu 500 g.

Tabelle 2.4: Angaben zu den Substratmischungen mit sandiger Braunerde

Angaben zu Mischungen,	Var.	FG [g]	Volumen der FG Einwaage [ml]	Trockengewicht [g]	Trockenvolumen [ml]	Wassergehalt % [g/100 g]
Einheitserde ED 73	I	100	100,0 ± 0,0	84,75 ± 1,1	86,3 ± 1,8	18,0 ± 1,5
COMPO SANA®	II	100	108,0 ± 10,6	73,75 ± 1,1	85,0 ± 7,1	35,6 ± 2,0
BT Kompost	V	100	92,5 ± 3,5	83,65 ± 0,4	81,3 ± 1,8	19,5 ± 0,5
BT Biokohle-Kompost	III	100	77,5 ± 3,5	81,2 ± 1,0	85,0 ± 0,0	23,2 ± 1,5
BT Kompost + BC-4	IV	100	87,5 ± 10,6	82,1 ± 0,1	75,0 ± 21,2	21,8 ± 0,2
Bionika	VI	100	85,0 ± 7,1	83,9 ± 3,3	71,3 ± 1,8	19,3 ± 4,6
Bionika + Py-8 + 5 Vol.%	VII	100	92,5 ± 3,5	83,5 ± 0,3	72,5 ± 3,5	19,8 ± 0,4
Bionika + Py-8 + 15 Vol.%	VIII	100	92,5 ± 10,6	84,6 ± 1,7	75,0 ± 3,5	18,2 ± 2,4
sB + BC-4	IX	100	71,3 ± 1,8	94,7 ± 0,4	63,8 ± 1,8	5,6 ± 0,5
sB + 30 % Pyreg-8	X	100	73,8 ± 1,8	93,55 ± 1,6	63,8 ± 1,8	6,9 ± 1,9
sB Grundgemisch	XI	100	64,0 ± 0,0	95,05 ± 0,1	64,0 ± 0,0	5,2 ± 0,1

2.2 Die Haupt-Pflanzexperimente mit Bewässerungssystem

2.2.1 Versuchspflanzen des Hauptversuchs

Mit *Raphanus sativus* (Radieschen; Sorte Saxa 2, N.L. Chrestensen Erfurter Samen- und Pflanzenzucht GmbH, Erfurt) und *Fragaria ananassa* (Erdbeere; Sorte HUMMI-GENTO, Reinhold Hummel GmbH & Co. KG) wurden zwei gebräuchliche Kulturpflanzen verschiedener Gattungen verwendet. Die Radieschen-Samen wurden im Vorfeld des Versuchs auf ihre Keimfähigkeit hin geprüft. Nach Ausschluss kleiner (< 2 mm) oder verletzter Samen betrug die Keimfähigkeit 98,3%.

Radieschen wurden beispielsweise in Australien als Indikatorpflanzen zur Bewertung von Bodenverbesserungsmaßnahmen, von Komposten oder Mulchabdeckungen eingesetzt; sie wurden bereits in Biochar-Versuchen verwendet (Chan *et al.*, 2007, 2008).

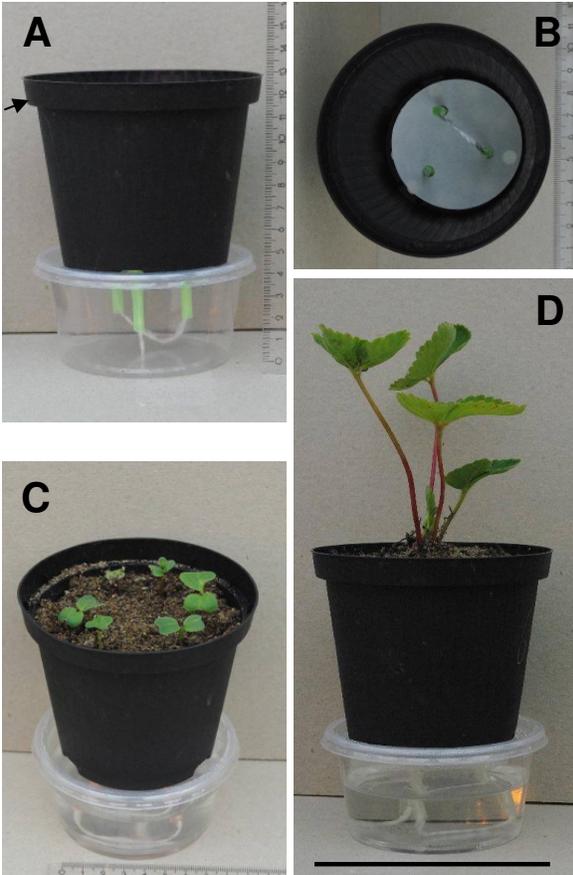


Abbildung 2.1: Aufbau der Kultivierungsgefäße.

A: Seitenansicht. Dochte werden durch Kunststofftunnel vom Topf in das Wasserreservoir geführt; schwarzer Pfeil: Gießkante, bzw. Pflanzrand. B: Ansicht von oben, C: Radieschenkeimlinge in Versuchsgefäß mit Wasser-Versorgung. D: Erdbeerpflanze in Versuchsgefäß und zu Versuchsbeginn. Messbalken: 11 cm.

Erdbeer-Jungpflanzen wurden aus einem Gartencenter erworben und inklusive Topfballen eingepflanzt. Die Pflanzen wurden nach Wuchshöhe, Blattzahl und Größe des Wurzelballens kategorisiert. Nach diesen Kriterien wurden ausschließlich vergleichbare Pflanzen für den Versuch verwendet. Reproduktive Pflanzenteile und senescente Blätter wurden zu Versuchsbeginn entfernt. Nach dem Einsetzen der Pflanzen wurden die Böden mit Regenwasser befeuchtet.

Über das unter dem Topf platziertes Reservoir (Abb. 2.1) war eine konstante Wasserversorgung in Abhängigkeit der jeweiligen Saugspannung der eingesetzten Substrate gewährleistet. Das Reservoir bestand aus einem geschlossenen PP-Gefäß (250 ml) und war über drei PP-Röhrchen mit dem Blumentopf verbunden. Über Glasfaserdochte wurde Wasser aus dem Reservoir in die Erde geleitet. Der Wasserverlust im Reservoir wurde mehrmals pro Woche bestimmt und aufgefüllt. Zur Bestimmung der Evaporation wurden pro Substrat Blumentöpfe ohne Bepflanzung aufgestellt. Je einer Variante (Bodenmischungen Var. I - XI) wurde ein flüssiger Volldünger über das Reservoir appliziert (s. Tabelle 2.5).

Je Ansatz mit oder ohne Düngung wurden vier replizierte Pflanzgefäße randomisiert aufgestellt.

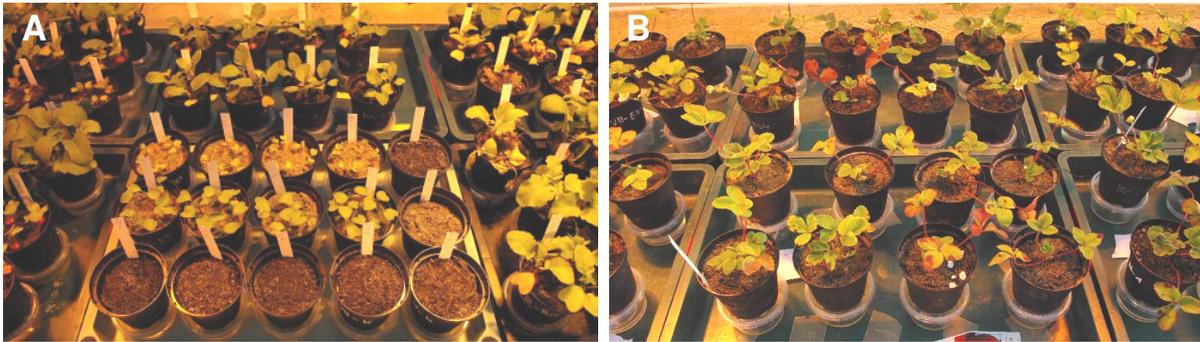


Abbildung 2.2: Aufstellung der Topfkonstruktionen mit Pflanzenbesatz. A) Radieschen B) Erdbeeren

2.2.2 Kulturbedingungen

Die Kultivierung erfolgte im Gewächshaus des Instituts für Pflanzenökologie der Justus-Liebig-Universität Gießen. Die Tag / Nacht-Längen wurde auf 16 h + 8 h eingestellt. Die Lichteinstrahlungsstärke wurde durch Quecksilberdampflampen in einer Höhe von ca. 1 m über dem Pflanzenbestand auf mindestens 10 kLux photosynthetisch aktiver Strahlung (PAR) eingestellt. Bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 75 bis 85% betrug die Lufttemperatur tagsüber 20 bis 24 °C. Zweimal musste gegen Schädlinge gespritzt werden.

Die Radieschen-Ansätze wurden anfangs alle 24 h auf Keimung und später die Blattzahl, Farbe sowie weitere Entwicklungsparameter bonitiert. Nach 7 Tagen Keimung wurden die drei stärksten Jungpflanzen pro Gefäß belassen und die überzähligen entfernt. Die Erdbeeren wurden mindestens einmal wöchentlich morphologisch erfasst (Anzahl adulte Blätter, Jungblattbestand sowie die Blüten(knospen) und Früchte).

Die Ansätze wurden auf Tablett positioniert, die alle täglich versetzt wurden, um gleichmäßige Licht- und Temperatur-Verhältnisse zu gewährleisten (Randomisierung).

2.2.3 Volldüngung: Verwendete Nährlösung

Die Volldüngung erfolgte über eine 1:1000 verdünnte Stammlösung (Tabelle 2.5) im Reservoir, deren pH-Wert auf 6,6 bis 6,8 eingestellt wurde. Das Auswechseln der Nährlösung erfolgte wie für Wasser beschrieben.

Tabelle 2.5: Stammlösung der 1:1000 verdünnten verwendeten Nährlösung der Volldüngungsvariante

Hoagland-Nährlösung, modifiziert nach Johnson *et al.* (1957) und Epstein (1972)

Chemikalie	Menge	Zugabe pro Liter A. dest
KNO ₃	1 M	101,11 g/l
Ca(NO ₃) ₂ • 4 H ₂ O	1 M	236,15 g/l
NH ₄ H ₂ PO ₄	1 M	115,03 g/l
(NH ₄) ₂ HPO ₄	1 M	132,06 g/l
MgSO ₄ • 7 H ₂ O	1 M	246,48 g/l
Fe-Na-EDTA	20 mM	7,34 g/l
H ₃ BO ₃	25 mM	1,55 g/l
KCl	50 mM	3,73 g/l
MnSO ₄ • 1 H ₂ O	2 mM	0,338 g/l
ZnSO ₄ • 7 H ₂ O	2 mM	0,575 g/l
CuSO ₄ • 5 H ₂ O	0,5 mM	0,125 g/l
H ₂ MoO ₄	0,5 mM	0,081 g/l

2.2.4 Ernte der Pflanzversuche

Zum Erntezeitpunkt wurden bei Radieschen und Erdbeeren der relative Chlorophyllgehalt adulter, voll entfalteter Blätter mit Hilfe eines SPAD Messgerätes bestimmt (SPAD-502 MINOLTA CHLOROPHYLL-METER). Der SPAD-Wert wird als Maß für die Stickstoffversorgung der Blätter bzw. Pflanzen genutzt.

Zur Ernte wurden die **Radieschen** gezählt, gezogen und die Wurzel und das Blattwerk vom Hypokotyledon (Rübe) getrennt. Die Feinwurzelmasse konnte wegen der anhaftenden Erde nicht bestimmt werden. Die Gesamtblattfläche wurde mittels eines Blattflächenmessgeräts (Portable Area Meter, Model LI-3000A, Li-COR, Nebraska, USA) bestimmt. Das Blattwerk und die Rübe wurden jeweils frisch nach Trocknung bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz gewogen.

Die **Erdbeerpflanzen** wurde ein letztes Mal bonitiert (Morphologiebestimmung, s.o.): Anzahl adulter, junger und seneszenten Blätter und vegetative Ausläufer, sowie die Ertragsbiomasse (Anzahlen von Knospen, Blüten, Früchten grün und rot, und von Fruchtansatz-Ausläufern). Diese Einzelkomponenten wurden getrennt erfasst und das Frisch- und Trockengewicht bestimmt. Auf eine Vermessung der Blattfläche musste aus Zeitgründen verzichtet werden.

2.2.5 Statistische Auswertung

Die gewonnenen Daten (vgl. 2.2 - 2.5) wurden mittels Excel sowie des Graphik- und Statistikprogramms SigmaPlot 11 (Vers. 11.2.0.5, © Systat, Inc.) analysiert. Die Ergebnisse des Hauptexperiments wurden mittels einfaktorieller ANOVA (Varianzanalyse) und anschließend dem posthoc-Test (Tukey) auf signifikanten Unterschiede ($P < 0,05$) getestet, wobei die gedüngten und ungedüngten Ansätze getrennt getestet wurden, da der positive Effekt der Düngung i.d.R.

offensichtlich war. Datensätze, die auch nach log- oder Quadratwurzel-Transformation nicht normalverteilt oder varianzhomogen waren, wurden mittels Rank-ANOVA (Kruskal-Wallis Test) ausgewertet. Signifikante Unterschiede wurden in den Abbildungen und Tabellen durch verschiedene Buchstaben dargestellt. Bei nicht- oder schwach signifikanten Effekten wurde der P-Wert der ANOVA in der Abbildung angegeben.

2.3 Zusatzversuch 1: Erneute Radieschenaussaat ohne Bewässerungssystem

Dieser Versuch wurde im Anschluss an den Versuch mit dem Docht-Bewässerungssystem auf den schon zuvor genutzten Substratmischungen durchgeführt. Hierbei wurden die Substratmischungen alle ein bis zwei Tage durch Gießen bis auf ihren maximalen Wassergehalt (= Feldkapazität) gebracht. Somit entfiel die Möglichkeit den Wasserverbrauch zu quantifizieren. Dieser Zusatzversuch dient dazu, die Nährstoffnachlieferung aus dem jeweiligen Substrat und das Wasserspeichervermögen der Substrate bei erneuter / längerer "Nutzung" zu charakterisieren im Hinblick darauf, ob Biochar-Beimischungen längerfristig Vorteile gegenüber herkömmlichen Substraten bringen können – Vorteile könnten evtl. erst längerfristig sichtbar werden.

2.4 Zusatzversuch 2: Wachstum von Gerste auf unvermischten Substraten

2.4.1 Verwendete Substrate und Substratmischungen

In diesem Versuch wurden Torfsubstrate, der Bionika-Kompost, eine HTC-Biokohle und das biokohlehaltige Substrat „Palaterra“ eingesetzt. Palaterra soll laut Hersteller der Terra preta Amazoniens ähneln (Palaterra GmbH & Co. KG, Hengstenbacherhof, Deutschland). Als Standard-Torfsubstrate wurde die Einheitserde „ED 73“ (pflanzfertig aufgedüngt), die Blumenerde „COMPO SANA®“ und zusätzlich die Einheitserde Null „EE0“ (ungedüngt) verwendet. Der Bionika-Kompost wurde weiterhin mit steigenden Mengen an Biochar untersucht. Zugemischt wurden 0, 1, 2, 4 und 8 % (Gewichtszugabe, g Biokohle pro 100 g⁻¹ Substrat) der Biokohlen „BC-3“, einer bei 450 °C produziertes Weizenstroh-Biokohle aus China, sowie 8 % (g 100 g⁻¹) „HTC-6“ einer Rindenmulch-Biokohle aus hydrothermalen Karbonisierung (Firma Hydrocarb GmbH & Co. KG, Antriftal, Deutschland). Letztere wurde gewaschen („HTC-6_{wash}“) und ungewaschen eingesetzt. Der Grund dafür war, dass bei der Verwendung von relativ produktionsfrischen HTC-Biokohlen zuvor toxische Effekte auf das Pflanzenwachstum beobachtet worden waren. Daher wurde bei der ungewaschenen HTC-Biokohle mit negativen Effekten gerechnet, und bei Waschung mit dem Verschwinden der negativen Effekte. Das Waschen erfolgte mit A. dest. über ein Sieb mit einem Porendurchmesser von 10 µm. Das Palaterra-Substrat wurde in zwei Ansätzen getestet. Im ersten Ansatz wurde das Substrat unvermischt angewendet, im zweiten Ansatz wurde es als ca. 1 cm hohe, aufliegende Schicht (= Anwendungsempfehlung des Herstellers) auf ungedüngtem Torfsubstrat EE0 verwendet („Palaterra_{oberfl.}“).

2.4.2 Messung physikalischer und chemischer Bodeneigenschaften

Bestimmung der maximalen Wasserhaltekapazität (WHK_{max}) und der Lagerungsdichte: Es wurden definierte Mengen naturfeuchten Substrates in Gefäßen ($50,5 \text{ cm}^3$) eingefüllt. Diese wurden in einer Schale mit A. dest. für 24 h überstaut. Ein Austreten der Substrate aus dem Gefäß wurde von oben durch ein Netz und von unten durch ein eingelegtes Filterpapier (Schleicher & Schuell) verhindert. Nach 24 h wurden die Gefäße aus der Schale entnommen und bei RT (22 °C) zum Abtropfen aufgestellt. Die Evaporation wurde durch Abdecken der Gefäße mit einer lichtundurchlässigen Plane verhindert. Das gegen die Schwerkraft gehaltene Wasser im Substrat wurde nach weiteren 24 h durch Wägung ermittelt. Zusätzlich wurde der Wassergehalt in naturfeuchtem Substrat bestimmt. Dazu wurden definierte Mengen naturfeuchten Substrates für 24 h bei 105 °C im Trockenschrank (Haereus Sepatech, Wetzlar) getrocknet und anschließend gewogen. Die WHK_{max} wurde anschließend durch Bezug der nach 24 h gehaltenen Wassermenge pro Substrat-Trockengewicht ermittelt. Zur Bestimmung der Lagerungsdichte wurde das Volumen des getrockneten Substrates in einem Meßzylinder ausgelittert.

2.4.3 Kultivierung, Kulturbedingungen und Bonitierung

Es wurden je 50 Samen der Sommergerste (*Hordeum vulgare*) in Pflanztöpfen mit 500 ml naturfeuchtem Substrat ausgesät ($n = 4$) und ca. 1 cm hoch mit Substrat überdeckt. Die Kultivierung erfolgte im Gewächshaus des Instituts für Pflanzenökologie, Universität Gießen. Es wurde täglich (mit Ausnahme der ersten 2 Tage) auf Feldkapazität gegossen. Äußere Kulturbedingungen ließen sich im Gewächshaus regulieren: Die Lichteinstrahlung wurde auf $10^4 \text{ mol m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, die Lufttemperatur auf 20 °C am Tag und 14 °C in der Nacht und die relative Luftfeuchtigkeit auf 60 % eingestellt. Die Tageslänge wurde auf 16 h eingestellt. Nach fünf und 17 Tagen wurde die Rate der gekeimten Pflanzen bestimmt. Nach 17tägiger Kultur wurde außerdem die oberirdische Biomasse ermittelt und für 24 h im Trockenschrank (Haereus Sepatech, Wetzlar) bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet.

2.5 Treibhausgasflüsse aus den 11 Substratmischungen des Hauptversuchs

In diesem Versuchsansatz wurden die 11 Substratmischungen zum einen als auf 60 % der maximalen Wasserkapazität eingestellt und auf Treibhausgasflüsse untersucht. Zum anderen wurden die Mischungen mit Wasser überstaut um ebenfalls die Treibhausgasflüsse zu analysieren.

2.5.1 Versuchsaufbau, untersuchte Substrate

Je 400 g Trockengewicht (TG) der in den Hauptversuchen verwendeten Substratmischungen (vgl. Tabelle 2.3) wurden in verschließbare Inkubationsgefäße gefüllt (Glas, 1100 ml; $n = 4$ pro Substratmischung). Die Gläser wurden im Labor bei RT aufgestellt. Um einen Gasaustausch zwischen Raumluft und dem Gefäßinhalt zu gewährleisten wurde zwischen Deckel und Gefäß ein Platzhalter positioniert. Nach drei Tagen wurden pro Ansatz 25 ml Nährlösung (Tabelle 2.5) zugegeben und mit A. dest. auf 60 % der maximalen Wasserkapazität entsprechend der jeweili-

gen Substratmischung eingestellt. Evaporationsverluste wurden wöchentlich durch Zugabe von A. dest. ausgeglichen aber mindestens 24 h vor der Messung. Der Evaporationsverlust betrug etwa 2 - 3 g H₂O pro Woche und Gefäß.

Im Teilversuch, in dem die o.g. Substratmischungen mit Wasser überstaut wurden (Ausnahme Bayreuther Komposts plus Biokohle (IV)), wurden die Inkubationsgefäße (850 ml; n = 4 pro Substratmischung) mit je 300 g (TG) befüllt. Anschließend wurden die Mischungen mit A. dest. ca. 2 cm überflutet. Das verbleibende Gasvolumen (*headspace*) des konisch geformten Inkubationsgefäßes wurde über die Zylinderformel berechnet.

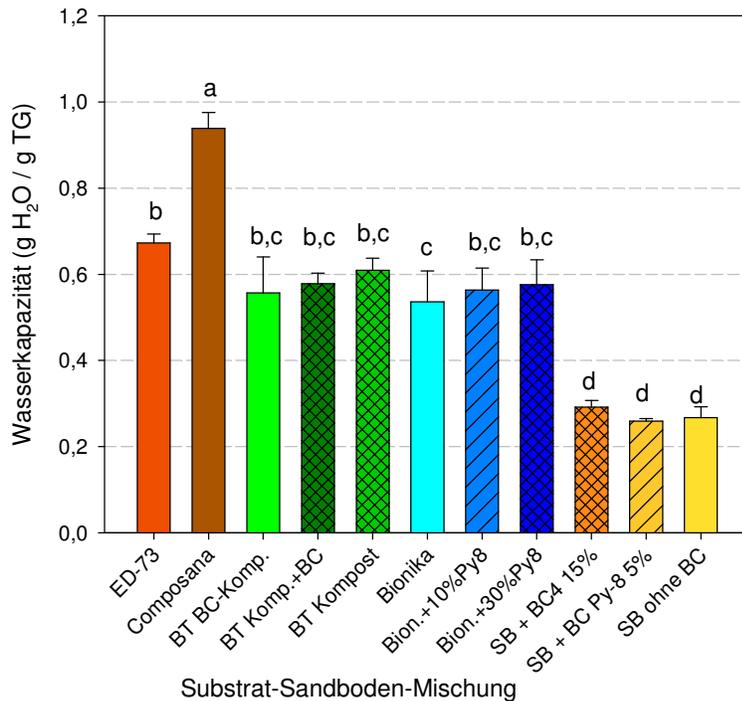


Abbildung 2.3: Maximale Wasserhaltekapazität der verwendeten Substratmischungen, ermittelt mit kleinen Pflanzgefäßen (n = 3, Werte gemittelt).

Eine leichte, nicht signifikante, Steigerung der Wasserhaltekapazität kann bei der Zugabe von Biochar beobachtet werden (Abb. 2.3).

2.5.2 Probenahme zur gaschromatographischen Analyse

Die Treibhausgasanalysen der nicht überstauten Ansätze wurden 5, 10, 14, 20, 27 und 34 Tage nach Versuchsbeginn durchgeführt. Die Analyse zur Wasserüberstauung wurde 25 Tage nach der Überflutung begonnen. Der Versuch der Wasserüberstauung ist noch nicht beendet.

Die Probenentnahme und die gaschromatographische Untersuchungen unterschieden sich in der Durchführung nicht. Zur Probenentnahme wurden für mindestens 10 min die Deckel der Inkubationsgefäße zur Belüftung entfernt und anschließend luftdicht verschlossen. Unmittelbar nach dem Verschluss wurden die t₀ Proben über ein Septum mittels einer 50 ml-Spritze mit Kanüle entnommen. Jedem Gefäß wurden so 50 ml Probengas (aus dem *headspace*) auf eine

verschließbare Spritze aufgezogen. Ein Druckausgleich musste über die Kanüle im Anschluss der Probennahme gewährleistet werden und ist bei der nachstehenden Berechnung berücksichtigt (Raumluftproben). Im Zwei-Stunden-Rhythmus wurde diese Prozedur zweimal wiederholt. Um einen Einfluss des Inkubationsgefäßes auf die Messung ausschließen zu können, wurden einmalig zu Beginn der Messreihe leere Weckgläser wie oben beschrieben verschlossen und beprobt ($n = 4$). Ein Einfluss der Inkubationsgefäße auf die Spurengasemissionen konnte dadurch ausgeschlossen werden.

2.5.3 Gaschromatographische Analyse, THG-Flussberechnung und Statistik

Die Probenspritzen wurden auf den Steckplätzen einer automatisierten Probeninjektionsvorrichtung befestigt (Firma, LAL, Göttingen; (Loftfield *et al.*, 1997) und mittels eines Gaschromatographen (Shimadzu) analysiert (Schaltprinzip nach (Mosier und Mack, 1980). Die Treibhausgase CO_2 , N_2O und CH_4 wurden durch einen FID (*Flame Ionization Detector*) und einem ECD (*Electron Capture Detector*) erfasst. Die Detektorsignale wurden unter Verwendung der Integrationssoftware PROBE_65 (Firma LAL, Göttingen) übersetzt. Als Gasstandard zur Kalibrierung wurden Standards der Firma Deuste-Steininger (Deutschland) verwendet. Die THG-Flüsse wurden durch lineare Regression über die drei Probennahme-Zeitpunkte (und unter Berücksichtigung der Verdünnung, s.o.) berechnet. Unter Anwendung des allgemeinen Gasgesetzes wurden diese Gasflüsse auf das Substrat-Boden-Trocken-Mischgewicht bezogen und in $\mu\text{g CO}_2$, $\text{ng N}_2\text{O-N}$ und ng CH_4 pro kg Substratmischung (TG) und Stunde dargestellt (zur Inkubationstechnik und Berechnung vgl. Kammann, 2001; Kammann *et al.*, 2009).

Zur Aufsummierung der THG-Emissionen über die Zeitdauer der Inkubation wurden die Flüsse linear zwischen den Messzeitpunkten interpoliert, da die Labortemperatur dafür ausreichend konstant war (22 ± 2 °C). Die emittierten CO_2 - und N_2O -Mengen werden in $\text{mg CO}_2 \text{ kg}^{-1}$ bzw. in $\mu\text{g N}_2\text{O-N kg}^{-1}$ angegeben.

Zur Berechnung der THG-Abgabesumme aller gemessenen Gase (CO_2 , N_2O , CH_4) als CO_2 -Äquivalente wurden die Gase N_2O und CH_4 mit ihrem jeweiligen 100-Jahres-GWP-Wert⁷ (GWP = *global warming potential*) in CO_2 -Äquivalente umgerechnet (IPCC, 2007).

Die Betrachtung des CO_2 -Anteils in der Gesamtbilanz erfolgte auf zwei verschiedene Arten:

- (1) Es wurden die CO_2 -Emissionen aller Substrate mit einbezogen
- (2) Nur die CO_2 -Emissionen der Torfsubstrate ("fossiler Kohlenstoff") wurden mit einbezogen

⁷ Das GWP drückt die "Erwärmungswirkung" (Strahlungsantrieb, engl. *radiative forcing*) von einem kg eines Treibhausgases über einen definierten Zeitraum verglichen mit der Wirkung von einem kg CO_2 aus. Die derzeit gültigen Werte (IPCC-Bericht 2007) sind 298 für N_2O , und 25 für CH_4 .

3 Ergebnisse

3.1 Ergebnisse zum Pflanzenwachstum

Anmerkung: Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt stets gleichartig (Farben, Muster, Statistik).

3.1.1 Hauptexperiment 1: Radieschenwuchs mit Bewässerungssystem

Keimung

Weder die Düngung noch die verschiedenen Substratmischungen hatten einen signifikanten Effekt auf die Keimung der ausgebrachten Radieschensamen (6 pro Gefäß; Abb. 3.1), sodass die weiteren Versuchsergebnisse (Erträge) nicht maßgeblich durch veränderte bzw. verringerte Keimraten bestimmt werden.

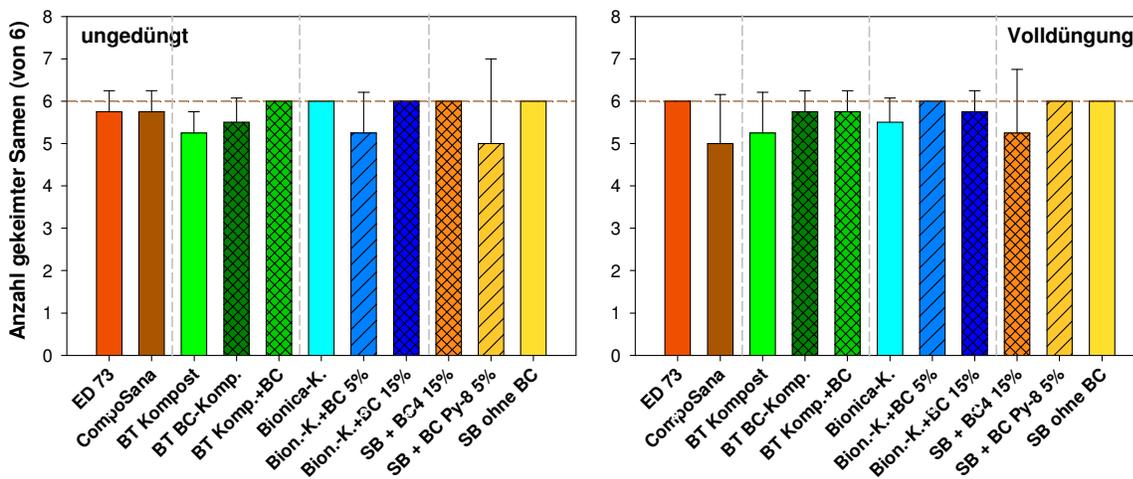


Abbildung 3.1: Anzahl der pro Pflanzgefäß gekeimten Samen (von 6 gesäten Samen). Linke Abbildung: ohne Düngung, rechts: mit kontinuierlicher Nährlösungsversorgung. Gestrichelte braune Linie: Anzahl gesäter Samen.

Abkürzungen/Codierung im Versuch:

- I. ED 73 = Standard-Torfkultursubstrat, aufgedüngt (Kontrolle 1)
- II. COMPO SANA = pflanzfertig aufgedüngte Blumenerde (Kontrolle 2)
- V. BT Kompost = Bayreuther Kompostsubstrat ohne Biochar, welches in einem Bayreuther Feldexperiment im Herbst 2009 als Kontrolle ausgebracht wurde
- III. BT BC-Komp. = Bayreuther Biochar-Kompost (Biochar = BC4, Schotthoff)
- IV. BT Komp.+BC = Bayreuther Kompost mit nachträglich zugefügtem Biochar (BC4)
- VI. Bionika-K. = Güteklasse A⁺ - Kompost von URS Landmanagement, Österreich
- VII. Bion.-K.+BC 5% = Bionika-Kompost plus 10% nachträglich zugefügtem Biochar (Pyreg-8 aus Grünschnitt); d.h. BC-Anteil nach Mischung mit Boden bei 5 Vol.-%
- VIII. Bion.-K.+BC 15% = Bionika-Kompost plus 30% nachträglich zugefügtem Biochar (Pyreg-8, aus Grünschnitt); d.h. BC-Anteil in Mischung bei 15 Vol.-%
- IX. SB + BC4 15% = sandige Braunerde + Biochar BC-4, Menge entspricht BT-Komposten
- X. SB + BC Py-8 5% = sandige Braunerde mit Zugabe von 5% Pyreg-8 Biochar
- XI. SB ohne BC = sandige Braunerde ohne Zugabe weiterer Substrate oder Biochars



Foto 3.1: Morphologie der ungedüngten Radieschen (RO) (*Raphanus sativus*) am Tag der Ernte.



Foto 3.2: Morphologie der mit Nährlösung versorgten Radieschen am Tag der Ernte.

Beide Fotos: Vom linken Rand bis zum rechten Rand je exemplarisch ein Pflanztopf für die Substratmischungen I, II, III, IV, V bis XI: ED 73, COMPO SANA, BT Biochar-Kompost; BT Kompost + Biochar, BT Kompost pur (Biochars: Schottdorf); Bionika-Kompost, Bionika + 5 % Biochar; Bionika + 15 % Biochar (Biochars: Pyreg); sandige Braunerde + 15 % Biochar, sandige Braunerde (Schottdorf) + 5 % Biochar (Pyreg); sandige Braunerde ohne Biochar. **Messbalken je 11 cm;** Fotos: Y. Kühnel & C. von Bredow

Radieschenknollen-Ertrag (Frischgewicht)

Da für Gärtner vor allem das "nutzbare" (d.h. essbare) Frischgewicht der Radieschen von Interesse ist, wird dieser Parameter an erster Stelle vorgestellt. Die im folgenden stets sehr hohe Standardabweichung der ED 73 Kontrolle "ungedüngt" beruht darauf, dass in einem Pflanzgefäß zwei von drei fast ausgewachsenen Radieschen verfault waren⁸.

Bei dem ungedüngten Versuchsansatz (Abb. 3.2 links) sind signifikante Unterschiede im Ertrag der Radieschenknollen zwischen den verschiedenen Substraten zu erkennen. Schon die beiden Kontroll-Torfsubstrate, ED 73 und COMPO SANA, unterscheiden sich beträchtlich voneinander: Der Radies-Ertrag auf ED 73 – Sandbraunerde ist um das 3,5-fache (346 %) höher als der auf COMPO SANA – Sandbraunerde⁹. Somit entsprachen die Erträge aller drei Bionika-Komposte (d.h. mit und ohne Beimischung von Biochar) denen auf ED 73, und überstiegen die auf COMPO SANA Blumeerde erzielten Erträge um das 3,7-, 3,5- und 3,1-fache (Bionika, Bion.+ 5 % BC und Bion.+15 % BC). Die Zugabe von Biochar steigerte die Erträge nicht über die mit dem Bionika-Kompost selbst erzielten Erträge hinaus, verringerte sie jedoch auch nicht.

Ebenso groß wie der Unterschied zwischen den beiden Torf-Kontrollsubstraten war auch der Unterschied zwischen den beiden Komposten: Der Kompost aus dem Bayreuther Kompostierwerk lieferte nicht annähernd die Erträge wie der Bionika-Kompost; sie waren signifikant geringer als die der Kontrollen oder der Bionika-Komposte (Abb. 3.2 links), und bewirkten nicht mal gegenüber sandiger Braunerde allein (ohne Kompost- oder Torfzugabe) eine signifikante Steige-

⁸ Die Daten dieses Gefäßes wurden beibehalten und nicht als "Ausreißer" ausgeschlossen, da unklar ist, ob es sich um eine möglicherweise typische Reaktion aufgrund der hohen Wasserhaltefähigkeit des Torfsubstrats handelt.

⁹ Im Folgenden wird der Einfachheit halber nur noch die Substrat-Beimischung zur sandigen Braunerde genannt, und nicht mehr darauf hingewiesen, dass nur die Hälfte der Mischungen aus den Substraten bestand.

rung des Ertrags. Innerhalb dieser Gruppe, BT-Komposte sowie Braunerden mit und ohne Biochar, erzielte derjenige BT-Kompost, bei dem Biochar mitkompostiert wurde, den höchsten Ertrag. Bei Zugabe von 15 % Biochar in sandige Braunerde (Var. IX in Abb. 3.2) steigerte diese den Radieschen-Ertrag um das 3,15-fache, verglichen mit Braunerde ohne jegliche Biochar-Beimischung (Var. XI). Jedoch waren aufgrund der hohen Standardabweichungen (v.a. der ED 73 Kontrolle) diese Unterschiede in der Varianzanalyse nicht signifikant.

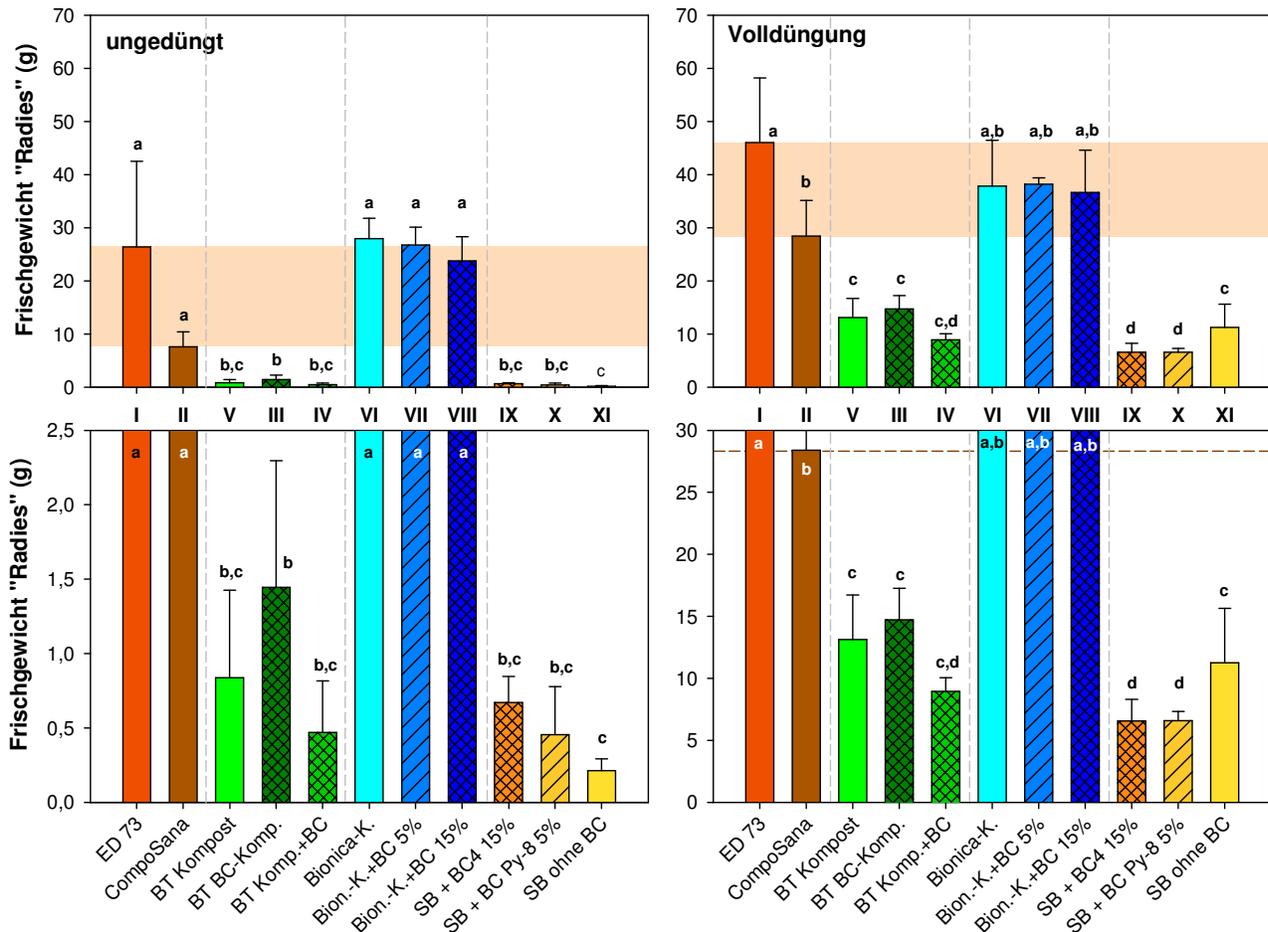


Abbildung 3.2: Mittlere Frischgewichte der Radieschen-Knollen (ohne Wurzel, ohne Blätter; n = 4 Gefäße pro Substratmischung mit je 3 Pflanzen), Fehlerbalken: Standardabweichung. Links: ungedüngte Varianten, Rechts: Varianten mit Volldüngung. Oben: Übersichtsgraphik mit gleicher Y-Achsen-Skalierung. Unten: Vergrößerungen der oberen Abbildung. Die bräunlich schattierten Bereiche bzw. die gestrichelte braune Linie unten rechts zeigen die von den Torf-Kontrollsubstraten erreichten Werte zum besseren Vergleich.

Verschiedene Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede zwischen den Substrat-mischungen (links: Kruskal-Wallis-ANOVA mit Student-Newman-Keuls-Test; rechts: Einfaktorielle ANOVA mit Tukey-Test).

Beim kontinuierlich mit Düngelösung versorgten Ansatz (Abb. 3.2 rechts, "Volldüngung") sind die Radies-Erträge grundsätzlich höher als die der ungedüngten Ansätze. Die größte *relative* Steigerung durch Düngergabe (im Vergleich der ungedüngten Substrate mit den gedüngten, Abb. 3.2 links und rechts) ergab sich bei denjenigen Substraten mit dem wahrschein-

lich größten relativen Nährstoffmangel: Bei der sandigen Braunerde ohne jegliche Substrat- oder Biochar-Zugabe steigerte sich der Ertrag durch Volldüngung um das 53-fache, gefolgt vom BT-Kompost mit nachträglich zugefügtem Biochar (19-fache Steigerung), dem BT-Kompost ohne Biochar (15,7-fache Steigerung), der sandigen Braunerde plus 5 % Biochar (14,5-fache Steigerung), sowie dem BT-Biochar-Kompost und der sandigen Braunerde plus 15 % Biochar (jeweils 10-fache Steigerung). Die geringsten relativen Steigerungen ergaben sich bei Substraten mit offensichtlich guter Nährstoff-Nachlieferung auch ohne zusätzliche Düngung: Der ED 73 sowie den Bionika-(Biochar-)Komposten, bei denen die relativen Steigerungen 1,7 (ED 73) und 1,4 bis 1,5 (Bionika-Komposte) gegenüber den ungedüngten Varianten betragen. Der Steigerungsfaktor bei der COMPO SANA war höher, er betrug 3,7 im Vergleich zum Ertrag der ungedüngten COMPO SANA-Variante.

Trotz der zum Teil beträchtlichen relativen Steigerungen durch die Nährlösung blieb das zuvor beschriebene Ertragsmuster jedoch weitgehend bestehen: Die Bionika-Komposte lieferten Erträge, die zwischen denen der ED 73- und COMPO SANA-Torferde-Kontrollen lagen (keine signifikanten Unterschiede zu beiden Kontrollen; Abb. 3.2 rechts), während die Erträge auf den BT-Komposten oder den Braunerden signifikant geringer waren. Auch hier lieferte der BT-Kompost mit mitkompostiertem Biochar die höchsten Erträge innerhalb dieser "Gering-Ertragsgruppe". Innerhalb der Gruppe Braunerde (pur) hingegen verringerte die Biochar-Zugabe von 5 oder 15 % die Erträge signifikant gegenüber der sandigen Braunerde ohne Biochar-Zugabe.

Der **Wassergehalt** der Radieschen war signifikant verschieden, bedingt durch ihre unterschiedlichen Entwicklungsstände (Abb. A-3.2.b im Anhang; Fotos 3.1 und 3.2); die Unterschiede waren jedoch quantitativ so gering, dass die **Trockengewichts-Erträge** der Radieschenknollen nicht signifikant von denen der Frischgewichte verschieden waren (vergleiche Abb. 3.2 mit Abb. A-3.2.a im Anhang). Auch bei Betrachtung des **Einzelgewichtes** (Radieschengewicht pro Pflanze, nicht pro Kulturgefäß) ergab sich keine wesentliche Veränderung der Ergebnisse (nicht dargestellt), da es bis auf eine Ausnahme (s.o.) keine Gefäße gab, in denen nicht 3 Pflanzen gekeimt waren (Abb. 3.1).

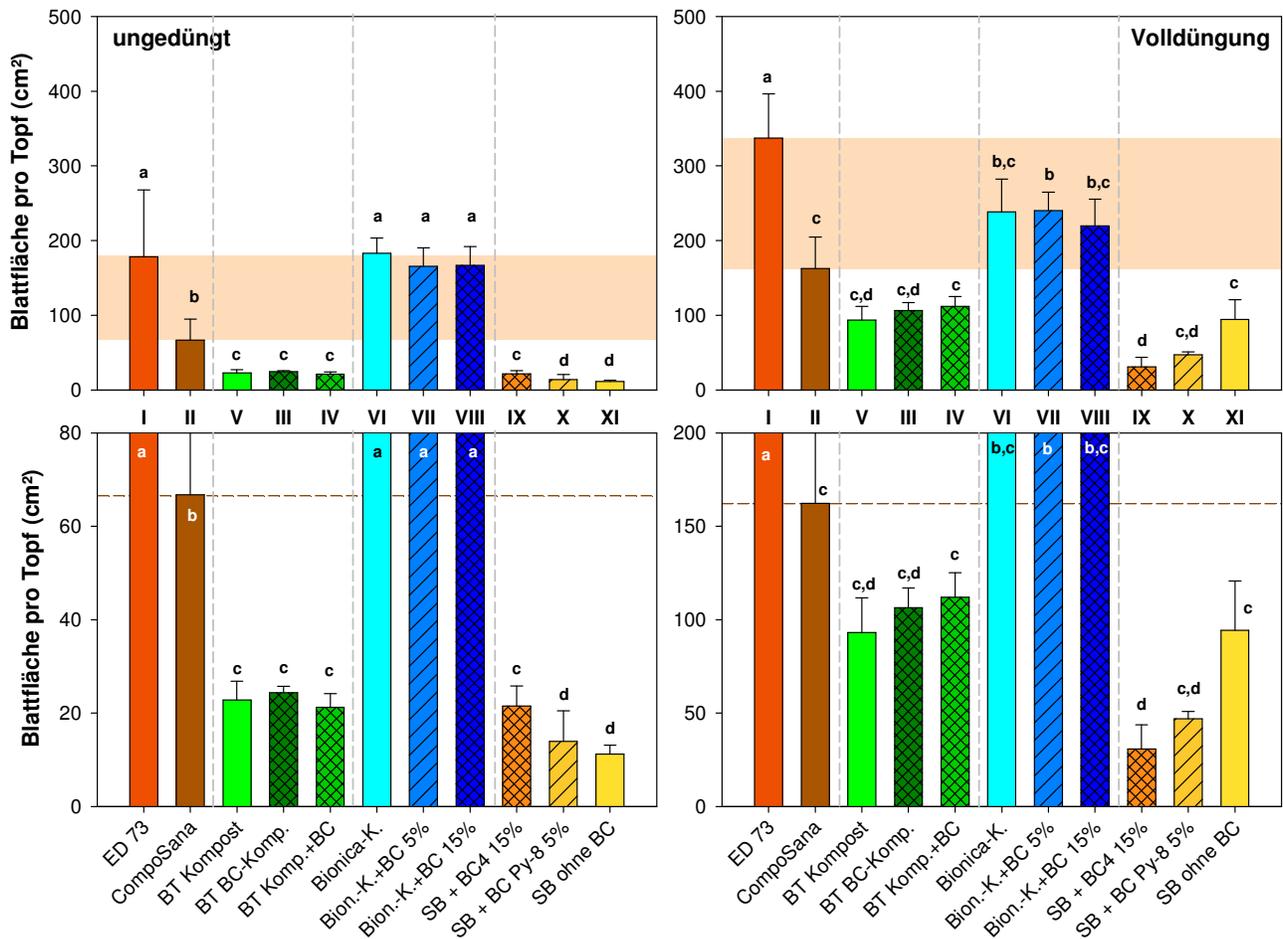


Abbildung 3.3: Mittlere Blattfläche pro Topf, Fehlerbalken: Standardabweichung. Links: ungedüngte Varianten, Rechts: Varianten mit Volldüngung. Oben: Übersichtsgraphik mit gleicher Y-Achsen-Skalierung, und darunter die Vergrößerung der jeweiligen oberen Abbildung mit angepasster Y-Achsenkalierung. Linien, schattierte Bereiche und Statistik wie in Abb. 3.2.

Die von den je drei Pflanzen pro Pflanzgefäß entwickelte **Blattfläche** war, wie schon das Radies-Gewicht, signifikant größer bei Düngung als bei den ungedüngten Pflanzen (Abb. 3.3). Auch bei diesem Parameter erreichten die auf Bionika-Komposten (mit oder ohne Biokohle) gezogenen Pflanzen Werte, die zwischen denen der beiden Kontrollsubstrate lagen. Innerhalb der Bayreuther Komposte gab es keine signifikanten Unterschiede in der Blattfläche; bei guter Nährstoffversorgung steigerten die Biochar-Komposte jedoch tendenziell die Größe der Blattfläche pro Gefäß. Innerhalb der Braunerden mit und ohne Biochar-Zugabe steigerte Biochar die Blattflächen, wenn keine Düngung gegeben wurde, mit Düngung hingegen waren die Blattflächen der Biochar-Varianten tendenziell geringer als bei der Braunerde ohne Biochar-Zusatz. Beim **Gesamtgewicht** der Radieschen (Trockenmasse Knolle + Blätter) zeigte sich im Prinzip das schon für das Frischgewicht der Knollen und die Blattfläche beschriebene Muster (Abb. A-3.3 im Anhang).

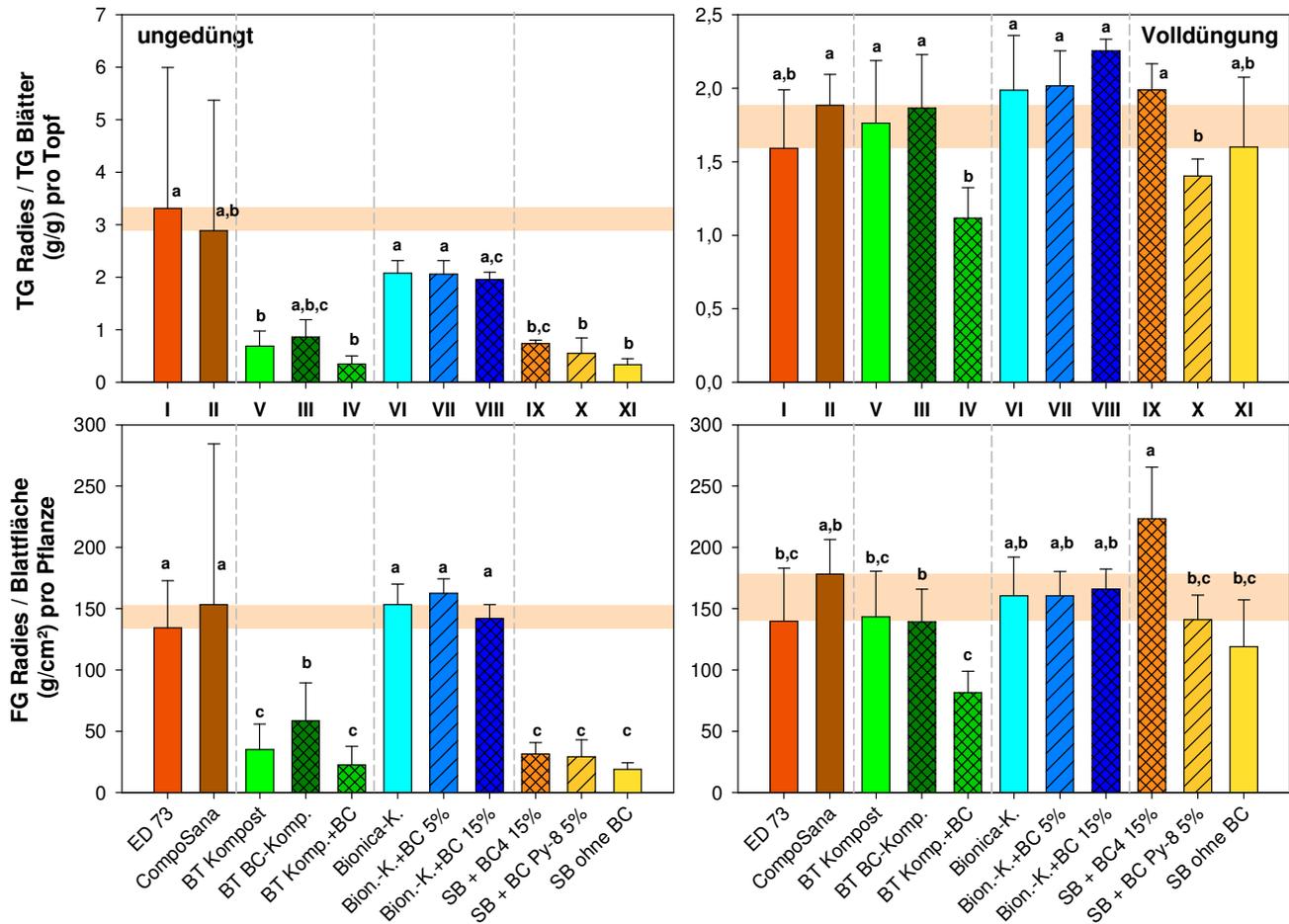


Abbildung 3.4: Mittleres Verhältnis zwischen Radieschen- und Blattmasse (obere Abbildungen: Trocken-gewichtsverhältnisse), bzw. Radies-Frischgewicht und Blattfläche (untere Abbildungen) plus Standard-abweichung; Angaben pro Pflanzgefäß. Links: ungedüngte Varianten, Rechts: Varianten mit Volldüngung. Linien, schattierte Bereiche und Statistik wie in Abb. 3.2.

Interessant ist das **Verhältnis** von Radieschenknollen zu Blattfläche bzw. Blattmasse. Bei den ungedüngten Varianten zeigten v.a. die Bionika-Komposte hier Verhältnisse, die denen der Kontrollen nicht nachstehen (Abb. 3.4 links unten). Die Verhältnisse bei den BT-Komposten oder Braunerden (grün und gelb dargestellt) sind aufgrund der verzögerten Entwicklung auf diesen Substraten schlechter. Bei Zugabe von Düngelösung entwickelte sich jedoch eine erstaunliche Gleichartigkeit im Verhältnis des Radies-Ertrags zur Blattmasse bzw. Blattfläche: Bei dem Gewichtsverhältnis ((g / g), Abb. 3.4 oben rechts) zeigen die Bionika-Komposte, und hier v.a. mit Beimischung von 15 % Biochar, die günstigsten Verhältnisse, ebenso die sandige Braunerde mit 15 % Biochar. Die beiden von sich aus nährstoffarmen Substratmischungen, bei denen nachträglich Pyreg-Biochar hinzugefügt wurde (BT Kompost + Biochar; sandige Braunerde + 5% Pyreg-Biochar), zeigten hingegen signifikante Reduktionen, d.h. es wurde anteilmäßig weniger Radies-Biomasse pro Blattfläche bzw. –masse gebildet.

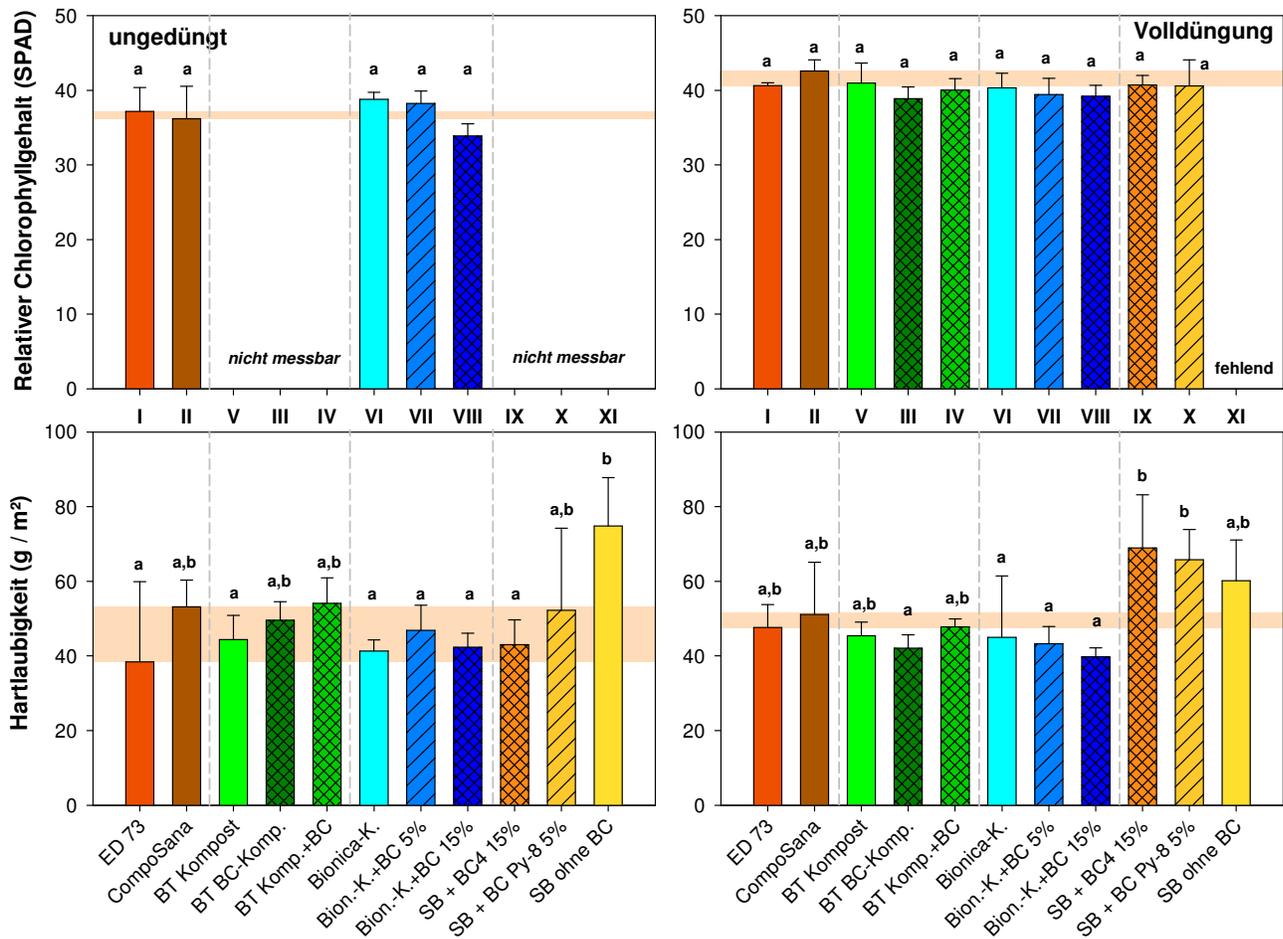


Abbildung 3.5: Relativer Chlorophyllgehalt der Blätter (obere Abb.) sowie Hartlaubigkeit der Blätter (*leaf mass area*, LMA; untere Abb.) plus Standardabweichung. Links: ungedüngte Varianten, Rechts: Varianten mit Volldüngung. Linien, schattierte Bereiche und Statistik wie in Abb. 3.2. Die Blätter der ungedüngten BT-Komposte und Braunerden (grün und gelb) waren zu klein, um die SPAD Messung durchführen zu können, daher fehlen die Werte.

Der **relative Chlorophyllgehalt** ist ein Maß für die Stickstoffversorgung der Pflanze; gelbliche, kleine Blätter mit N-Mangel haben üblicherweise signifikant geringere Werte als saftig-grüne Blätter. Bei den ungedüngten Torf-Kontrollen und den Bionika-Komposten bestand kein signifikanter Unterschied in der N-Versorgung der Blätter. In der ungedüngten Variante waren die Radieschenpflanzen auf den Bayreuther Komposten bzw. auf den Braunerden zu klein, um an ihnen die Messungen durchführen zu können (Abb. 3.5, links oben); diese Varianten zeigten jedoch alle Anzeichen von Nährstoff-(Stickstoff-)Mangel, und hätten mit Sicherheit signifikant geringere SPAD-Werte aufgewiesen. Bei den gedüngten Varianten bestand zwischen den verschiedenen Substraten kein signifikanter Unterschied im relativen Chlorophyllgehalt. Somit wurde das Ziel der kontinuierlichen Versorgung mit Düngelösung erreicht, nämlich den Faktor "Stickstoffversorgung" als Einflussgröße auszuschalten.

Interessant ist, dass sich dennoch Unterschiede in der **Hartlaubigkeit** der Radieschenpflanzen ausgebildet haben (Abb. 3.5 unten): Bei der ungedüngten Variante zeigte die reine sandige

Braunerde ein signifikant höheres Blattgewicht pro Blattfläche, bei den gedüngten Pflanzen war es v.a. die mit 15 % Biochar versetzte sandige Braunerde (Var. IX). Ein erhöhte *leaf mass area* ("Hartlaubigkeit") ist oft ein Zeichen für eine Stickstoffunterversorgung, es werden pro Fläche mehr Struktursubstanzen in die Blätter eingelagert bzw. gebildet (Larcher, 2001).

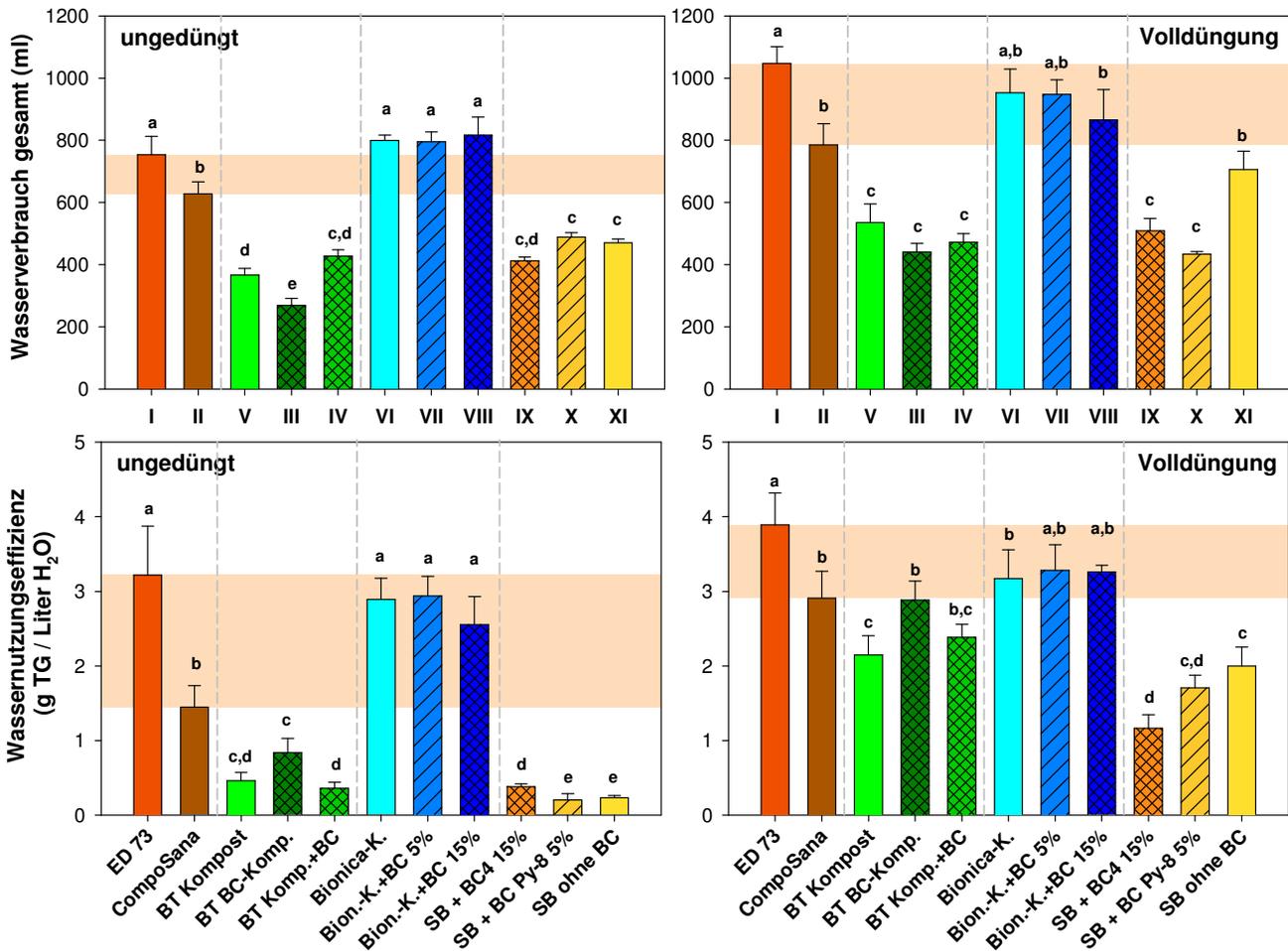


Abbildung 3.6: Gesamt-Wasserverbrauch während des Experiments (obere Abb.) sowie Wassernutzungseffizienz (*water use efficiency*, WUE; untere Abb.) plus Standardabweichung. (WUE = erzeugte Gesamtbiomasse pro Wasserverbrauch in g/l). Links: ungedüngte Varianten, Rechts: Varianten mit Volldüngung. Linien, schattierte Bereiche und Statistik wie in Abb. 3.2.

Der **Wasserverbrauch** über die Dauer des Experiments war bei der ED 73 Torfsubstratmischung stets höher als bei der anderen Kontrolle, COMPO SANA. Bei den ungedüngten Bionika-Komposten war der Wasserverbrauch noch etwas höher als bei der ED 73, bei der gedüngten Variante lag der Wasserverbrauch der Bionika-Komposte zwischen dem der beiden Torfsubstrat-Kontrollen. Innerhalb der Gruppe der BT-Komposte war der Wasserverbrauch des Biochar-Komposts (Var. III) stets am geringsten. Bei der ungedüngten Variante bestand sogar ein signifikanter Unterschied zu Var. IV, bei der das Biochar nach der Kompostierung hinzugefügt worden war. Bei der Gruppe der Braunerden war der Wasserverbrauch in Gegenwart von Biochar tendenziell verringert, v.a. bei den gedüngten Varianten. Die produzierte Biomasse pro

verbrauchtem Wasser (*water use efficiency*) war bei den ungedüngten Kontrollen bei der COMPO SANA nur halb so groß wie bei der Kontrolle ED 73. Dies hatte seine Ursache v.a. im sehr viel geringeren Ertrag (Bsp. Abb. 3.2) – der Wasserverbrauch war nicht sehr viel geringer (Abb. 3.6). Innerhalb der Gruppe der ungedüngten BT-Komposte (grün) führte der geringere Wasserverbrauch bei zugleich der höchsten Biomasse zur höchsten WUE, verglichen mit dem Kompost allein, oder dem Kompost, dem nachträglich Biochar hinzu gefügt worden war (Abb. 3.6). Auch in der Gruppe der gedüngten BT-Komposten wies der Biochar-Kompost (III) die günstigste WUE auf. Bei der sandigen Braunerde führte die Biochar-Zugabe ohne Düngung zu einer besseren WUE, bei Düngung jedoch zu einer signifikant schlechteren WUE. Der Grund hierfür ist unklar.

3.1.2 Erdbeeren mit Bewässerungssystem

Die Ergebnisse des Erdbeer-Pflanzversuchs werden für folgende gemessene bzw. im Versuchsverlauf protokollierte Parameter dargestellt:

- *Morphologische Entwicklung u. Erscheinungsbild bei Ernte*
- *Gesamtbiomasse (Trockengewicht, TG)*
- *Frischgewicht der reproduktiven Organe (Blütenknospen, Blüten, Stiele, grüne und rote Früchte)*
- *Blattparameter*
- *Relativer Chlorophyllgehalt*
- *Wasserverbrauch und Wassernutzungseffizienz*

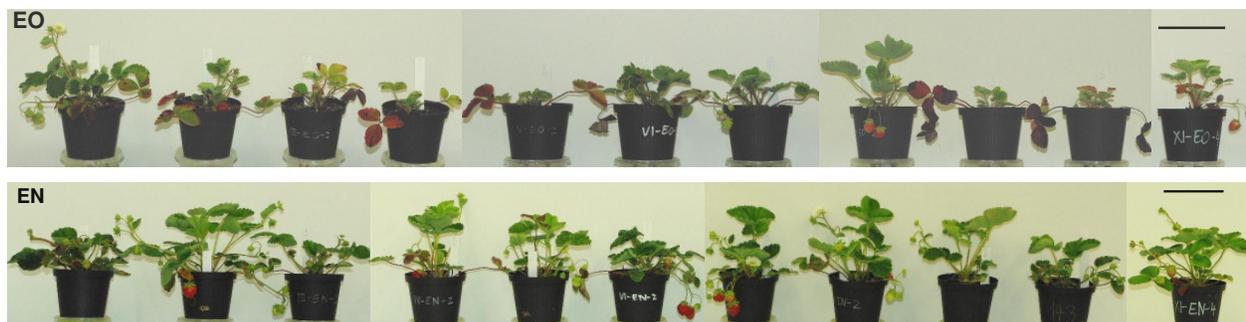


Foto 3.3: Morphologie der Erdbeerpflanzen (*Fragaria x ananassa* "Humi-Gento") zum Erntetag.

EO: Erdbeeren ohne Düngung. **EN:** Erdbeeren mit Düngung. **Messbalken 11 cm.** Vom linken Rand bis zum rechten Rand je exemplarisch ein Pflanzgefäß für die Substratmischungen I, II, III, IV, V, VI, VII; VIII, IX, X und XI. (Kamera: PENTAX K200D, PENTAX 18-55II; Fotos: Y. Kühnel und C. von Bredow)

Trotz der Kürze der zur Verfügung stehenden Zeit gelang es, die in die Substrat-Braunerde-Mischungen getopften Erdbeersetzlinge bis zur Fruchtreife der ersten Früchte zu bringen. Diese vollzog sich rascher und mit stärkerem Fruchtansatz auf den gedüngten Varianten (Foto 3.3, RO

und RN). Die ungedüngten Erdbeerpflanzen wiesen zudem mehr senescente, rötliche Blätter auf als die gedüngten Pflanzen.

Die **Fruchtansätze** und die **Fruchtentwicklung** der Erbeerpflanzen wird im Folgenden über die Ernte-Frischgewichte (FG) der einzelnen Bestandteile der Fruchttriebe (= reproduktive Organe) zum Erntezeitpunkt aufgeschlüsselt. Diese waren die fruchttragenden Triebe (als "Stiele" bezeichnet) sowie die Blütenknospen und Blüten (Abb. 3.7.A, B), die grünen, noch nicht ausgereiften Früchte als Maß der noch zu erwartenden Fruchtproduktion die aufgrund der Kürze der Versuchszeit nicht abgeschlossen werden konnte (Abb. 3.7 C, D), die bereits roten Früchte, ein Maß für die Geschwindigkeit der Fruchtentwicklung auf dem jeweiligen Substrat (Abb. 3.7 E, F) sowie das Gesamtgewicht der ganzen Fruchttriebe, bestehend aus den in Abb. 3.7 A – F gezeigten Einzelteilen.

Als gesonderte Beobachtung sei an dieser Stelle erwähnt, dass die Substratmischungen mit COMPOSANA sowohl bei Radieschen als auch bei Erdbeeren nach einiger Zeit das Wachstum von kleinen Pilzfruchtkörpern an der Gefäßoberfläche zeigten. Auch bei der Inkubation zur Messung der THG-Emissionen trat das Pilzwachstum auf.

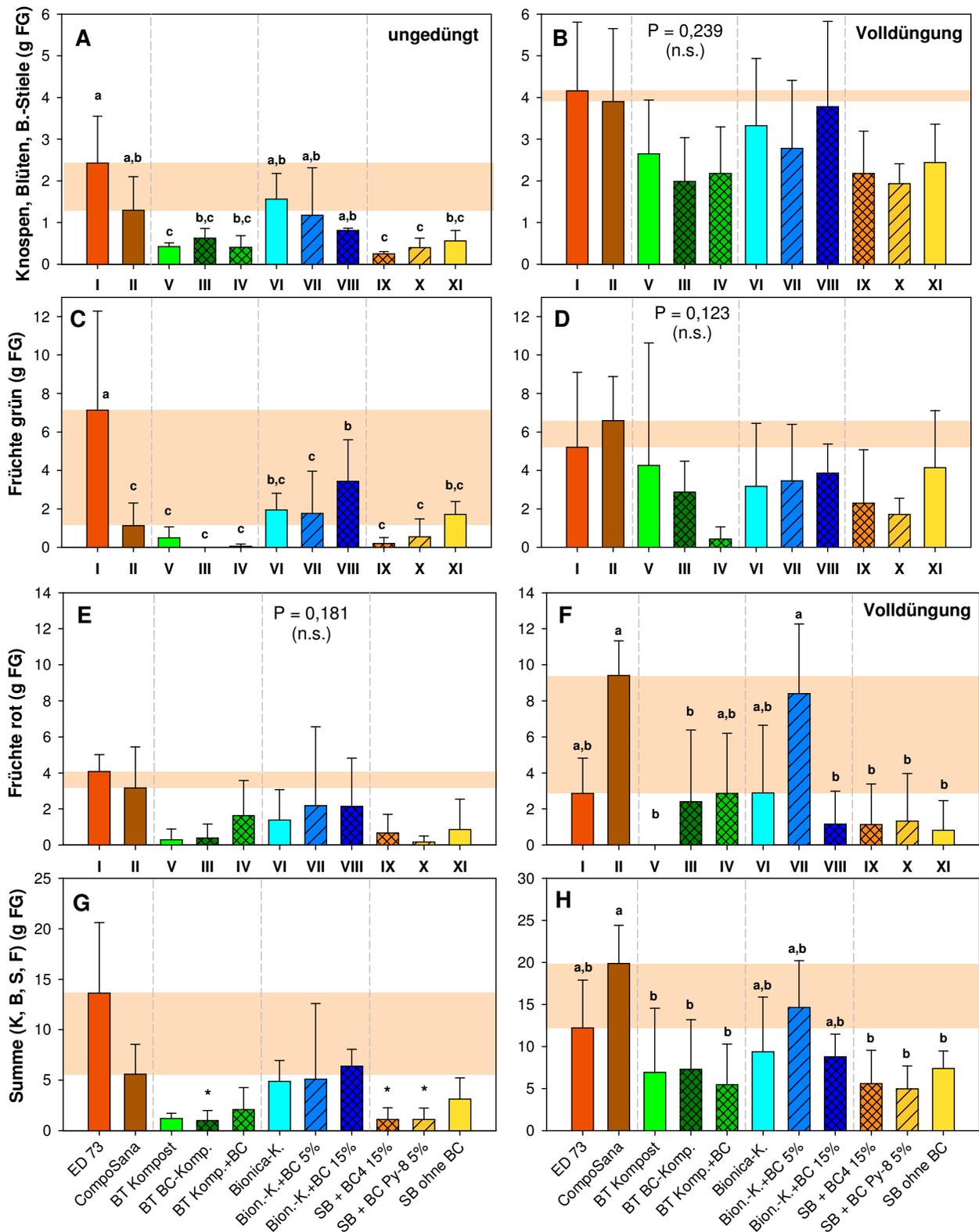


Abbildung 3.7: Mittlere Biomasse der Fruchtsätze plus Standardabweichung, Links: ungedüngte Varianten, Rechts: Varianten mit Volldüngung. Linien, schattierte Bereiche und Statistik wie in Abb. 3.2; Abb. G: Stern = signifikanter Unterschied zu ED 73. **A, B:** Biomasse von Knospen, Blüten und Stielen; **C, D:** Biomasse der grünen Früchte, **E, F:** Biomasse der roten Früchte; **G, H:** Gesamtbiomasse. (Bitte beachten: verschiedene Y-Achsen-Skalierungen!)

In Abbildung 3.7 wurde zur Darstellung das Frischgewicht statt des Trockengewichts gewählt, da bei **Erdbeerfrüchten** eher das Frischgewicht von gärtnerischem Interesse wäre. (Ansonsten werden im Folgenden stets Trockengewichte dargestellt.)

In der ungedüngten Variante lieferte stets das (herstellerseitig aufgedüngte) Torfsubstrat ED 73 die höchsten **Frucht- bzw.- Fruchtstand-Biomassen**; besonders bei dem Behang mit noch grünen Früchten war dies auffällig (Abb. 3.7 C). Die COMPO SANA-Blumenerde hingegen erzielte deutlich schlechtere Erträge, die zudem nie höher als die der Bionika-Komposte (mit oder ohne Biochar-Zumischung) waren. Im Gegenteil, bei dem Behang mit grünen Früchten zeigte v.a. der Bionika-Kompost mit 15 % Biochar-Zumischung signifikant höhere Erträge als COMPO SANA. Innerhalb der Gruppe der Bayreuther Komposte zeigte der Kompost mit frischer Biochar-Zumischung etwas mehr rote Früchte als die anderen beiden BT-Komposte; bei der sandigen Braunerde wirkte die Zumischung von Biochar hingegen negativ auf den Fruchtansatz, vergleichen mit Braunerde ohne Biochar-Zugabe.

In der gedüngten Variante war die Schwankungsbreite (Standardabweichung) sehr groß, daher war bei einigen Ergebnissen der Einfluss des Substrats nicht signifikant (dort wird jeweils der P-Wert in der Graphik angegeben). Beim **Ertrag roter Früchte** lieferte diesmal die COMPO SANA-Blumenerde die höchsten Fruchterträge (Abb. 3.7 F) sowie die höchste Anzahl grüner Früchte (Abb. 3.7.D), höher noch als die der ED 73. Überraschend war der große Ertrag roter Früchte bei dem Bionika-Kompost mit 5 % Biochar-Zugabe, nicht aber bei einer höheren Zugabe von 15 %; Bionika + 5 % lieferte fast ebenso hohe Erträge wie COMPO SANA (kein signifikanter Unterschied, Abb. 3.7 F). Die große Menge an bereits roten Früchten bei COMPO SANA und Bionika + 5 % Biochar deuten auf eine beschleunigte Fruchtreife hin, da bei diesen Varianten nicht grundsätzlich mehr Knospen und grüne Früchte angelegt waren (Abb. 3.7 B, D). Das gleiche Bild zeigt sich innerhalb der Gruppe der Bayreuther Komposte mit Düngung: Während der Kompost ohne Biochar noch gar keine roten Früchte aufwies, waren diese bei den beiden Biochar-Komposten bereits vorhanden. Auch hier war die Anzahl neu angelegter Knospen und Blüten oder grüner Früchte durch Biochar-Zugabe aber nicht erhöht, eher erniedrigt (Abb. 3.7 D). In reinem Boden ohne Kompost- oder Torfzugabe wirkte Biochar, wie schon bei der ungedüngten Variante, eher hemmend auf die Fruchtentwicklung.

Die **Gesamtbiomasse** – Blätter, senescente Blätter, gesamte Fruchtstände (von Knospen bis rote Früchte) sowie vegetative Ausläufer – war auf ED 73 stets am größten (Abb. 3.8 oben). Ohne Düngung war die Gesamtbiomasse bei den Bionika-Komposten jedoch ebenso hoch wie der mit COMPO SANA-Blumenerde; die höchsten Massen lieferte der Bionika-Kompost mit + 5 % Biochar-Zumischung. Die Bayreuther Komposte sowie die reine Braunerde (mit und ohne Biochar) lieferte durchweg geringere Erträge, sowohl mit als auch ohne Düngung. Innerhalb der Bayreuther Komposte wies stets der Biochar-Kompost den höchsten Ertrag auf (allerdings war der Unterschied zu den anderen BT-Komposten nicht signifikant). Die **Blattbiomasse** der ungedüngten Erdbeeren zeigte das gleiche "Antwortmuster" wie die Gesamtbiomasse (Abb. 3.8 links); auch hier war die Blattmasse der Variante Bionika + 5 % Biochar höher als die auf COMPO SANA, während die Blattmasse auf Bionika pur bzw. mit 15 % Biochar der Blattmasse auf COMPO SANA-Substrat entsprach. Die Blattmassen der gedüngten Varianten waren nicht signi-

fikant verschieden voneinander, was aber an der starken Streuung (Variabilität) des Pflanzenwachstums lag (siehe Standardabweichung in Abb. 3.8, rechts).

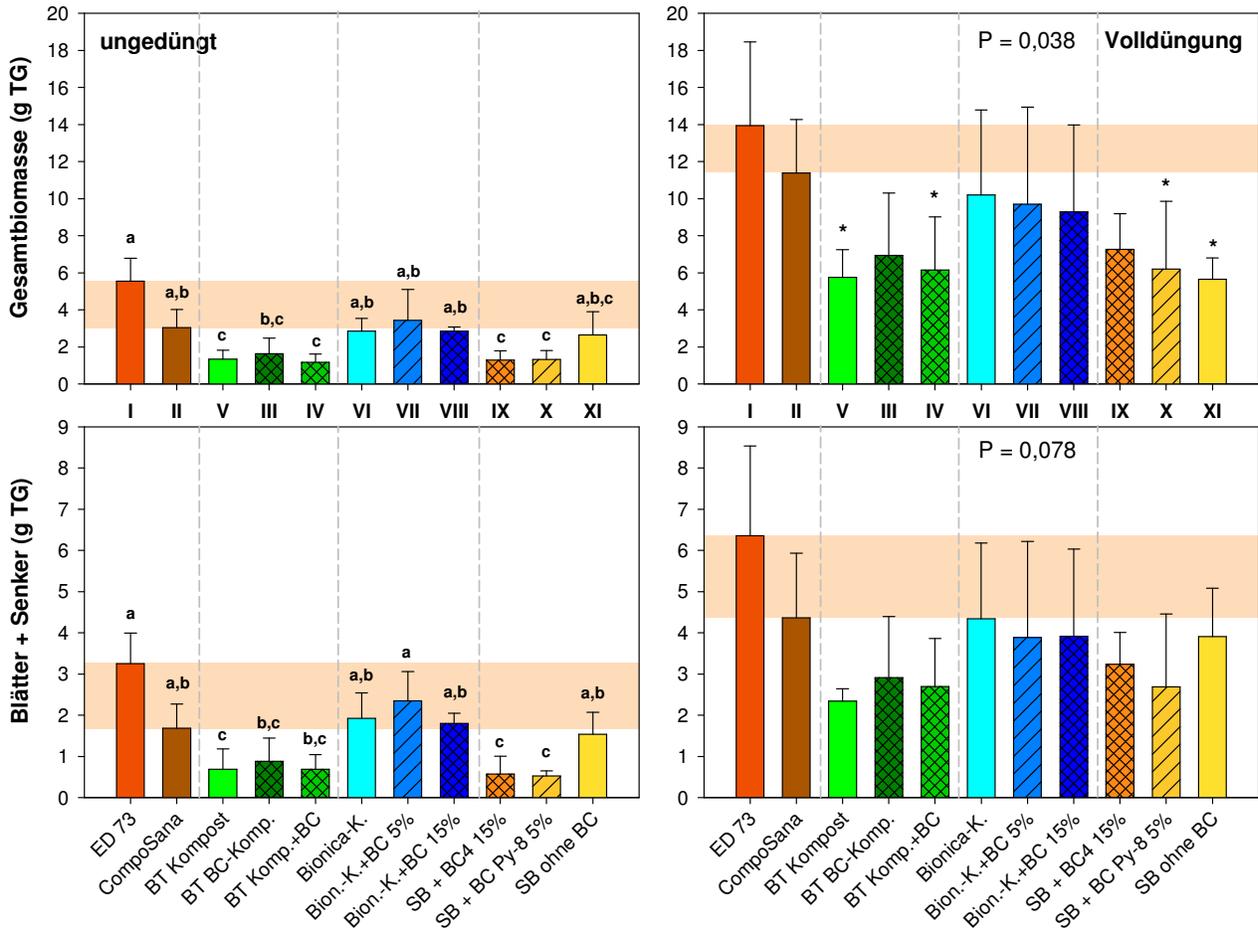


Abbildung 3.8: Mittlere Gesamtbiomasse (Blätter, Fruchtansätze) vom Beginn des Projekts bis zur Ernte (oben) bzw. Blattbiomasse und Senker (Ausläufer) ohne senescente Blätter, jeweils plus Standardabweichung. Verschiedene Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede zwischen den Substraten; bei schwach signifikanten Effekten sind die P-Werte angegeben. Beim Gesamtertrag, gedüngt (oben rechts) bestanden keine signifikanten Unterschiede mittels Tukey-Test. Die Sterne zeigen signifikante Unterschiede zur ED 73 mittels Dunnett-Test an.

Grundsätzlich wurde bei jeder Substrat-Variante **der Gesamtertrag durch Düngung signifikant gesteigert** (Steigerungsfaktoren: Tabelle 3.1). Die Steigerungsraten waren bei den Erdbeeren weniger dramatisch als bei einigen der Radieschen-Substrate, vermutlich weil die Erdbeeren kleine Pflanzballen (mit Nährstoffen darin) mitbrachten. Dennoch waren die Steigerungen durch Düngung bei den Bayreuther Komposten und bei den Braunerden mit Biochar-Zugabe tendenziell größer, d.h. diese Substrate profitierten stärker von der Düngung und der Nährstoffbedarf war größer. Interessant sind die hohen Steigerungsraten der Fruchtstand-Biomasse und der Menge der roten Früchte beim Bayreuther Biochar-Kompost sowie bei der Braunerde mit Pyreg-Biochar (Var. X), sowie der leichte Rückgang der Anzahl der Fruchtstände und roten Früchte durch Düngung (= Faktor < 1) bei der Torferde ED 73. Die Fruchtansätze und

Früchte wurden bei der COMPO SANA in etwa im gleichen Maß durch Düngung gesteigert wie beim Bionika-Kompost + 5 % Biochar.

Tabelle 3.1: Steigerung des Biomasse-Ertrags (BM) der Erdbeeren durch Düngung (Berechnung der Steigerungsfaktoren = BM gedüngt / BM ungedüngt); Berechnung aus folgenden Größen: Blattbiomasse in g Trockengewicht; Fruchtstände in g Frischgewicht; rote Früchte in g Frischgewicht; Gesamt(-biomasse): alle geernteten Teile, in g Trockengewicht. Die farbliche Hinterlegung sowie die Nummerierung der Substratmischungen entsprechen denen in den Graphiken. (Leere Zelle bei V: Keine roten Früchte ohne Düngung.)

Variante	I	II	V	III	IV	VI	VII	VIII	IX	X	XI
Blattmasse	3,4	4,3	4,2	4,1	5,9	4,0	2,8	3,7	5,8	4,7	2,1
Fruchtstände	0,9	3,6	5,7	7,2	2,6	1,9	2,9	1,4	5,0	4,5	2,4
Rote Früchte	0,7	3,0	---	6,2	1,8	2,1	3,8	0,5	1,7	7,9	1,0
Gesamtertrag	2,5	3,7	4,3	4,2	5,3	3,6	2,8	3,3	5,7	4,7	2,1

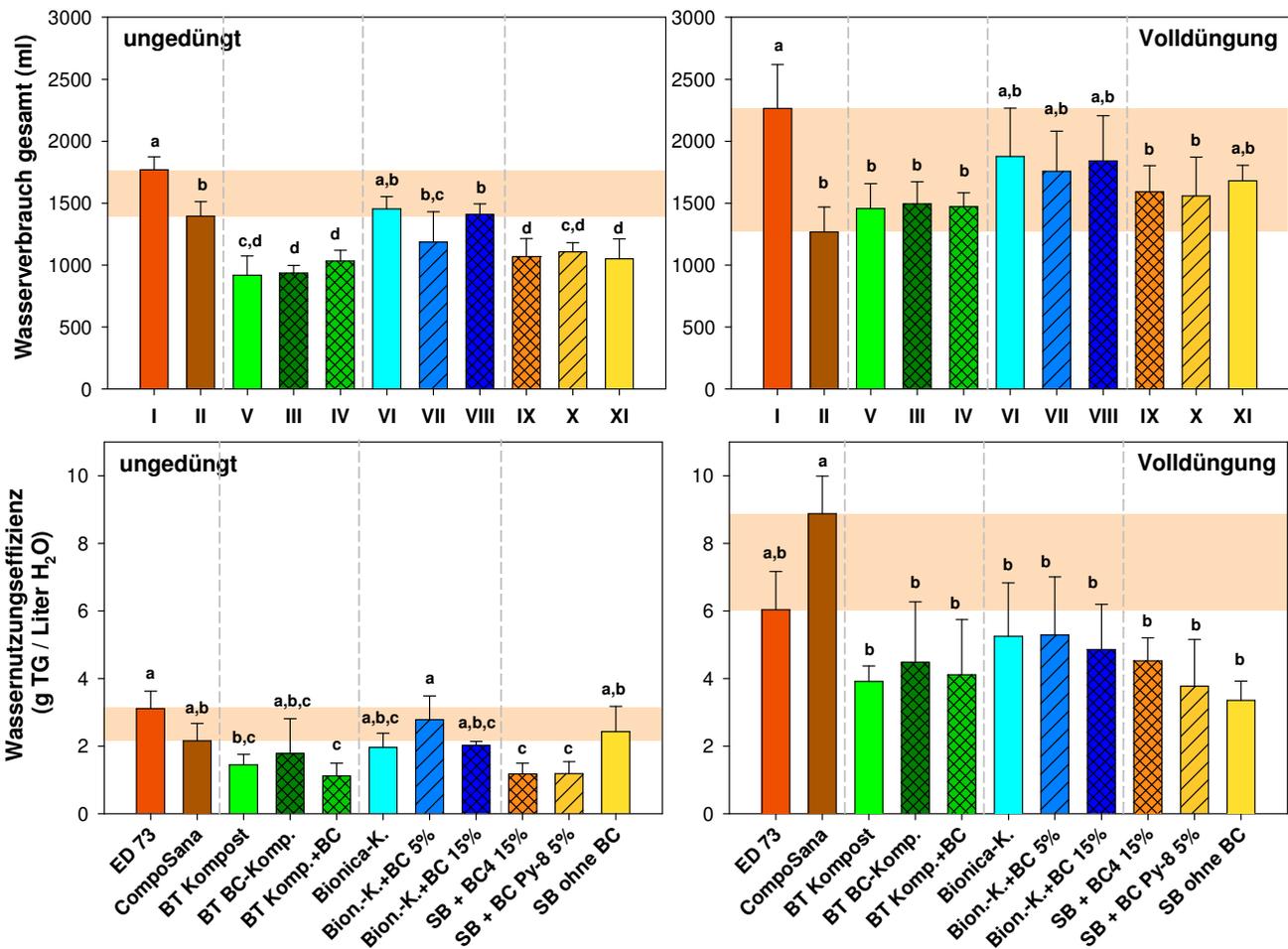


Abbildung 3.9: Wasserverbrauch über die Dauer des Experiments (oben) und mittlere Wassernutzungseffizienz (g Ertrag pro Liter Wasserverbrauch); Symbole, Farben und Statistik wie zuvor.

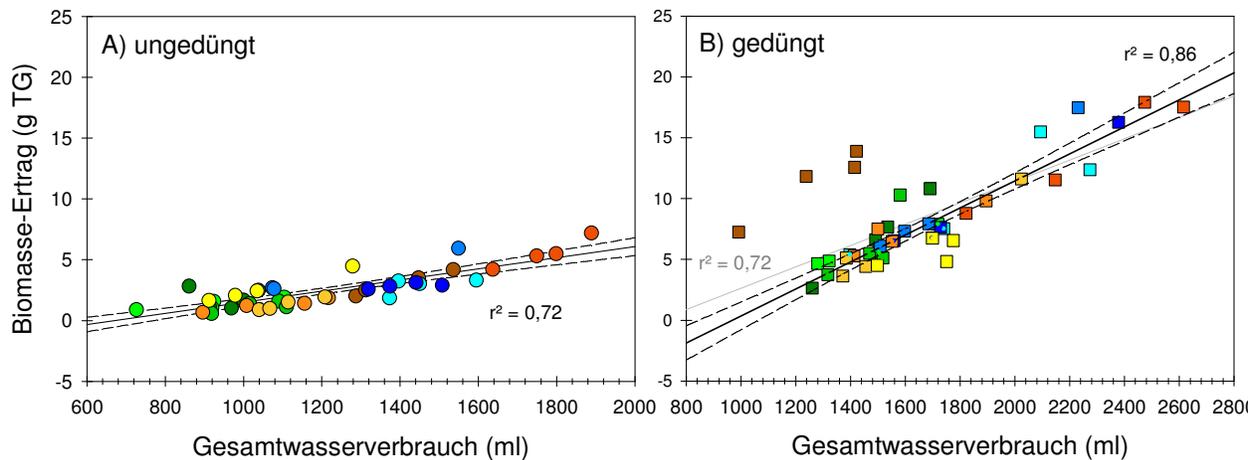


Abbildung 3.10: Beziehung zwischen Wasserverbrauch und Biomasseertrag der Erdbeerpflanzen; die Regressionen waren jeweils hochsignifikant, das Bestimmtheitsmaß (r^2) ist in der Graphik dargestellt. Das Einschließen der COMPO SANA-Werte (B) führte zu einer schlechteren Korrelation (r^2 und Gerade in grau) als der Ausschluss dieser Daten (r^2 und Gerade in schwarz; gestrichelt: 95% Konfidenzintervall), was die Sonderstellung dieser Substratvariante unterstreicht.

Der gesamte **Wasserverbrauch** der Erdbeerpflanzen und –Gefäße durch Transpiration (Pflanzen) und Evaporation (Verdunstung von der Bodenoberfläche) stieg in den gedüngten Varianten an (Abb. 3.9 oben), da die größeren Pflanzen mehr Wasser verbrauchten. Der mittlere Anstieg betrug zwischen 0 und 60 % je nach Substrat. Es bestand eine signifikante Korrelation zwischen der Größe der Pflanzen (Gesamtbiomasse) und dem Wasserverbrauch (Abb. 3.10). Generell nutzten die größten Pflanzen das Wasser am besten aus, d.h. sie produzierten mehr Masse bei gleichem Wasserverbrauch (Abb. 3.9 unten). Düngung steigerte die **Wassernutzungseffizienz (WUE)** enorm (Abb. 3.9, vgl. links mit rechts); eine Sonderstellung nahmen hier die COMPO SANA-Pflanzen ein, die eine signifikant höhere WUE aufwiesen als die Pflanzen aller anderen Substrate – ihr Wasserverbrauch blieb mit und ohne Düngung praktisch gleich. Die Wasserverbrauchswerte der COMPO SANA-Pflanzen liegen alle außerhalb der Regressionsgeraden und des 95 %-Konfidenzintervalls (Abb. 3.10 B), während sonst nur einzelne Gefäße außerhalb liegen, bzw. in beide Richtungen von der Regressionsgeraden abweichen. Bei guter Wasserversorgung wie in diesem Versuch steigerte die Zugabe von Biokohle die Wassernutzungseffizienz nicht grundsätzlich.

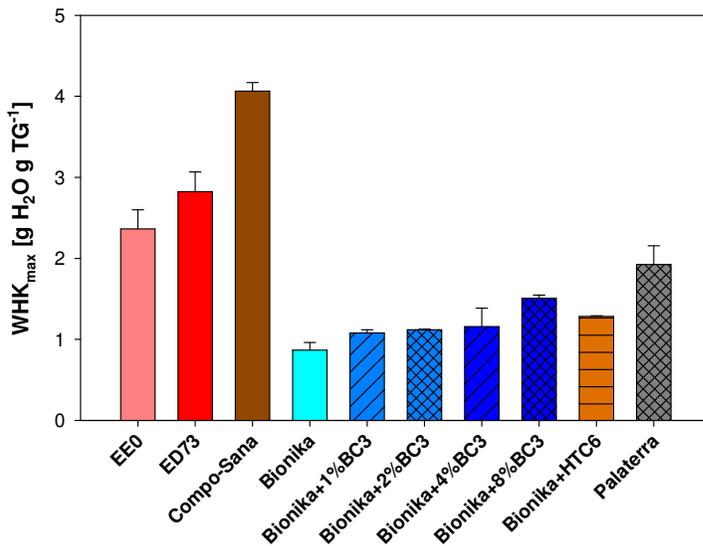
3.1.3 Zusatzversuch 1: Radieschen-Neusaat ohne Bewässerungssystem

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts ist der Zusatzversuch 1 noch nicht abgeschlossen, die Radieschen haben gerade mit der Knollenbildung begonnen. Sobald die Ergebnisse vorliegen, wird dieser Bericht erweitert und dem Auftraggeber zur Kenntnis vorgelegt – zum beidseitigen Erkenntnisgewinn, auch wenn dieser Versuch nicht zu den vereinbarten Leistungen gehört.

3.1.4 Zusatzversuch 2: Gerste auf Substraten ohne Bodenbemischung

3.1.4.1 Maximale Wasserhaltekapazität der verwendeten Substrate

Die maximale Wasserhaltekapazität (WHK_{max}) der verwendeten Substrate ohne Mischung mit sandiger Braunerde war in Einheitserde Null (EE0) mit $2,36 \text{ g H}_2\text{O g TG}^{-1}$ und in ED 73 mit $2,83 \text{ g H}_2\text{O g TG}^{-1}$ geringer als in COMPO SANA mit $4,06 \text{ g H}_2\text{O g TG}^{-1}$. Von allen untersuchten



Substratmischungen war die WHK_{max} bei dem Bionika-Kompost mit $0,87 \text{ g H}_2\text{O g TG}^{-1}$ am geringsten. Die Zumischung von Biochar BC-3 (aus Weizenstroh) führte mit steigender Konzentration zu einer Erhöhung der WHK_{max} auf $1,51 \pm 0,04 \text{ g H}_2\text{O g TG}^{-1}$ bei Zugabe von 8 % BC-3. Die Zugabe von ebenfalls 8 % Rindenbiokohle aus hydrothermalen Karbonisierung (HTC-6) erhöhte die WHK_{max} auf $1,29 \pm 0,01 \text{ g H}_2\text{O g TG}^{-1}$. Das Palaterra-Substrat erreichte eine WHK_{max} von $1,92 \pm 0,23 \text{ g H}_2\text{O g TG}^{-1}$ (Abb. 3.11).

Abbildung 3.11: Maximale Wasserhaltekapazität der im Gerstetest verwendeten Substrate

3.1.4.2 Keimungsraten

Bereits nach fünf Tagen waren auf den verschiedenen Substratvarianten signifikant unterschiedliche Gerste-Keimungsraten festzustellen ($P=0,002$). Auf dem Palaterra-Substrat keimten mit $27 \% \pm 26$ am wenigsten Gerstesamen¹⁰. Bei oberflächlich aufgetragenem Palaterra-Substrat lag die Keimungsrate bei $80 \% \pm 4$. Es keimten mindestens $75 \% \pm 14$ (Bionika + 1 % BC-3) und höchstens $95,0 \% \pm 5$ (Bionika + 8 % BC-3). Nach 17 Tagen, bei der Ernte, waren die Keimungsraten der verschiedenen Bodenmischungen nicht mehr signifikant verschieden ($P = 0,078$; Kruskal-Wallis-ANOVA). Hier keimten wenigstens $87,0 \% \pm 12$ (COMPO SANA) und höchstens $100 \% \pm 0$ (Bionika + 8 % BC-3) aller Gerstesamen. Die Keimung auf Palaterra betrug nach 17 Tagen $91 \% \pm 3$, d.h. bei ausreichender Befeuchtung waren Samen nachgekeimt¹⁰. Die Keimungsergebnisse sind in Tabelle 3.2 zusammen gefasst.

¹⁰ Die Ursache hierfür könnte evtl. in der schlechten Benetzbarkeit des sehr trockenen Palaterra-Substrats liegen, da nach Ansatz des Experiments (an einem Freitag) alle Pflanzgefäße gleichermaßen vom Wochenend-Gießdienst des Gewächshauses übersehen und somit nach zwei Tagen wieder gegossen wurden. Das Palaterra-Substrat hatte beim ersten Gießen offenbar trotz seiner eigentlich hohen Wasserkapazität zu wenig Wasser aufgenommen, so dass die Samen während der empfindlichen Keimungsphase nicht genügend Feuchtigkeit bekamen. Die Resultate sind daher mit Vorsicht zu betrachten. Die schlechte Wieder-Benetzbarkeit nach starkem bis völligem Austrocknen ist auch ein typisches Charakteristikum von Torferden.

Tabelle 3.2: Keimung, Biomasse und Wassergehalt der Sommergerste auf verschiedenen Kultursubstraten mit und ohne Biokohle nach 17 Tagen.

Substrat	Biokohle [% , g/100 g]	Keimung nach....		Ernteparameter	
		5 Tagen [%]	17 Tagen [%]	TG pro Spross [mg]	Wassergehalt [g H ₂ O g TG ⁻¹]
EE0	---	84 ± 7 ^{a,b}	92 ± 6	11 ± 2 ^a	0,91 ± 0,01 ^{a,b}
E73	---	90 ± 3 ^{a,b}	95 ± 3	40 ± 4 ^b	0,92 ± 0,01 ^a
Compo-Sana ^R	---	85 ± 17 ^{a,b}	87 ± 11	30 ± 3 ^c	0,90 ± 0,00 ^b
Bionika	0	79 ± 8 ^{a,b}	93 ± 9	39 ± 4 ^b	0,93 ± 0,00 ^a
Bionika + BC-3	1	75 ± 14 ^{a,b}	92 ± 6	34 ± 5 ^{b,c}	0,93 ± 0,01 ^a
Bionika + BC-3	2	82 ± 8 ^{a,b}	91 ± 3	38 ± 3 ^b	0,92 ± 0,01 ^{a,b}
Bionika + BC-3	4	92 ± 3 ^a	94 ± 2	39 ± 4 ^b	0,92 ± 0,01 ^{a,b}
Bionika + BC-3	8	95 ± 5 ^a	100 ± 0	32 ± 0 ^{b,c}	0,92 ± 0,00 ^a
Bionika + HTC-6	8	90 ± 4 ^{a,b}	92 ± 3	37 ± 6 ^{b,c}	0,92 ± 0,01 ^{a,b}
Bionika + HTC-6 _{wash}	8	76 ± 7 ^{a,b}	86 ± 8	35 ± 2 ^{b,c}	0,92 ± 0,00 ^{a,b}
Palaterra	???	27 ± 26 ^b	91 ± 3	29 ± 5 ^{c,d}	0,92 ± 0,00 ^a
Palaterra _{oberfl.}	???	80 ± 4 ^{a,b}	96 ± 1	25 ± 1 ^d	0,91 ± 0,01 ^{a,b}

Unterschiedliche Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede zwischen den Substraten (ANOVA)

3.1.4.3 Trockengewichte (TG) und Wassergehalt

Die pflanzliche Biomasse der Sommergerste-Keimlinge war bei allen Ansätzen signifikant höher als bei der Nullkontrolle EE0. Keimlinge auf Vollerde (ED 73) erreichten das größte Trockengewicht von 40 mg ± 4 pro Keimling (Tabelle 3.2, Abb. 3.12 A). Die Trockengewichte der Varianten auf Grundlage von Bionika waren bei Zumischung von 8 % BC-3 mit 32 mg ± 0 und von 1 % BC-3 mit 34 mg ± 5 etwas geringer, statistisch aber nicht signifikant von ED 73 unterscheidbar. Andere Varianten mit Bionika erzeugten einen Biomassezuwachs von 39 mg ± 1 pro Keimling, was praktisch dem der ED 73 entsprach. Mit 30 mg ± 3 waren Gerstekeimlinge auf COMPO SANA, und mit 29 ± 5 mg auf Palaterra signifikant leichter als Pflanzen auf ED 73. Mit Palaterra überschichtete Nullerde führte zum geringsten Wachstum mit 25 ± 1 mg, abgesehen von der EE0 selbst. Immerhin bewirkte der Auftrag von nur 1 cm Palaterra auf EE0 jedoch eine Steigerung im Trockengewicht pro Keimling um das 1,42-fache.



Foto 3.4: Zusatzversuch 2 mit Sommergerste: Keimung nach 5 Tagen. Messbalken = 11 cm. Vom linken Rand bis zum rechten Rand je exemplarisch ein Pflanztopf für die Substratmischungen wie in Abb. 3.12 aufgelistet (Kamera: PENTAX K200D, PENTAX 18-55II; Foto: Y. Kühnel & C. von Bredow)

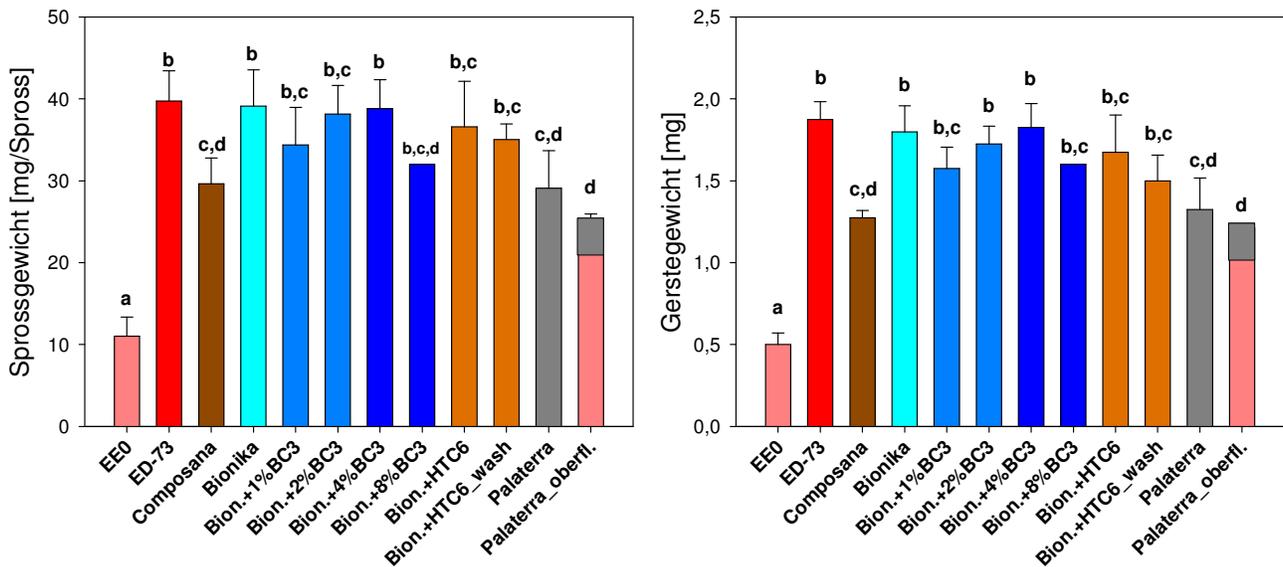


Abbildung 3.12: Mittleres Gewicht pro Keimling (links) und mittleres Gewicht pro Gefäß (d.h. pro 50 ausgesäten Samen) plus Standardabweichung. Unterschiedliche Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede zwischen den Substraten (ANOVA, Tukey-Test).

Die **Gerstebiomasse pro Gefäß** (Abb. 3.12 rechts) war mit den Bionika-Komposten gegenüber COMPO SANA grundsätzlich gesteigert, bei reinem Bionika-Kompost und bei Bionika-Kompost + 4 % Biochar signifikant um 41 und 43 %. Die geringsten Steigerungen gegenüber der COMPO SANA waren bei Zugabe von HTC-Rindenbiokohle zu verzeichnen und betragen 31 % bei der ungewaschenen HTC und 18 % bei der gewaschenen HTC-Rindenbiokohle. Damit verringerte der Zusatz von gewaschener HTC-Rindenbiokohle den Keimlingsertrag gegenüber dem Kompost ohne Zusatz signifikant. Insgesamt lieferten die beiden Substrate "Bionika-Kompost" sowie "Bionika-Kompost + 4 % Biochar" den gleichen Keimlingsertrag wie die hoch gedüngte ED 73 Torferde. Der Wassergehalt der Biomasse variierte zwischen $0,90 \text{ g g}^{-1} \pm 0,0$ ($\text{g H}_2\text{O g Frischgewicht}^{-1}$) auf COMPO SANA und $0,93 \text{ g g}^{-1} \pm 0,0$ auf Bionika, und Bionika plus 1 % BC-3. Pflanzen, die auf Bionika und Bionika-Biokohle oder Palaterra-Variationen wuchsen, enthielten signifikant mehr Wasser als Pflanzen auf dem Torfsubstrat COMPO SANA.

3.2 Ergebnisse der Treibhausgas-Emissionsmessungen

3.2.1 Inkubation der gedüngten Pflanzsubstrate – THG-Emissionen

3.2.1.1 CO₂-Emissionen: Zersetzung der organischen Bestandteile

Über die Dauer des Inkubationsversuchs war die CO₂-Abgabe wenige Tage nach Düngertzugabe und Einstellung von 60 % der WHK_{max} in jeder Substratmischung in den meisten Varianten höher als am Ende. Bei den Torfsubstraten sowie bei der sandigen Braunerde ohne Biochar-Zugabe sank die CO₂-Abgabe exponentiell auf einen ± stabilen Basiswert ab. Die stärkste Reduktion (Beginn / Ende) um das 13,7-fache war in COMPO SANA und in der sandigen Braunerde zu beobachten (um das 11,4-fache, Abb. 3.13 A, C); bei der ED 73 Torferde verringerte sich die Emission um das 3,4-fache gegenüber dem Beginn. Aus den Biokohle-Komposten war die CO₂-Abgabe hingegen zu Anfang und am Ende fast identisch, mit einer kleinen zwischenzeitlichen Steigerung (Abb. 3.13 C).

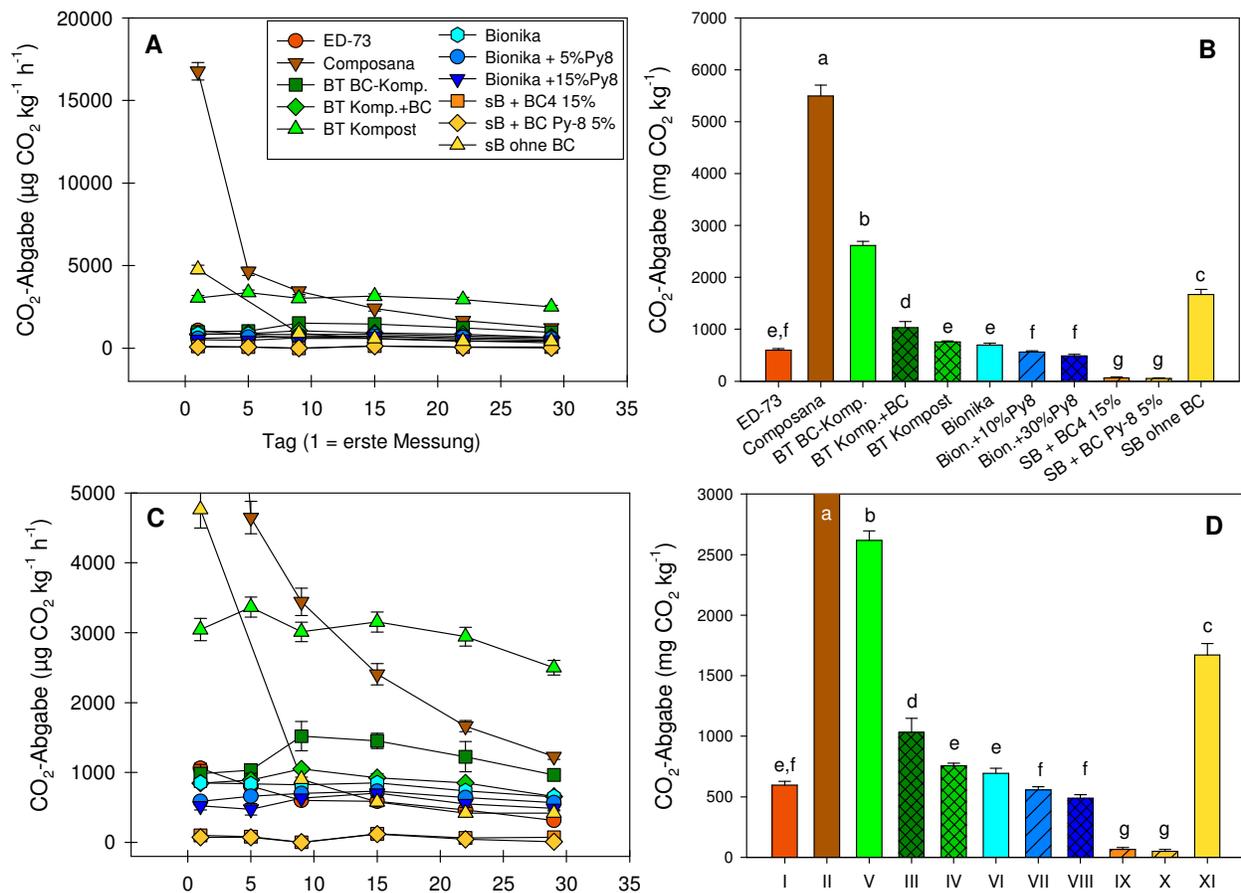


Abbildung 3.13: CO₂-Abgaberraten der verschiedenen Substratmischungen (A) und Summe der CO₂-Abgabe über die 29 Tage der Inkubation (B) ± Standardabweichung. Abb. C und D darunter: Vergrößerungen von A und B. Farb- und Mustergebung wie in Abb. 3.2; verschiedene Buchstaben in (B, D) bedeuten signifikante Unterschiede in der CO₂-Freisetzung zwischen den jeweiligen Substraten.

In der Summe zeigte die COMPO SANA Substratmischung über die 29 Tage der Inkubation die signifikant höchste CO₂-Abgabe, die v.a. aus sehr hohen Anfangsraten resultierte. Im Verlauf der Inkubation sanken diese aber unter die des Bayreuther Komposts ohne Biochar, der in etwa gleichbleibend hohe CO₂-Emissionen zeigte. Das Zumischen von Biochar verringerte die CO₂-Emissionen stets signifikant verglichen mit gleichen Grundsubstraten ohne Biochar (Abb. 3.13 D): Beim Bayreuther Kompost um 60 % und 71 % (BC-Kompost, Kompost + BC), beim Bionika-Kompost um 20 % und 30 % (+5 und +15 % Biochar) und bei der sandigen Braunerde um 96 % und 97 %.

3.2.1.2 N₂O-Emissionen – Indikator der mikrobiellen Stickstoff-Umsetzungen

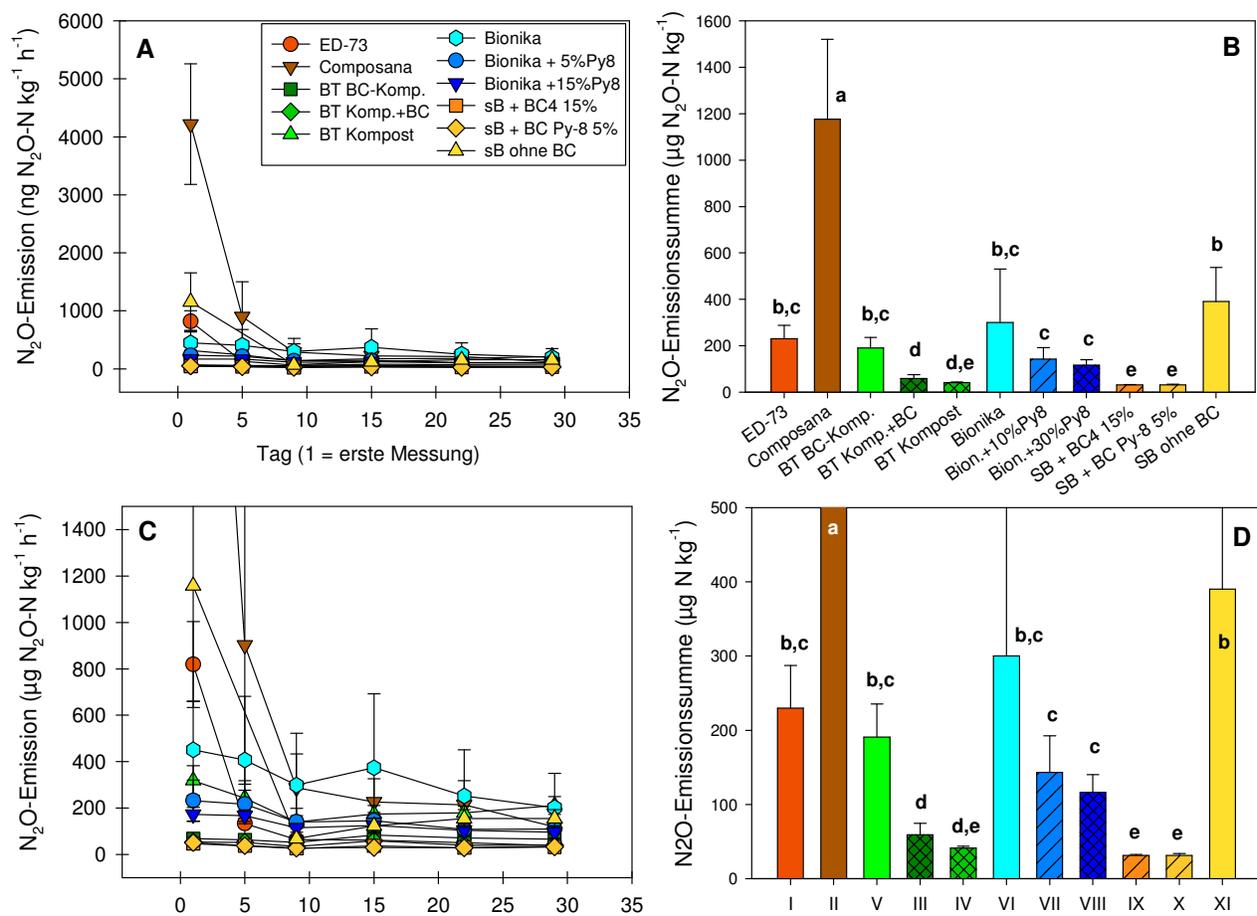


Abbildung 3.14: N₂O-Emissionsraten der verschiedenen Substratmischungen (A) und die Summe der N₂O-Emissionen über die 29 Tage der Inkubation (B) ± Standardabweichung. Abb. C und D darunter: Vergrößerungen von A und B. Farb- und Mustergebung wie in Abb. 3.2; verschiedene Buchstaben in (B, D) bedeuten signifikante Unterschiede in der N₂O-Emissionssumme zwischen den jeweiligen Substraten.

Anfangs nach Düngung zeigten die Torfsubstrate sowie die sandige Braunerde ohne Biochar die höchsten N₂O-Emissionen, die aber im Verlauf der Inkubation rasch absanken (Abb. 3.14 A, C). Zwischen Anfang und Ende der Inkubation sanken die N₂O-Emissionen bei COMPO SANA-

Substrat um das 35,4-fache, bei ED 73 um das 21,7-fache und bei der sandigen Braunerde immerhin noch um das 7,5-fache. Bei den Komposten bzw. den Substraten mit Biokohlezugabe sanken die N₂O-Emissionen zwischen Beginn und Ende jedoch kaum, sie bleiben fast auf dem gleichen Niveau

In der Summe über die 29 Tage der Inkubation verringerte die Zugabe von Biochar die N₂O-Emissionen immer gegenüber den gleichen Ausgangssubstraten ohne Biochar-Zugabe: Bei dem Bayreuther Kompost signifikant um 69 % und 78 %, bei Bionika um 52 % und 61 % und bei der sandigen Braunerde jeweils um 92 %. Eine Verdoppelung oder Verdreifachung der Biochar-Zugabe erbrachten jedoch keine linear verringerten N₂O-Emissionen (s.o.); waren diese bereits stark verringert, so reduzierten sie sich nur noch geringfügig weiter (Abb. 3.14 D).

Es ist wahrscheinlich, dass die **erzielten Ergebnisse als "konservativ" anzusehen** sind, was das Potential zur N₂O-Emissionsminderung betrifft: Durch die einmalige, eher geringe N-Düngung wurde die Minderung durch Biokohle eher *unterschätzt*, während die N₂O-Abgabe aus den Torfsubstraten bei stärkerer / wiederholter Düngung zugleich *wesentlich höher ausgefallen wäre* (wie zu Beginn, siehe Abb. 3.14 A, C).

Besonders interessant war die Frage, ob Biochar auch nach längerer Zeit noch die N₂O-Emissionen reduziert; dies wird durch den Bayreuther Biochar-Kompost teilweise beantwortet: *Die N₂O-Emissionen waren immer noch signifikant reduziert – ein sehr viel versprechendes Ergebnis!*

3.2.1.3 CH₄-Flüsse – Oxidation oder Produktion von Methan?

Die **Methanflüsse** waren in allen Substratvarianten **verhältnismäßig gering** gegenüber den anderen beiden Treibhausgasen (Abb. 3.15). Die Flussraten (CH₄-Aufnahme oder -Abgabe) lagen oft unterhalb der Nachweisgrenze des Gaschromatographen. Hier zeigte das COMPO SANA-Substrat eine kontinuierliche Entwicklung, von einer leichten CH₄-Quelle hin zu einer leichten CH₄-Senke (d.h. Aufnahme von CH₄ in das Substrat = Methanoxidation, d.h. negative Werte in Abb. 3.15 B). Die beiden sB + Biokohle Mischungen zeigten ebenfalls eine leichte CH₄-Aufnahme, im Gegensatz zur sB ohne Biokohlezugabe. Interessant ist, dass alle Bayreuther Komposte Methan emittierten; die höchsten Emissionen zeigte der BT-Kompost mit frisch hinzu gefügtem Biochar, gefolgt von dem Kompost "pur", während der Biokohle-Kompost die geringsten CH₄-Emissionen zeigte. Die CH₄-Emissionen beiden Torfsubstrate ED 73 und COMPO SANA waren überraschenderweise sehr gering (COMPO SANA nur zu Beginn, s.o.).

Um deutlichere Auswirkungen von Biokohle bzw. Biokohle-Komposten auf die CH₄-Flüsse sehen zu können, hätte möglicherweise ein Boden mit hoher CH₄-Oxidationskapazität beschafft werden müssen, was aber zu kurzfristig bzw. zu arbeitsintensiv geworden wäre (Sieben größerer Mengen nassen Waldbodens), oder er hätte gekauft werden müssen, was sehr teuer geworden wäre. Die Verwendung der gleichen Substratmischungen wie im Pflanzexperiment hatte den Vorteil der direkten Vergleichbarkeit zwischen Wuchs- bzw. Ertragsleistung und THG-Emissionen, daher war kein Boden mit CH₄-Oxidationsaktivität beschafft worden.

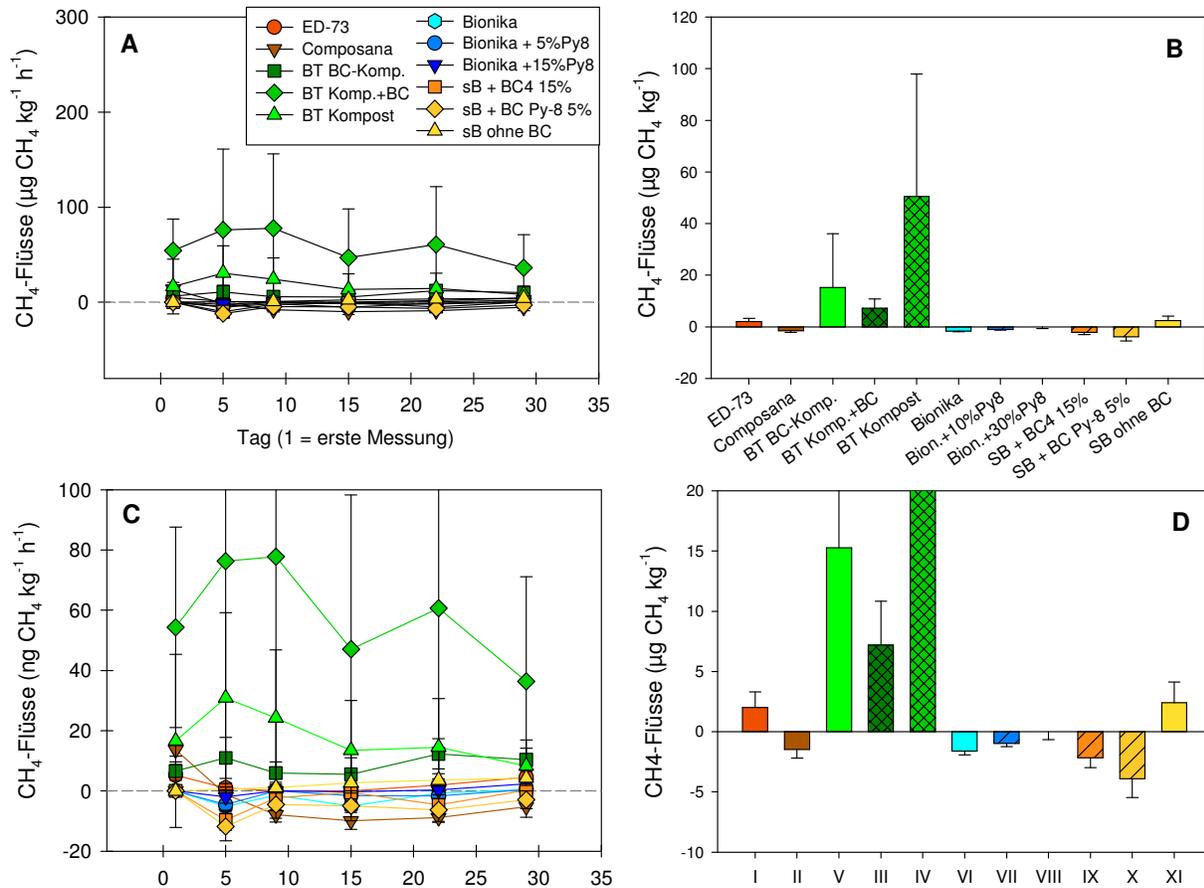


Abbildung 3.15: CH₄-Flüsse (CH₄-Oxidation = Aufnahme und CH₄-Emission = Abgabe) der verschiedenen Substratmischungen (A) und die Summe der CH₄-Flüsse über die 29 Tage der Inkubation (B) ± Standardabweichung. Abb. C und D darunter: Vergrößerungen von A und B. Farb- und Mustergebung wie in Abb. 3.2. Sinnvolle statistische Tests aufgrund der großen Streuung der Ergebnisse nicht möglich.

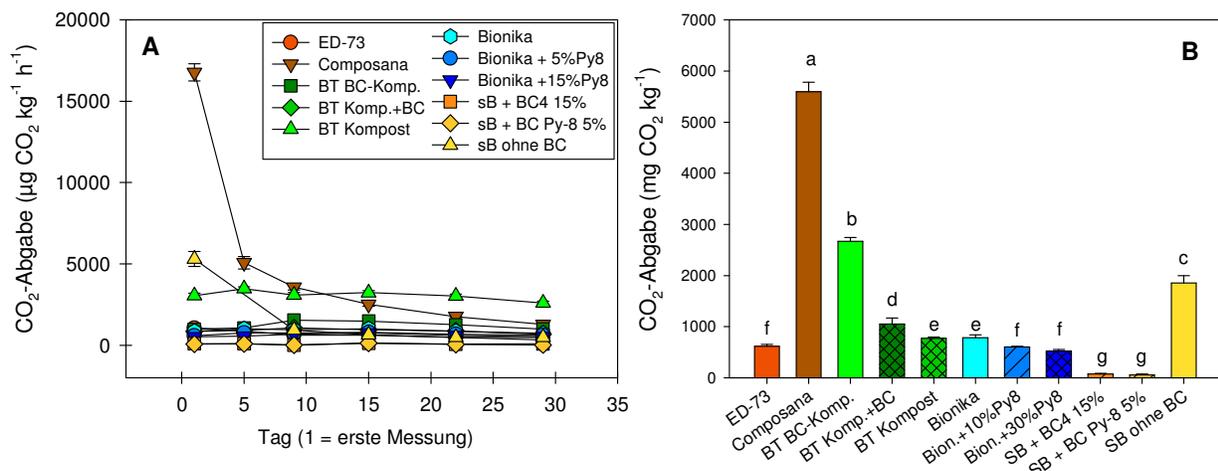


Abbildung 3.16: THG-Emissionen, angegeben als CO₂-Äquivalent-Abgabe ± Standardabweichung, (A) Zeitverlauf und (B) Summe über die 29 Tage Inkubationszeit. Statistik wie in 3.13 + 3.14

3.2.1.4 THG-Bilanz: Die Summe der CO₂-Äquivalente der drei stabilen THGs

Die **Summenbilanz aller drei Treibhausgase** wurde stark von der CO₂-Bilanz bestimmt, in zweiter Linie vom N₂O. Dort, wo durch Zugabe von Biokohlen starke Reduktionen der CO₂-Emissionen auftraten, traten meist auch starke Reduktionen der N₂O-Emissionen auf, wodurch das "Muster" der Ergebnisse von Abb. 3.13 und 3.14 das gewohnte Bild behält (vgl. mit Abb. 3.16).

Auch hier, in der Gesamtbilanz, zeigt COMPO SANA die höchsten THG-Freisetzung, ED 73 hingegen erstaunlich niedrige Freisetzungen, die denen der Bionika - Komposte plus Biokohle gleichen. Hingegen zeigt sandige Braunerde sehr hohe THG-Emissionen, die durch Biochar-Beimischungen überraschend stark (um 96 und 97 %) gesenkt wurden. **Biocharzugabe verringerte somit auch hier die THG-Emissionen** gegenüber gleichen Ausgangssubstraten ohne Biochar-Zugabe; die leichten CH₄-Emissionen bei den Bayreuther Komposten fielen gegenüber den großen Anteilen von CO₂ und N₂O nicht ins Gewicht. Einen Eindruck von den THG-Emissionen bei stärkerer Düngung vermittelt die erste Messung des Inkubationsexperiments, die kurz nach der Düngertzugabe durchgeführt wurde (Abb. A-3.16, Anhang); stärkere Düngung und höhere Wassergehalte hätten sehr wahrscheinlich noch viel höhere THG-Emissionen aus den Torfsubstraten bewirkt⁹.

Berücksichtigt man zudem, dass die CO₂-Emissionen aus den beiden Torfsubstraten als "fossile" CO₂-Emissionen gelten müssen (vgl. Einleitung), die aus den Komposten jedoch als "CO₂-neutral" gelten können, dann ergibt sich ein noch ungünstigeres Bild der Torfsubstrate, und ein sehr viel günstiges Bild der Komposte, v.a. der mit Biokohle versetzten Substrate (Abb. 3.17): Bei den drei Bionika-Komposten (Abb. 3.17) beispielsweise waren die Gesamtemissionen gegenüber ED 73 um 80 %, 84 % und 85 % verringert, und gegenüber COMPO SANA waren sie um erstaunliche 97,6 %, 98,1 % und 98,3 % geringer.

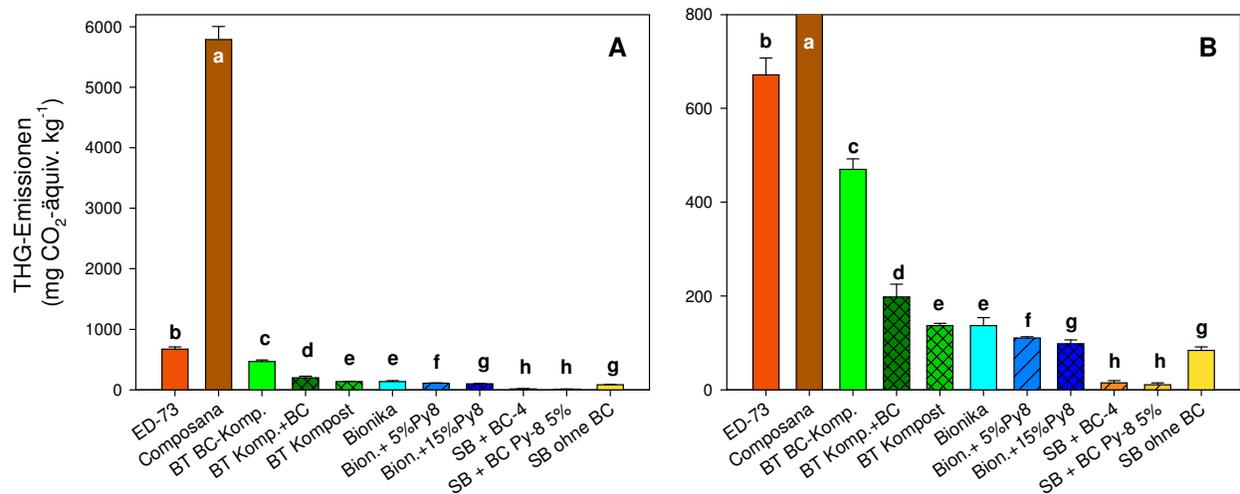
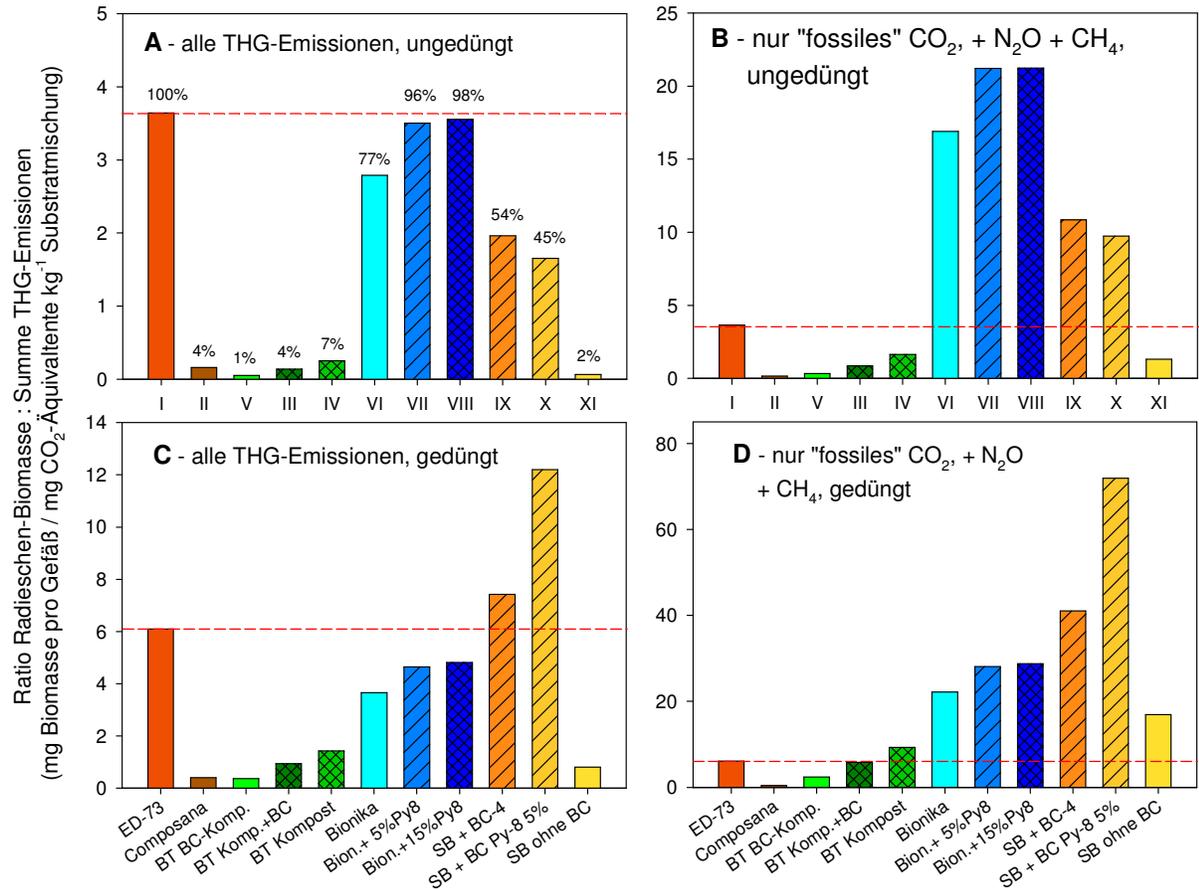


Abbildung 3.17: Summe der THG-Emissionen von CO₂ (nur bei fossilen Substraten), N₂O und CH₄, angegeben als CO₂-Äquivalent-Abgabe ± Standardabweichung über die 29 Tage Inkubationszeit, (A) Überblick und (B) Vergrößerung von A. Statistik wie in 3.13 + 3.14 (Kruskal-Wallis-Test).

3.2.2 Beziehung zwischen Produktivität und THG-Emissionen

Der eigentlich **entscheidende Schritt** ist die Beziehung zwischen der erwünschten Produktivität der Substratmischungen, d.h. der Höhe des Biomasse-Ertrags, und der – unerwünschten – Freisetzung von Treibhausgasen (angegeben als CO₂-Äquivalente, vgl. Abb. 3.17). Dafür wurden die Gesamtbiomasse-Erträge von Radieschen bzw. Erdbeeren in Beziehung zu den THG-Emissionen des Inkubationsversuchs gesetzt¹¹ (vgl. Anmerkung am Ende dieses Abschnitts).



A

Abbildung 3.18: Verhältnis der geernteten Gesamtbiomasse der Radieschen zu den im Inkubationsversuch gemessenen THG-Emissionen der Substratmischungen. **A, C:** Alle THG-Emissionen ohne Berücksichtigung der Tatsache, dass Torfe fossile CO₂-Emissionen verursachen, Komposte jedoch CO₂-neutrale Emissionen; **B, D:** Ratio wie in A bzw. C, jedoch nur unter Berücksichtigung der fossilen CO₂-Emissionen. **A, B:** ungedüngter Radieschenertrag, **C, D:** gedüngter Radieschenertrag. (Keine Angabe von Standardabweichung bzw. Statistik, da hier Mittelwerte zueinander in Beziehung gesetzt wurden; A: exemplari-

¹¹ Es ist zu beachten, dass hier zwei Messgrößen in eine *theoretische* Beziehung zueinander gesetzt wurden, da die THG-Messungen nicht direkt an den Pflanztopfen durchgeführt werden konnten. Es ist jedoch auf der Grundlage des Fachwissens über N₂O-Emissionen, SOC-Abbau und CO₂-Respiration zu erwarten, dass die *tatsächlichen* Verhältnisse, v.a. in den gedüngten Varianten, noch sehr viel ungünstiger für die Torfsubstrate ausgefallen wären; einen ersten Eindruck liefern die Anfangs-THG-Emissionen der Inkubation kurz nach Düngerzugabe (Abb. Anhang).

sche Angabe in % von ED 73, weitere Angaben im Text). *Achtung: Alle Ordinaten sind unterschiedlich skaliert!*

Entscheidend ist hier vor allem der **Vergleich** der Ratios "Biomasse : THG-Emissionen" **der Bionika-Biochar-Komposte mit den Torfsubstraten**, da diese fast immer Erträge brachten, die denen der Torfsubstrate kaum nachstanden bzw. die eines der Torfsubstrate übertrafen (Abb. 3.2 – 3.4). Abbildung 3.18 und Abb. A-3.18 (Anhang) verdeutlichen, dass die Produktion von Biomasse bei den Torfsubstraten, v.a. wenn deren fossile Kohlenstoff-Natur berücksichtigt wird (Abb. 3.18 B, D), sehr stark auf Kosten der THG-Emissionen stattfindet: Hier übertrafen die Bionika-Komposte das "günstigere" der beiden Torfsubstrate mit der höheren Ratio, ED 73, um das 4,6- bis 5,8-fache (ungedüngt), und um mindestens das 3,6- bis 4,7-fache (gedüngt). COMPO SANA wurde von den Bionika-Komposten um das 107-fache bis 135-fache (ungedüngt), sowie um das 56-fache bis 72-fache (gedüngt) übertroffen. **Beim Bionika-Kompost stieg die Effizienz der Biomasse-Produktion zu den THG-Emissionen mit steigendem Biochar-Anteil im Bionika-Kompost an**, so dass die besten Verhältnisse stets beim höheren Biochar-Anteil erreicht wurden (Abb. 3.18). Bei den sB - Biochar - Mischungen resultieren *deswegen* so günstige Verhältnisse (Abb. 3.18), weil diese Varianten nur minimale CO₂- und N₂O-Emissionen zeigten. Für die Praxis dürfte es jedoch kaum eine Alternative darstellen, wenn dafür auch die Erträge sehr gering sind, wie dies bei allen sB - Varianten der Fall war (Abb. 3.2 – 3.4).

Die Verhältnisse fielen für den Vergleich "Erdbeer-Biomasse-zu-THG-Emissionen" sehr ähnlich aus wie bei den Radieschen (Abb. A-3.18, Anhang). Die Bionika-Komposte, die annähernd die gleichen Erträge bewirkten wie das Torfsubstrat COMPO SANA (jedoch ungedüngt schlechtere als ED 73), **zeigten wesentlich günstigere Verhältnisse** als ED 73 aufgrund ihrer geringeren THG-Emissionen. Sie übertrafen im BM/THG-Verhältnis ED 73 um das 2,5 – 3,5-fache (ungedüngt) und um das 3,6 bis 4,6-fache (gedüngt, Abb. A-3.18 B, D). Die Bionika-Komposte übertrafen COMPO SANA (wegen dessen sehr hoher THG-Emissionen) um das 40- bis 59-fache (ungedüngt), und um das 38- bis 48-fache (gedüngt).

Anmerkung: Das "wahre" Verhältnis wird bei den gedüngten Substraten v.a. aufgrund der hohen CO₂- und N₂O-Emissionen sehr viel ungünstiger für die Torfsubstrate gewesen sein als hier aufgezeigt werden konnte, da die THG-Messungen der Inkubation bei "günstigeren" Bedingungen (nur 60 % WHK, nur einmalige, geringe Anfangsdüngung) durchgeführt wurden, als sie in den Gefäßen geherrscht haben müssen.

3.2.3 Wasserüberstauung: CH₄-Produktion aus den Substraten

Dieser Versuch konnte leider bis zur Berichts-*deadline* nicht abgeschlossen werden, da die überstauten Substrate noch keinerlei Methanproduktion zeigten. Die Inkubation wird fortgesetzt, und die Ergebnisse werden dem Auftraggeber zu einem späteren Zeitpunkt zur Kenntnis gebracht.

4 Diskussion und Interpretation

4.1 Pflanzversuche

4.1.1 Komposte als Torfersatzsubstrate?

4.1.1.1 Hauptversuche mit Radieschen und Erdbeeren

Die erzielten Ergebnisse zeigen deutlich, warum Torfsubstrate noch immer so gefragt sind und den Markt dominieren, obwohl bereits einige Torfersatz-Substrate existieren (vgl. (König und Eysel, 2004): Die Radieschen-Erträge waren auf der Torferde ED 73 sowohl mit als auch ohne Düngung immer unter den höchsten; bei den Erdbeeren waren die Fruchterträge auf COM-PO SANA am größten.

Zweitens zeigen die Ergebnisse sehr schön, dass "Kompost nicht gleich Kompost" ist; die Effekte der hier verwendeten Komposte hätten verschiedener gar nicht sein können: Während die Erträge auf den Komposten eines konventionellen Bayreuther Kompostwerks bei beiden Pflanzenarten stets sehr gering waren und kaum oder nur wenig die der Braunerde ohne Kompostbeimischung übertrafen, reichten die des Güteklasse-A⁺-Komposts von Bionika stets an die Erträge eines oder beider Torf-Kontrollsubstrate heran, oder sie übertrafen sogar eines von beiden. Bei den Radieschen waren die Erträge auf den Bionika-Komposten mit und ohne Biokohle mehr als dreimal größer (ungedüngt) bzw. um ¼ höher (Volldüngung) als die auf COM-PO SANA-Blumenerde – und vom Torfsubstrat ED 73 waren sie nicht signifikant verschieden.

Die Ursache für das schlechte Abschneiden der BT-Komposte könnte eine noch nicht ganz abgeschlossene Zersetzung und teils anaerobe Bedingungen bei der Reifung sein (Amlinger *et al.*, 2005); dadurch können phytotoxisch wirkende Stoffe entstehen die wachstumshemmend wirken. Zudem "zehrt" eine noch unvollständige Zersetzung Stickstoff, d.h. solche Komposte immobilisieren (binden) mineralischen Stickstoff, anstatt Stickstoff (und andere Nährstoffe) freizusetzen und somit das Pflanzenwachstum zu stimulieren. Dass die Nährstoffnachlieferung der BT-Komposte sowie der Mineralböden ohne Komposte sehr viel schlechter war als die der Torfsubstrate, oder die der Bionika-Komposte, zeigte sich daran, dass die Volldüngung bei den BT-Komposten eine sehr viel höhere Wachstumssteigerung bewirkte als bei den Bionika-Komposten (die offenbar bereits eine sehr gute Nährstoffnachlieferung aufwiesen). Die verhältnismäßig geringe Steigerung durch Düngung zeigte sich sowohl bei den Radieschen als auch bei den Erdbeeren. Es liegt nahe, dass bei den BT-Komposten weitere hemmende Effekte neben einem möglichen Nährstoffmangel für die geringen Erträge verantwortlich waren, da auch eine kontinuierliche Versorgung mit Düngelösung nicht zu Erträgen führte, die an jene der Torfsubstrate oder Bionika heran reichten.

Obwohl der verwendete Bionika-Kompost keineswegs als typisches Torfersatz-Produkt optimiert war, reichten die Biomasse-Erträge – sowohl gedüngt als auch ungedüngt – auf Bionika an die der Torfsubstrate heran. Obwohl Bionika eine geringere Wasserhaltekapazität besaß als die Torfsubstrate, hatte dies - vermutlich bedingt durch die gute Wasserleitfähigkeit und optimierte

Wasserversorgung - keinerlei negative Auswirkungen auf die Erträge oder die Wassernutzungseffizienz der Pflanzen im Vergleich zu den Torfsubstraten. Eine Ausnahme war der Ertrag von roten und grünen Erdbeer-Früchten auf COMPO SANA, der sehr viel höher war als der auf allen anderen Substraten, einschließlich denen der zweiten Torfkontrolle ED 73. Auch Biochar schien hier eine besondere Rolle zu spielen, um die Eigenschaften von "Bionika" zu verändern und die Frucht reife zu beschleunigen (siehe 4.1.2).

4.1.1.2 Zusatzversuch mit Sommergerste

Die gute Eignung des Bionika-Komposts als Alternative zu Torfsubstraten wurde in den Hauptversuchen rasch offensichtlich, so dass für den Zusatzversuch mit Gerstejungpflanzen Bionika-Kompost und drei Torfsubstrate ohne Mischung mit Boden ("pur") ungedüngt verwendet wurden.

Auch hier entsprach die gebildete Biomasse der Gerstejungpflanzen auf Bionika der auf ED 73 Torfsubstrat, und übertraf signifikant die auf COMPO SANA oder Palaterra erzielte Biomasse (und bei weitem die auf dem ungedüngten Torfsubstrats EE0). Auch in diesem Versuch bestätigte sich somit die prinzipielle Eignung des Bionika-Komposts als Alternative zu Torfsubstraten – auch ohne dass eine permanente Wasserversorgung oder Zusatzdüngung gegeben war.

Abschließend ist anzumerken, dass die Ansprüche verschiedenster Nutz- und Zierpflanzen an ihre Substrate sehr unterschiedlich sein können, so dass von den hier eingesetzten Testpflanzen nicht auf alle Pflanzen geschlossen werden kann.

4.1.2 Die Wirkung der Biokohle-Beigaben im Komposten

4.1.2.1 Hauptversuche mit Radieschen und Erdbeeren

Die Zugabe von Biochar konnte innerhalb der jeweiligen Substratgruppe (BT-Komposte; Bionika; sB - Boden) sowohl positive als auch negative Auswirkungen haben. Es ist bekannt, dass Biochar direkt nach Applikation Stickstoff oder andere Nährstoffe immobilisieren kann (vgl. 4.1.2.3), oder aber auch Nährstoffe mitbringen kann. Die eingesetzten Biochars waren jedoch alle nährstoffarm (Erfahrungswerte aus der Charakterisierung anderer Biochars aus ähnlichen / gleichen Edukten und Herstellungsverfahren, vgl. (Krull *et al.*, 2009; Novak *et al.*, 2009; Fuertes *et al.*, 2010; Singh *et al.*, 2010a). In der Tat zeigte innerhalb der Gruppe "Bayreuther Komposte" die Variante mit dem mitkompostierten Biochar oft signifikant bessere Ergebnisse als die Variante, bei der die Biokohle nachträglich hinzugefügt worden war.

Beim ungedüngten Bionika-Kompost verringerte die Biochar-Zugabe die Erträge bisweilen leicht (fast nie jedoch signifikant). Wurde eine Ausgleichsdüngung gegeben, so verschwand diese leichte Reduktion in der Regel; die Biomasse auf Bionika wurde durch Biochar-Zugabe aber auch nicht signifikant gesteigert. Etwas verwirrend waren in diesem Zusammenhang die Ergebnisse innerhalb der Gruppe "Braunerde ohne Kompost-/Torfzusatz" – hier erhöhte Biochar die Erträge ohne Düngung, und verringerte sie mit Düngung – ein Ergebnis, das den Erwartungen und Hypothesen widersprach. Es ist nur erklärbar, wenn ein erheblicher Teil der Nährstoffe aus

der Nährlösung beim Aufstieg aus dem Wasserreservoir bereits vom Biochar adsorbiert worden wäre und die kleinen Pflanzen gar nicht erreicht hätte. In der Tat trat dieser Effekt nur bei den Radieschen auf (nicht jedoch bei den Erdbeeren mit Wurzelballen, d.h. mit mehr Nährstoffreserven); die gekeimten Radieschen blieben auch auf den sB-Biochar-Mischungen *mit* Nährlösung sehr klein im Vergleich zum reinen sB-Boden.

Abschließend ist festzuhalten, dass Biochar in Mischung mit einem guten Kompost keine signifikant positive Wirkung auf den Ertrag zeigte (mit Ausnahme des gesteigerten Erdbeerfruchtertrags), aber auch keine signifikant negative. Nach Literaturkenntnissen ist ohnehin zu erwarten, dass die positive Wirkung von Biochar erst nach einiger Zeit auftritt, wenn das "frische" Biochar zu altern beginnt (Oxidation der Außenflächen, vgl. Cheng *et al.*, 2006), und wenn es mikrobiell besiedelt wird (Thies und Rillig, 2009). In den wenigen publizierten mehrjährigen Feldstudien (Brasilien, Afrika) zeigte sich eine stark positive Wirkung von Biochar erst nach längerer Zeit, bei stark verarmten Böden, oder unter Stressbedingungen wie z.B. Dürre (Oguntunde *et al.*, 2004; Kimetu *et al.*, 2008; Major *et al.*, 2010). Daher ist die Idee, Biochar von vorne herein mit zu kompostieren, wahrscheinlich eine gute Möglichkeit, um negative Wirkungen durch anfängliche Nährstoff-Festlegungen zu vermeiden. Diese Möglichkeit sollte daher eingehender untersucht werden.

4.1.2.2 Zusatzversuch mit Sommergerste

Dem Bionika-Kompost in diesem Versuch wurden stufenweise steigende Mengen eines Weizenstroh-Biochars zugesetzt (1 % bis 8 %, g/100 g); nährstoffarmes Weizenstroh-Biochar wurde als Analog zu Landschaftspflege-Grünschnitt gewählt. Zudem wurde HTC-Rindenbiokohle in den Versuch eingeschlossen (HTC-Biokohle als ebenfalls denkbare mögliche Verwertungsmöglichkeit von Landschaftspflegeabfällen). Weiter wurde ein Palaterra-Substrat in dieser Studie einbezogen. Auch dieses Biochar-haltige Erzeugnis wäre eine weitere denkbare Verwertungsmöglichkeit für Landschaftspflegeabfälle. (Es war bei der Eröffnung des Palaterra-Werks im September 2010 an Besucher verteilt worden, d.h. es sind keine näheren Hersteller-Inhaltsstoffangaben wie z.B der Biokohle-Gehalt verfügbar).

Das Palaterra-Substrat mit unbekanntem Biokohle-Anteil entsprach im Gerstekeimlings-Ertrag der COMPO SANA-Blumenerde. Es ist denkbar, dass der Ertrag darüber gelegen hätte, wenn das Substrat eine bessere Benetzbarkeit aufgewiesen hätte; Aspekte der Benetzbarkeit, der Wasserleitfähigkeit und der pflanzlichen Wasserversorgung durch Biokohle-Substrate sollten zukünftig neben Größen wie der WHK ohnehin eingehender untersucht werden. Bei Aufbringung auf ein nährstoffarmes Substrat (EE0) steigerte das Palaterra-Substrat die Keimlingsbiomasse auf mehr als das Doppelte – eine interessante Option. Es bedürfte jedoch weiterer Versuche, um das Palaterra-Substrat mit guten Komposten oder anderen Torfersatzsubstraten zu vergleichen und um feststellen zu können, ob es überlegen ist und eine echte Alternative zu Torfsubstraten darstellt. Der erste Hinweis über diese Studie kann nur lauten "vielleicht".

Die Zugabe von Weizenstroh-Biochar zu Bionika-Kompost steigerte den Keimlingsertrag nicht, verringerte ihn aber auch nicht signifikant. Geringe Zugaben reduzierten den Keimlingsertrag leicht; es scheint eine optimale Zugabemenge zu geben, die bei 4 g pro 100 g lag, bei der die Erträge von ED 73, Bionika (pur) und Bionika + 4 % Biochar praktisch identisch waren.

4.1.2.3 Biokohle-Wirkung: Vergleich der Ergebnisse mit der aktuellen Literatur

Dass es vor allem bei nährstoffarmen Biochars eine Art optimale Zugabemenge existiert wurde auch in anderen Studien gezeigt (Chan *et al.*, 2007, 2008; Nguyen *et al.*, 2008; Noguera *et al.*, 2010; Van Zwieten *et al.*, 2010a). Die größten Steigerungseffekte auf Biomasseerträge wurden vor allem dort gefunden, wo die Böden sehr nährstoffarm, stark verdichtet oder degradiert und arm an Bodenkohlenstoff waren, oder wo sie wenig Wasser festhalten konnten (Glaser *et al.*, 2001; Oguntunde *et al.*, 2004; Steiner *et al.*, 2007; Kimetu *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2010; Solaiman *et al.*, 2010). Waren die Böden bereits fruchtbar oder reich an organischem Kohlenstoff, hatte Biochar in der Regel keine oder nur eine leicht positive Wirkung (Blackwell *et al.*, 2010; Gaskin *et al.*, 2010; Major und Husk, 2010); es gab bisweilen auch negative Wirkungen. Biochar kann direkt nach Zugabe Nährstoffe (Stickstoff) binden, was die Stickstoff-Verfügbarkeit für die Pflanze mindern könnte. (Diese Absorption müsste theoretisch über einige Zeit anhalten, bis die Biokohle mit Nährstoffen "aufgeladen" ist.) Aus diesem Grund war für die Bayreuther Feldversuche Biochar mitkompostiert worden, d.h. während dieses Prozesses sollte eine "Aufladung" mit Nährstoffen erfolgen. In der Tat zeigte der Bayreuther Biochar-Kompost gegenüber dem BT-Kompost mit *nachträglicher* Zugabe von Biochar, oder gegenüber dem Kompost *ohne* Biochar fast immer die besseren Ergebnisse in nahezu allen gemessenen Parametern, selbst wenn die Unterschiede meist nicht signifikant waren. Diese Verbesserung könnte über eine bessere Nährstoffverfügbarkeit zustande kommen oder aber dadurch, dass das Biochar theoretisch phytotoxische Substanzen binden kann (vgl. (Hua *et al.*, 2009; Spokas *et al.*, 2009; Ding *et al.*, 2010; Kookana, 2010).

Vor Kurzem wurde beschrieben, dass verschiedene Biochars das Phytohormon Ethylen abgeben können, welches in bestimmten Konzentrationen stark förderlich auf das Wurzelwachstum und die Fruchtentwicklung wirken kann; in höheren Konzentrationen kann es hingegen negativ auf das Pflanzenwachstum und die mikrobielle Aktivität des Bodens wirken (Spokas *et al.*, 2010). Daraus sollte theoretisch resultieren, dass es eine Biochar-Zugabemenge mit optimaler Wirksamkeit gibt ("Optimum"), wie es tatsächlich im Zusatzversuch mit Gerste sichtbar wurde. Ein Hinweis auf die Biochar-Ethylen Hypothese bieten zudem die **Ergebnisse zum Ertrag roter Erdbeerfrüchte**: Die Menge roter Erdbeeren waren **auf Bionika plus 5 % Vol.-% Biochar wesentlich größer** als auf Bionika ohne Biochar, oder mit 15 Vol.-% Biochar – es gab offenbar eine Beschleunigung des Reifeprozesses, was einer typische Wirkungsweise des Phytohormons Ethylen entspricht. Da aber die ursächlichen Zusammenhänge noch keineswegs geklärt sind, ist man noch weit davon entfernt, aus der Theorie heraus für verschiedene Biochars und Böden optimale Zugabemengen voraussagen zu können.

4.2 Treibhausgas-Emissionen

4.2.1 Verringerte THG-Emissionen durch Biokohlezugabe

Direkt nach Düngerzugabe übertrafen die CO₂- und N₂O-Emissionen der Torfsubstrat-Mischungen die der Komposte bei Weitem (Abb. 3.13 – 3.14). Durch die Zugabe von Biochar hingegen wurden die CO₂- und N₂O-Emissionen der Komposte über die gesamte Inkubationsdauer stets noch weiter gesenkt. Damit entsprechen diese Ergebnisse dem in anderen Studien beobachteten Trends von sinkender Bodenrespiration und verringerten N₂O-Emissionen durch Biochar in Böden (Yanai *et al.*, 2007; Liang *et al.*, 2008; Kolb *et al.*, 2009; Spokas *et al.*, 2009; Spokas und Reicosky, 2009; van Zwieten *et al.*, 2009; Singh *et al.*, 2010b; van Zwieten *et al.*, 2010b), jedoch gibt es auch gegenteilige Ergebnisse, abhängig vom Biochar und Ausgangsmaterial (Spokas und Reicosky, 2009; Clough *et al.*, 2010; Singh *et al.*, 2010b). Die hier getesteten Biochars aus Grünschnitt (entsprechend Landschaftspflegematerial) von Schottdorf GC und der Pyreg GmbH verringerten beide die CO₂- und N₂O-Emissionen.

Interessant ist, dass in jedem der beiden Komposte ohne Biochar eines der vier Inkubationsgefäße erhöhte N₂O-Emissionen zeigte gegenüber den drei anderen (siehe hohe Standardabweichung in Abb. 3.13 und 14 B und D), welche kontinuierlich über die Beprobungen hinweg höhere N₂O-Emissionen lieferte als die anderen Gefäße. Selbst bei Ausschluss dieser Werte (wofür es keinerlei Gründe gab) blieb die Tatsache der N₂O-Reduktion durch Biochar bestehen. Das Auftreten einzelner höherer Emissionsraten ist jedoch ein Indiz für "*anaerobic microsites*", schlecht belüftete Stellen in der Bodenmatrix, in denen viel N₂O über den anaeroben Prozess der Denitrifikation gebildet wurde. Dieses Phänomen trat nur in Gefäßen ohne Biochar-Zugabe auf. Von daher kann geschlossen werden, dass die Zugabe von Biochar die N₂O-Emissionen unter anderem durch eine bessere Belüftung verringerte. Die Reduktion der CO₂-Emissionen kann so allerdings nicht erklärt werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die hier getesteten Biochars ein ideales Mittel zur Verringerung der THG-Emissionen zu sein scheinen.

4.2.2 Ertrags-THG-Effizienz: Mehr Ertrag bei geringeren THG-Emissionen

Vor dem Hintergrund der globalen Problemfelder "Klimawandel", "Welternährung" und nun ggf. auch noch "nachhaltige Bioenergie-Produktion" muss es unser Bestreben sein, möglichst hohe Acker- und gartenbauliche Erträge bei möglichst geringen THG-"Kosten" zu erzielen. Mittlerweile wird durch menschliche Aktivitäten, wie den Anbau von Leguminosen und das (energieintensive) Haber-Bosch-Verfahren zur N-Dünger-Erzeugung, mehr N₂ in reaktiven Stickstoff überführt und in Ökosysteme eingebracht als durch natürliche Prozesse (Galloway *et al.*, 2008). Die Folge des massiv gesteigerten N-Eintrags in die Böden und Gewässer unseres Planeten sind nicht nur Probleme wie die zu hohen Nitratfrachten im Grundwasser oder die überdüngten Gewässer, Flussdeltas oder Ozeanbereiche, sondern auch die synchron mit der "grünen Revo-

lution" steigenden Konzentrationen des starken Treibhausgases N₂O in der Atmosphäre (IPCC, 2007). Mit anderen Worten: Wenn wir nachhaltig wirtschaften wollen, müssen wir Bodenkohlenstoff dort lassen, wo er gut und sicher gespeichert ist (Bsp. Schutz der Moore), und unsere Bedürfnisse nach Lebensmitteln und Energie so stillen, dass die THG-Frachten dabei minimiert werden.

Die in dieser Auswertung gebildeten Verhältnisse zwischen Ertrag und THG-Emissionen zeigen anschaulich, dass die Verwendung von Biochar-haltigen Torfersatzsubstraten eine **sehr vielversprechende mögliche Alternative** ist, um den richtigen Weg zu beschreiten: Selbst bei sehr konservativer THG-Abschätzung (wie hier praktiziert!), und selbst völlig ohne Anrechnung von "sequestrierten CO₂-Äquivalenten" (d.h. der Atmosphäre entzogenem CO₂ über die Bindung im zugegebenen Biochar) war das Verhältnis von produzierter Biomasse zu den "THG-Emissionskosten" um ein Vielfaches besser als das der Torfsubstrate.

4.2.3 *Ausblicke: Torfersatz, Pflanzenwachstum und THG-Emissionen*

Bei aller Freude über eingesparte CO₂-Äquivalente sind es in der Praxis ganz andere Dinge, die über die Akzeptanz oder die breite wirtschaftliche Anwendung einer neuen Idee entscheiden. Genau hier muss die weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeit ansetzen: Alternativen zu den gängigen Torfsubstraten werden sich nur dann durchsetzen, wenn sie in der Handhabbarkeit genauso einfach sind und die gleichen positiven Effekte auf das Wachstum, die langfristige Nährstoffspeicherung und Wasserversorgung haben wie die bisher üblichen Torfsubstrate. Besser wäre sogar, wenn sie die Eigenschaften der Torfsubstrate übertreffen – dann wäre ihre bessere THG-Bilanz bzw. C-Sequestrierung eine gern "mitgenommene" Eigenschaft, mit der sich der Kunde bzw. der kommerzielle Anwender dann schmücken kann.

Die aus den erzielten Ergebnissen abgeleitete Empfehlung ist daher, den Weg der Mitkompostierung von Biokohlen weiter zu verfolgen; des weiteren könnte es aus theoretischen Überlegungen heraus viel versprechend sein, kompostierte Mischungen aus Biochar (alkalisch), nährstoffreicher HTC-Biokohle aus z.B. Pferdemist (eher sauer) und Landschaftspflegeresten sowie Biogas-Gärresten herzustellen (struktur- und faserreich, sowie nährstoffreich). Entscheidend muss sein, dass sich die Biokohle bereits im Substrat-Herstellungsverfahren mit Nährstoffen beladen kann, und dass sie rasch zu altern beginnt und ihre guten Austauscher-Eigenschaften entwickelt. So könnte erreicht werden, dass kurzfristig keine negativen Effekte durch Nährstoff-Immobilisierung auftreten, sondern positive Wirkungen voll zum Tragen kommen können.

Folgende nächste Schritte sollten bzw. könnten unternommen werden ("Fahrplan-Vorschlag"):

- Screening zahlreicher frischer sowie kompostierter Biokohlemischungen (Biochar, oder Biochar plus HTC-Biokohle) auf ihre Eignung als Pflanzsubstrate gegenüber einem größeren Spektrum klassischer Torfsubstrate
- Screening der THG-Emissionen dieser Substrate, z.B. zu Beginn und am Ende eines Pflanzversuchs
- Identifizierung der geeignetsten bzw. besten Biokohle-Substratmischungen

- Einsatz dieser Mischungen unter kontrolliert applizierten Stressbedingungen wie Starkniederschläge (Nährstoffauswaschung) oder Trockenheit und Dürre, oder anderer praxisrelevanter Fragestellungen; Erfassung der pflanzenphysiologischen Fitness unter Stress
- Wichtig: Begleitung des kompletten Untersuchungsprogramms durch fachkundige Praktiker aus Naturschutz, Forst und Gartenbau, um sich möglichst eng an späteren Praxisbedürfnissen (d.h. der wirtschaftlichen Umsetzbarkeit) zu orientieren

Es wäre wünschenswert, hierfür eine Spezialistenrunde zusammen zu bringen aus Praktikern (Landschafts- und Naturschutz, Gartenbau), aus Spezialisten, die sich auf die Herstellung hochwertiger Komposte verstehen (vgl. Überlegenheit von Bionika- gegenüber herkömmlichem Kompost), Spezialisten für die HTC-Biokohle- und Biochar-Herstellung und -anwendung, für pflanzenernährerische Aspekte und für die THG-Bilanzierung. In dieser Runde sollten mögliche experimentelle Wege zur Entwicklung von wertvollen, THG-negativen Torfersatzsubstraten aus Landschaftspflegeprodukten diskutiert werden bevor ein Projekt initiiert wird.

Die Entwicklung von Biokohle-Torfersatzsubstraten mit nach Möglichkeit *positiveren* Eigenschaften für das Pflanzenwachstum als Torfsubstrate sollte der nächste Schritt sein, nur dann kann eine wirtschaftliche Umsetzung gelingen.

5 Zusammenfassung

In Deutschland werden jährlich 12 Millionen Kubikmeter Torf verbraucht, 60 % davon im gewerblichen Gartenbau, und zwischen 15 und 25 % in Freizeit-Gärten. Deutschlandweit wird auf 4000 km² Torf abgebaut; im derzeitigen Tempo fortgeführt, werden die zum Abbau genehmigten Torfvorräte Deutschlands spätestens in 10 Jahren erschöpft sein. Schon heute wird verstärkt auf Importe aus Nord- und Nordost-Europa zurückgegriffen. Zugleich bedeutet Torfabbau immer die Freisetzung von fossilem, gespeichertem Kohlenstoff in Form von CO₂, entweder durch Verbrennung (Bsp. Irland, baltische Staaten) zur Energiegewinnung, oder durch Mineralisierung z.B. als Pflanzsubstrat. Der Ersatz durch Alternativen wäre somit sowohl aus Klimaschutz- wie aus Naturschutz-Gründen erstrebenswert.

Die Erforschung der fruchtbaren, durch Menschen entstandenen Amazonasschwarzerden (*Terra preta*) führte in den letzten Jahren zu der Idee, Biokohle (oft engl. Biochar) in Böden einzubringen, um verschiedene Bodenparameter zu verbessern und die Fruchtbarkeit und den Kohlenstoffgehalt von degradierten Böden zu erhöhen. Es zeigte sich zudem in ersten Studien, dass die Applikation verschiedener Biochars häufig, aber nicht immer, zu einer Reduktion der N₂O- und CO₂-Emissionen aus Böden führte – eine sehr wünschenswerte Eigenschaft vor dem Hintergrund rasch steigender Treibhausgas-(THG-)Konzentrationen in der Atmosphäre, und dem Anspruch, immer mehr Menschen von einer immer weiter schrumpfenden Ackerfläche zu ernähren. Entscheidend für eine nachhaltige Bewirtschaftung unserer Ressourcen ist daher eine gesteigerte Ertrags/THG-Kosten-Effizienz, d.h. bei möglichst hohen Erträgen möglichst geringe THG-Emissionen zu verursachen. Hier erscheint Biokohle als interessante Option.

Vor dem Hintergrund dieser Problemstellungen war es daher das Ziel dieses Projekts, erste Erfahrungen zum Ersatz von Torfsubstraten durch Biokohle-Komposte zu sammeln und THG-Bilanzen solcher Substratmischungen zu gewinnen. Es stellte sich die Frage, ob Biokohle-Kompost-Substrate generell, verglichen mit den Komposten ohne Biokohle, positive oder negative Wirkungen auf das Pflanzenwachstum haben, und ob solche Substrate mit klassischen Torfsubstraten "mithalten" können. Zudem ist es keineswegs sicher, dass die Zugabe von Biokohle stets zu geringeren THG-Emissionen führt. Auch dies sollte näher charakterisiert werden. Ein Fokus des Projekts war zudem die mögliche Erzeugung von Biokohlekomposten aus Landschaftspflege-Abfällen aus dem Naturschutz, um ggf. eine Wertschöpfungskette in strukturschwachen Gebieten zu erreichen. Daher wurden für das Projekt Biochars aus Materialien eingesetzt, die Landschaftspflegeabfällen und in der Landwirtschaft anfallenden Nebenprodukten entsprechen (Grünschnitt; Weizenstroh).

Im Rahmen des Projekts wurden zwei Hauptpflanz-Experimente mit Radieschen und Erdbeeren sowie zwei Zusatzversuche durchgeführt¹². Zudem wurde eine Inkubationsstudie zur Messung der THG-Emissionen aus den gleichen Substratmischungen durchgeführt, wie sie im Hauptexperiment verwendet wurden. In den beiden Hauptexperimenten wurden 11 Substrate getestet, 1:1 (Vol.:Vol.) gemischt mit sandiger Braunerde. Darunter waren zwei handelsübliche Torfsub-

¹² Einer davon ist zum Zeitpunkt der Berichtserstellung noch nicht abgeschlossen, wird aber als zusätzliche, freiwillige Leistung erbracht.

strate als Kontrollen mit hohem Torfanteil (ED 73 Standardsubstrat mit Langzeitdünger; COMPO SANA Blumenerde); drei Grünabfall-Komposte aus Bayreuth, von denen zwei mit ca. 30 Gewichtsprozent Biochar versetzt waren (zugemischt vor bzw. nach der Kompostierung); ein Gütekategorie A⁺ Kompost "Bionika" der Firma URS Landmanagement (Zertifizierung für den Ökologischen Landbau nach Richtlinien Österreichs); diesem wurden steigende Mengen (0, 10 und 30 Vol.-%) Grünschnitt-Biochar von Swiss Biochar (Pyreg-Verfahren) zugemischt; als Varianten neun und zehn wurden die sandige Braunerden mit den beiden Biochars "pur" versetzt, in Mengenteilen, die denen in den Komposten (Bayreuth bzw. Bionika) entsprachen; Variante 11 bestand aus sandiger Braunerde ohne weitere Zugaben.

Alle Varianten wurden gedüngt und ungedüngt angesetzt, und jeweils vierfach repliziert. Der Vergleich "gedüngt – ungedüngt" ermöglichte es, die Güte der Nährstoffnachlieferung abzuschätzen, bzw. zu prüfen, ob positive / negative Wirkungen aus guter / schlechter Nährstoffverfügbarkeit resultierten. Dies erschien essentiell, da fast alle handelsüblichen Torfsubstrate (langzeit-)aufgedüngt sind, während Komposte üblicherweise keine solchen Zusätze erhalten. Die Anzucht erfolgte auf automatisch bewässerten Gefäßen (A. dest. bzw. Düngelösung) um eine Limitation durch unterschiedliche Substrateigenschaften auszuschließen. Die Aufstellung erfolgte randomisiert in den Gewächshäusern der Justus-Liebig-Universität bei "sommerlichen" Langtag-Bedingungen.

Die **Resultate des Hauptversuchs** waren überraschend: Während einer der Komposte nicht im Ansatz die Wachstumsleistung der Torfsubstrate erreichte (auch mit Düngung nicht), förderte der andere, Bionika, das Wachstum der Radieschen bzw. Erdbeersetzlinge so stark, dass er in der Regel eines der Torfsubstrate (meist COMPO SANA) hinter sich ließ. Im schlechteren der beiden Komposte förderte die Anwesenheit von Biokohle tendenziell das Wachstum gegenüber dem gleichen Kompost ohne Biokohlezugabe. Innerhalb dieser Gruppe erzielte das Mitkompostieren von Biochar tendenziell bessere Ergebnisse als die nachträgliche Biochar-Zugabe. Bei dem ohnehin sehr guten Bionika-Kompost wurde die Wachstumsleistung der Pflanzen durch Biochar-Zugaben nicht noch weiter gesteigert, in der Regel aber auch nicht signifikant vermindert. Falls eine leichte, nicht-signifikante Verringerung mit steigender Biokohle-Applikation auftrat, so war diese in der gedüngten Variante stets verschwunden, und die Erträge waren gleich hoch. Dies legt nahe, dass es sich tatsächlich "nur" um die bekannte Anfangs-Immobilisierung von Nährstoffen durch die Biokohle handelte. (Im Falle starker Auswaschungen z.B. durch hohe Niederschläge wäre diese Eigenschaft von Vorteil.) In spannendes Teilergebnis war die Beschleunigung der Fruchtreife der Erdbeeren durch die Zugabe von 5 % Biochar zu Bionika-Kompost, wodurch diese Variante etwa den gleichen Ertrag an roten Erdbeeren produzierte wie auf COMPO SANA, und mehr als auf ED 73.

Im **Zusatzversuch mit Gerstekeimlingen** zeigte die Zugabe von schrittweise steigenden Biochar-Mengen zu Bionika-Kompost, dass es eine optimale Zugabemenge von etwa 4 % (Gewicht) gab. Bei dieser Menge waren die Erträge der Gerstekeimlinge genauso groß wie die des Torfkontrollsubstrats ED 73 oder des Bionika-Komposts ohne Biochar, und höher als die eines kommerziellen Biokohlesubstrats, "Palaterra". Insgesamt lieferten jedoch alle Bionika-Biochar Mischungen bis 8 % Biochar-Zugabe keine signifikant verschiedenen Ergebnisse.

Die **THG-Inkubationsstudie** wurde mit je 400 g der o.g. Substratmischungen bei 60 % der maximalen Wasserhaltekapazität der jeweiligen Mischung unter Laborbedingungen bei 22 °C durchgeführt, vierfach repliziert pro Substratmischung. Die Torfsubstrate zeigten kurz nach Düngergabe wesentlich höhere CO₂- und N₂O-Emissionen als die Komposte; vor allem durch die Zugabe von Biochar wurden diese THG-Emissionen (bei beiden Biochars) signifikant reduziert. Über die Dauer der Studie zeigten die Torfsubstrate aufsummiert höhere THG-Emissionen als die Biochar-Komposte, obwohl keine weitere Düngelösung zugegeben wurde. Methanemissionen zeigten sich bei dieser Studie nur bei den Bayreuther Komposten; sie waren jedoch so gering, dass sie in der Gesamtbilanz keine Rolle spielten.

Die berechneten **Verhältnisse zwischen Ertragspotential und THG-Emissionspotential** der geprüften Mischungen zeigten anschaulich, dass die Verwendung von Biochar-haltigen Torfersatzsubstraten eine **sehr vielversprechende mögliche Alternative** ist, um den richtigen Weg zu beschreiten: Selbst bei sehr konservativer THG-Abschätzung (wie hier praktiziert), und selbst *völlig ohne Anrechnung* von "sequestrierten CO₂-Äquivalenten" (d.h. der Atmosphäre entzogenem CO₂ über die Bindung im zugegebenen, kohlenstoffreichen und zersetzungsstabilen Biochar) war das Verhältnis von produzierter Biomasse zu den "THG-Emissionskosten" bei den Bi-onika-Biochar-Komposten um ein Vielfaches besser als das der Torfsubstrate. Es ist daher zu empfehlen, diesen Weg weiter zu verfolgen.

Als weiterführender Schritt wird ein **praxis- und anwendungsorientiertes Screening** von zahlreichen verschiedenen kompostierten oder angemischten Biokohle-Komposten bzw. Biokohle-Substraten im Hinblick auf ihre Eignung als Torfersatz empfohlen, unter Berücksichtigung ihrer THG-Emissionseffizienz, und unter Einbeziehung fach- und sachkundiger Praktiker verschiedenster Disziplinen, zur Aufstellung einer praxisorientierten experimentellen *Roadmap*. Der Erhalt der Moore, als artenreiche Lebensräume und gigantische globale Kohlenstoffspeicher, wird vor allem dann leichter sein, wenn C-speichernde Substrate mit besseren Eigenschaften als Torf geschaffen werden können.

Es ist ein attraktiver Gedanke, den Prozess "CO₂-Freisetzung aus dem Gartenbau" durch Verwendung von Biokohle- statt Torfsubstraten quasi in eine "CO₂-Sequestrierung im eigenen Garten" (oder natürlich im Gartenbau) umzukehren.

6 Danksagung

Die Autoren danken Christian Eckhard, Gerhard Mayer und Angelika Bölke und für ihre Hilfe während der Zeit der Durchführung der Studie, sowie Roland Kirschner, Jürgen Franz, Petra Kretschmer, Burkhard Lather und Dieter Haffer für Rat und Tat rund um die Gewächshauskulturen, und Dr. Stefan Ratering für seine wertvolle Unterstützung im GC-Labor.

7 Zitierte Literatur

- Amlinger, F., Peyr, S., Hildebrandt, U., Músken, J., Cuhls, C., Clemens, J., 2005. Stand der Technik der Kompostierung. Richtlinie des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (Österreich). In: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, U.u.W. (Ed.). Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, Österreich, pp. 1-108.
- Blackwell, P., Krull, E., Butler, G., Herbert, A., Solaiman, Z., 2010. Effect of banded biochar on dryland wheat production and fertiliser use in south-western Australia: an agronomic and economic perspective. *Australian Journal of Soil Research* 48, 531-545.
- Blackwell, P., Riethmuller, G., Collins, M., 2009. Biochar Application to Soil. In: Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.), *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan, London, U.K., pp. 207-226.
- Brodowski, S., John, B., Flessa, H., Amelung, W., 2006. Aggregate-occluded black carbon in soil. *European Journal of Soil Science* 57, 539-546.
- Chan, K.Y., Van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A., Joseph, S., 2007. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. *Australian Journal of Soil Research* 45, 629-634.
- Chan, K.Y., Van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A., Joseph, S., 2008. Using poultry litter biochars as soil amendments. *Australian Journal of Soil Research* 46, 437-444.
- Chen, Y., Shinogi, Y., Taira, M., 2010. Influence of biochar use on sugarcane growth, soil parameters, and groundwater quality. *Australian Journal of Soil Research* 48, 526-530.
- Cheng, C.-H., Lehmann, J., Thies, J.E., Burton, A.J., Engelhard, M., 2006. Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes. *Organic Geochemistry* 37, 1477-1488.
- Cheng, C.-H., Lehmann, J., Thies, J.E., Burton, S.D., 2008. Stability of black carbon in soils across a climatic gradient. *Journal of Geophysical Research* 113, doi:10.1029/2007JG000642.
- Clough, T.J., Bertram, J.E., Ray, J.L., Condon, L.M., O'Callaghan, M., Sherlock, R.R., Wells, N.S., 2010. Unweathered wood biochar impact on nitrous oxide emissions from a bovine-urine-amended pasture soil. *Soil Science Society of America Journal* 74, 852-860.
- Ding, Y., Liu, Y.-X., Wu, W.-X., Shi, D.-Z., Yang, M., Zhong, Z.-K., 2010. Evaluation of biochar effects on nitrogen retention and leaching in multi-layered soil columns. *Water, Air, & Soil Pollution* 213, 47-55.
- Fuertes, A.B., Arbestain, M.C., Sevilla, M., Maciá-Agulló, J.A., Fiol, S., López, R., Smernik, R.J., Aitkenhead, W.P., Arce, F., Macias, F., 2010. Chemical and structural properties of carbonaceous products obtained by pyrolysis and hydrothermal carbonisation of corn stover. *Australian Journal of Soil Research* 48, 618-626.
- Galloway, J.N., Townsend, A.R., Erisman, J.W., Bekunda, M., Cai, Z., Freney, J.R., Martinelli, L.A., Seitzinger, S.P., Sutton, M.A., 2008. Transformation of the Nitrogen Cycle: Recent Trends, Questions, and Potential Solutions. *Science* 320, 889-892.
- Gaskin, J.W., Speir, R.A., Harris, K., Das, K.C., Lee, R.D., Morris, L.A., Fisher, D.S., 2010. Effect of peanut hull and pine chip biochar on soil nutrients, corn nutrient status, and yield. *Agron J* 102, 623-633.
- Glaser, B., Haumaier, L., Guggenberger, G., Zech, W., 2001. The 'Terra Preta' phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften* 88, 37-41.
- Hua, L., Wu, W., Liu, Y., McBride, M., Chen, Y., 2009. Reduction of nitrogen loss and Cu and Zn mobility during sludge composting with bamboo charcoal amendment. *Environmental Science and Pollution Research* 16, 1-9.

- IPCC, 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Johnson, B.G.; Stout, P.R.; Broyer, T.C. & Carton, A.B. (1957): Comparative chlorine requirements of different plant species. *Plant Soil* (8), 337-353.
- Kammann, C., 2001. Die Auswirkung steigender atmosphärischer CO₂-Konzentrationen auf die Flüsse der Klimaspurengase N₂O und CH₄ in einem Grünlandökosystem. PhD Thesis, Department of Plant Ecology, Justus-Liebig-University Gießen, Germany, pp. 1-228.
- Kammann, C., Hepp, S., Lenhart, K., Müller, C., 2009. Stimulation of methane consumption by endogenous CH₄ production in aerobic grassland soil. *Soil Biology and Biochemistry* 41, 622-629.
- Kimetu, J., Lehmann, J., Ngoze, S., Mugendi, D., Kinyangi, J., Riha, S., Verchot, L., Recha, J., Pell, A., 2008. Reversibility of soil productivity decline with organic matter of differing quality along a degradation gradient. *Ecosystems* 11, 726-739.
- Kolb, S.E., Fermanich, K.J., Dornbush, M.E., 2009. Effect of Charcoal Quantity on Microbial Biomass and Activity in Temperate Soils. *Soil Science Society of America Journal* 73, 1173-1181.
- König, U.J., Eysel, G., 2004. Abschlussbericht zum Projekt "Entwicklung von Kriterien und Beurteilungsverfahren für die Herstellung und den Ersatz von Bio-Substraten für die Jungpflanzenanzucht im ökologischen Gemüseanbau unter besonderer Berücksichtigung der Weiterentwicklung der VO (EWG) 2092/91. Institut für Biologisch-Dynamische Forschung e.V. (IBDF), Darmstadt, pp. 1-79.
- Kookana, R.S., 2010. The role of biochar in modifying the environmental fate, bioavailability, and efficacy of pesticides in soils: a review. *Australian Journal of Soil Research* 48, 627-637.
- Krull, E., Bakldock, J.A., Skjemstad, J.O., Smernik, R., 2009. Characteristics of Biochar: Organo-chemical Properties. In: Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.), *Biochar for Environmental Management - Science and Technology*. Earthscan, London, UK, pp. 53-65.
- Kuzyakov, Y., Subbotina, I., Chen, H., Bogomolova, I., Xu, X., 2009. Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ¹⁴C labeling. *Soil Biology & Biochemistry* 41, 210-219.
- Larcher, W., 2001. *Ökophysiologie der Pflanzen. Leben, Leistung und Stressbewältigung der Pflanzen in ihrer Umwelt*. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart. 6., aktualisierte Auflage, 408 Seiten
- Lehmann, J., 2007. Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment* 5, 381-387.
- Lehmann, J., Czimczik, C., Laird, D., Sohi, S., 2009. Stability of biochar in soil. In: Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.), *Biochar for Environmental Management - Science and Technology*. earthscan, London, pp. 183-205.
- Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Sohi, S., Thies, J.E., Skjemstad, J.O., Luizão, F.J., Engelhard, M.H., Neves, E.G., Wirrick, S., 2008. Stability of biomass-derived black carbon in soils. *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 72, 6069-6078.
- Lofffield, N., Flessa, H., Augustin, J., Beese, F., 1997. Automated gas chromatographic system for rapid analysis of the atmospheric trace gases methane, carbon dioxide, and nitrous oxide. *Journal of Environmental Quality* 26, 560-564.
- Major, J., Husk, B., 2010. Commercial scale agricultural biochar field trial in Québec, Canada, over two years: Effects of biochar on soil fertility, biology, crop productivity and quality. BlueLeaf Inc., Drummondville (Québec), pp. 1-38.
- Major, J., Rondon, M., Molina, D., Riha, S.J., Lehmann, J., 2010. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant and Soil* 333, 117-128.
- Mosier, A.R., Mack, L., 1980. Gas chromatographic system for precise, rapid analysis of nitrous oxide. *Soil Science Society of America Journal* 44, 1121-1123.

- Nguyen, B., Lehmann, J., Kinyangi, J., Smernik, R., Riha, S., Engelhard, M., 2008. Long-term black carbon dynamics in cultivated soil. *Biogeochemistry* 89, 295-308.
- Noguera, D., Rondón, M., Laossi, K.-R., Hoyos, V., Lavelle, P., Cruz de Carvalho, M.H., Barot, S., 2010. Contrasted effect of biochar and earthworms on rice growth and resource allocation in different soils. *Soil Biology and Biochemistry* 42, 1017-1027.
- Novak, J.M., Lima, I., Xing, B., Gaskin, J.W., Steiner, C., Das, K.C., Ahmedna, M., Rehrh, D., Watts, D.W., Busscher, W.J., Schomberg, H., 2009. Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects in a loamy sand. *Annals of Environmental Science* 3, 195-206.
- Oguntunde, P.G., Fosu, M., Ajayi, A.E., Giesen, N., 2004. Effects of charcoal production on maize yield, chemical properties and texture of soil. *Biology and Fertility of Soils* 39, 295-299.
- Prentice, I.C., Farquhar, G.D., Fasham, M.J.R., Goulden, M.L., Heimann, M., Jaramillo, V.J., Khashgi, H.S., Le Qu, r., C., Scholes, R.J., Wallace, D.W.R., Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.A., 2001. The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 183-238.
- Schachtschabel, P., Blume, H.-P., Brümmer, G., Hartge, K.H., Schwertmann, U., 1998. *Lehrbuch der Bodenkunde.* Ferdinand Enke Verlag Stuttgart, 14. Auflage 1998
- Singh, B., Singh, B.P., Cowie, A.L., 2010a. Characterisation and evaluation of biochars for their application as a soil amendment. *Australian Journal of Soil Research* 48, 516-525.
- Singh, B.P., Hatton, B.J., Singh, B., Cowie, A.L., Kathuria, A., 2010b. Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils. *Journal of Environmental Quality* 39, 1224-1235.
- Solaiman, Z.M., Blackwell, P., Abbott, L.K., Storer, P., 2010. Direct and residual effect of biochar application on mycorrhizal root colonisation, growth and nutrition of wheat. *Australian Journal of Soil Research* 48, 546-554.
- Spokas, K.A., Baker, J.M., Reicosky, D.C., 2010. Ethylene: potential key for biochar amendment impacts. *Plant and Soil* 333, 443-452.
- Spokas, K.A., Koskinen, W.C., Baker, J.M., Reicosky, D.C., 2009. Impacts of woodchip biochar additions on greenhouse gas production and sorption/degradation of two herbicides in a Minnesota soil. *Chemosphere* 77, 574-581.
- Spokas, K.A., Reicosky, D.C., 2009. Impact of sixteen different biochars on soil greenhouse gas production. *Annals of Environmental Science* 3, 179-193.
- Steiner, C., Teixeira, W., Lehmann, J., Nehls, T., de Macêdo, J., Blum, W., Zech, W., 2007. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant and Soil* 291, 275-290.
- Strack, M. (Ed), 2008. *Peatlands in Global Change.* International Peat Society, Saarijärven Offset Oy, Saarijärvi, Finland, Saarijärvi, Finland.
- Succow, M., Joosten, H. (Eds.), 2001. *Landschaftsökologische Moorkunde.* Schweizerbart'Sche Verlagsbuchhandlung.
- Thies, J.E., Rillig, M.C., 2009. Characteristics of Biochar: Biological Properties. In: Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.), *Biochar for Environmental Management: Science and Technology.* Earthscan, London, U.K., pp. 85-105.
- Van Zwieten, L., Kimber, S., Morris, S., Chan, K., Downie, A., Rust, J., Joseph, S., Cowie, A., 2010a. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil* 327, 235-246.

- van Zwieten, L., Kimber, S., Morris, S., Downie, A., Berger, E., Rust, J., Scheer, C., 2010b. Influence of biochars on flux of N₂O and CO₂ from Ferrosol. *Australian Journal of Soil Research* 48, 555-568.
- van Zwieten, L., Singh, B., Joseph, S., Kimber, S., Cowie, A., Chan, K.Y., 2009. Biochar and emissions of non-CO₂ greenhouse gases from soil. In: Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.), *Biochar for Environmental Management - Science and Technology*. earthscan, London, pp. 227-249.
- Yanai, Y., Toyota, K., Okazaki, M., 2007. Effects of charcoal addition on N₂O emissions from soil resulting from rewetting air-dried soil in short-term laboratory experiments. *Soil Science and Plant Nutrition* 53, 181-188.

8 Anhang: Weitere Ergebnisgraphiken

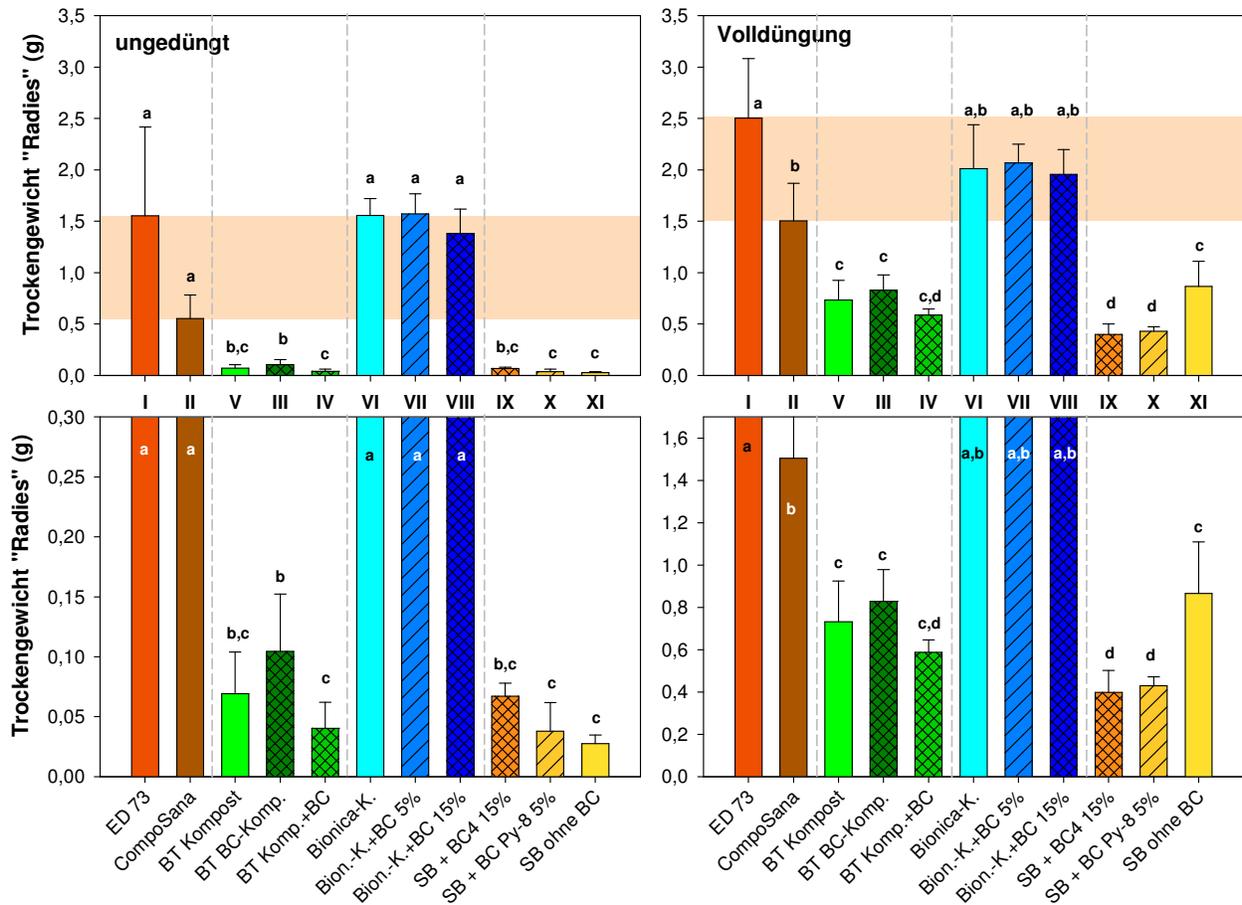


Abbildung A-3.1: Mittlere Trockengewichte der geernteten Radieschen-Knollen pro Topf (vgl. Abb. 3.2), Fehlerbalken: Standardabweichung. Links: ungedüngte Varianten, Rechts: Varianten mit Volldüngung. Oben: Übersichtsgraphik mit gleicher Y-Achsen-Skalierung, und darunter die Vergrößerung der jeweiligen oberen Abbildung mit angepasster Y-Achsenkalierung. Die bräunlich schattierten Bereiche zeigen die von den Torf-Kontrollsubstraten erreichten Werte zum besseren Vergleich an.

Verschiedene Buchstaben an den Säulen in der jeweiligen Graphik bedeuten signifikante Unterschiede zwischen den Substratmischungen (links: Kruskal-Wallis-ANOVA mit Student-Newman-Keuls-Test; rechts: Einfaktorielle ANOVA mit Tukey-Test).

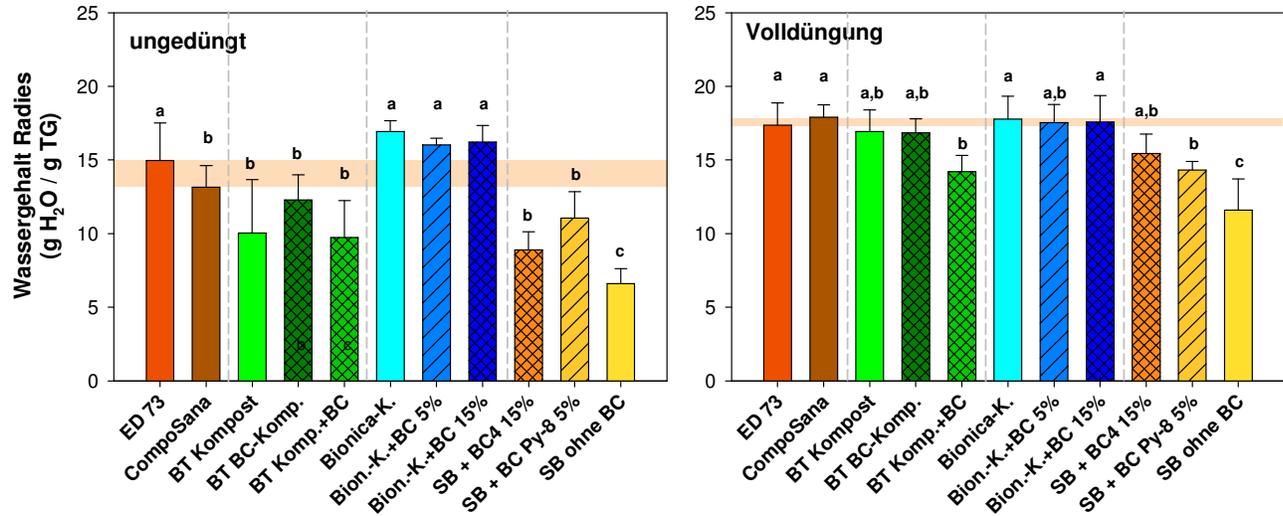


Abbildung A-3.2: Mittlere Wassergehalte der geernteten Radieschen-Knollen pro Topf (Darstellungsweise wie zuvor, vgl. Abb. 3.1 und 3.2.)

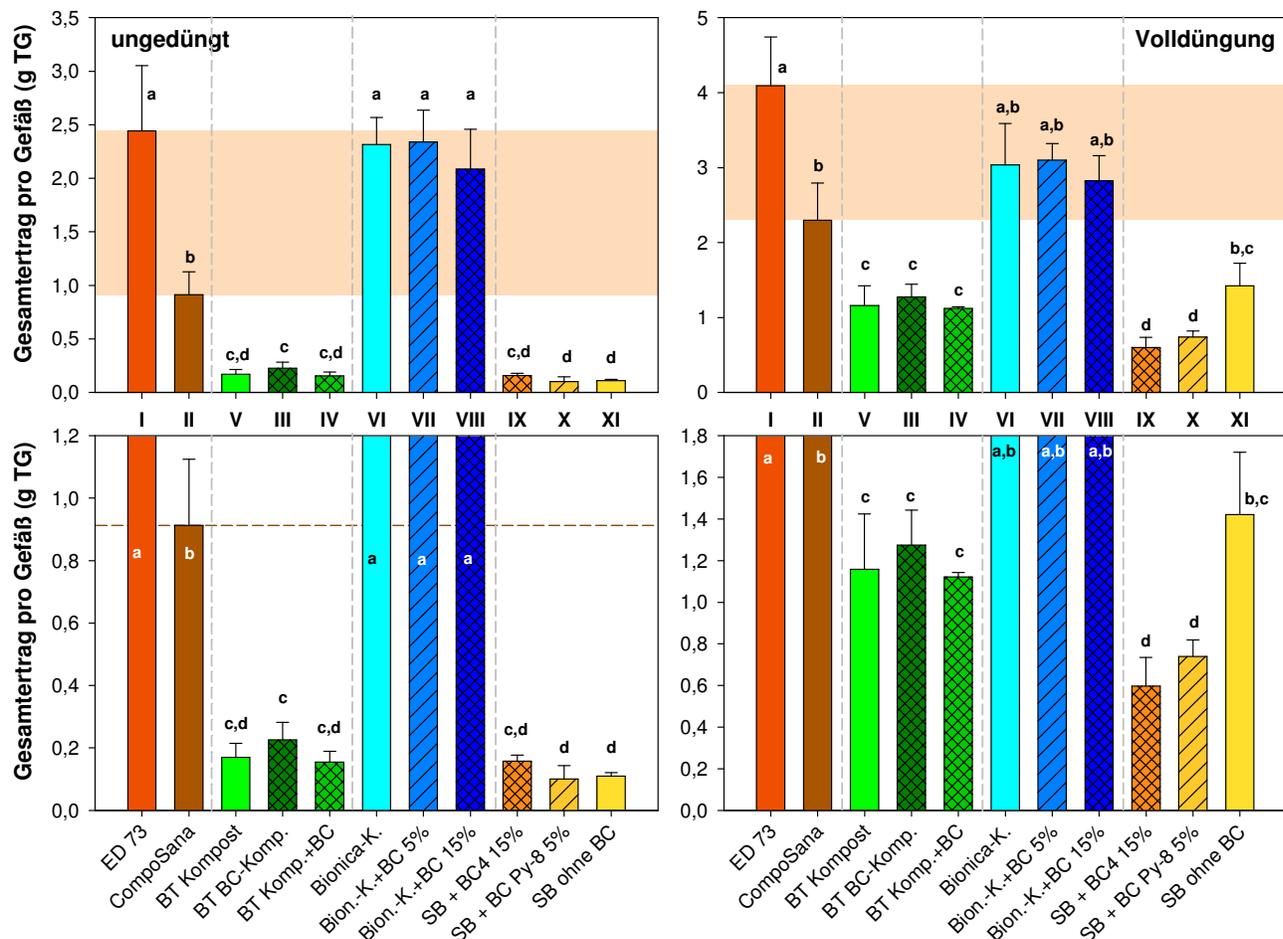


Abbildung A-3.3: Mittlerer Gesamtertrag (Trockengewichte Knollen + Blätter) pro Gefäß, Darstellung wie zuvor.

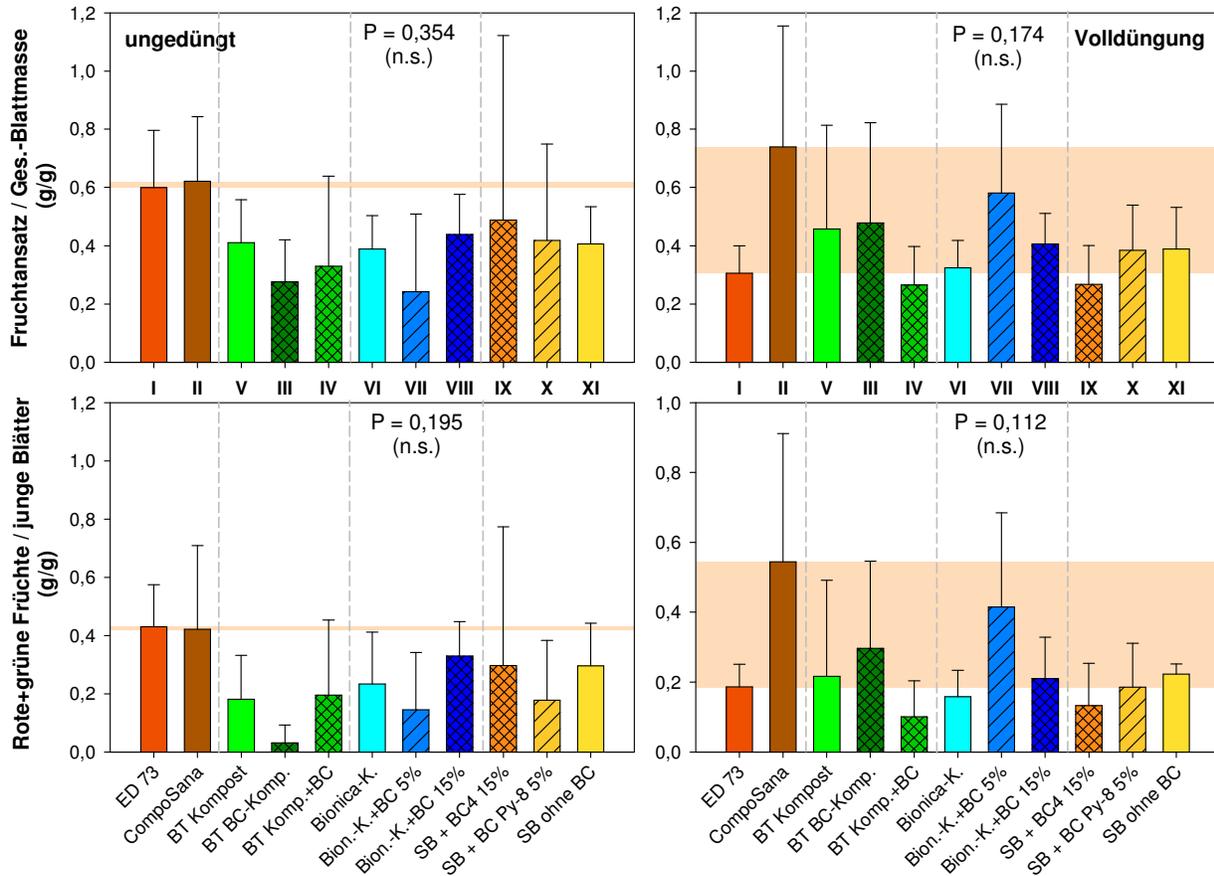


Abbildung A-3.4: Mittlere Verhältnisse von Fruchttragender Biomasse (Knospen, Blüten, Früchte und Stiele) zur Gesamtblattmasse (obere Abb.) bzw. grünen oder roten Früchten zur Masse der vitalen Blätter (d.h. ohne seneszente Blätter) (unten); Farben, Schattierung und sonstige Darstellungsweise wie in zuvor.

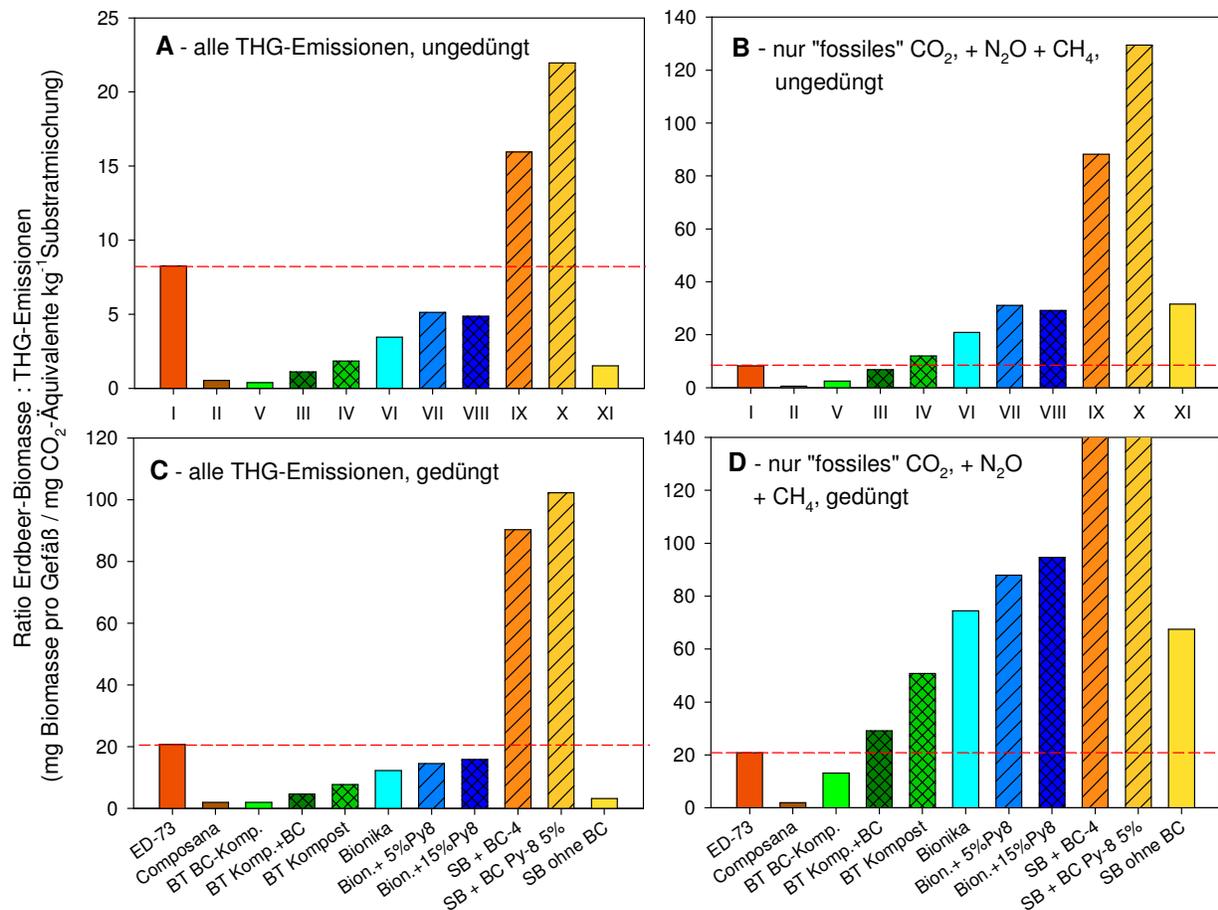


Abbildung A-3.18: Verhältnis der geernteten Gesamtbiomasse der Erdbeeren zu den im Inkubationsversuch gemessenen THG-Emissionen der Substratmischungen. **A, C:** Alle THG-Emissionen ohne Berücksichtigung der Tatsache, dass Torfe fossile CO₂-Emissionen verursachen, Komposte jedoch CO₂-neutrale Emissionen; **B, D:** Ratio wie in A bzw. C, jedoch nur unter Berücksichtigung der fossilen CO₂-Emissionen. **A, B:** ungedüngter Erdbeerertrag, **C, D:** gedüngter Erdbeerertrag. (Keine Angabe von Standardabweichung bzw. Statistik, da hier Mittelwerte zueinander in Beziehung gesetzt wurden; A: exemplarische Angabe in % von ED 73, weitere Angaben im Text). *Achtung: Alle Ordinaten sind unterschiedlich skaliert!*

BIONIKA - Kompost

Qualitätskompost - gemäß Kompostverordnung

typisiert nach dem Abfallwirtschaftsgesetz; kein Düngemittel (Düngemittelgesetz 1994. BGBl. Nr. 513/1994); geeignet für eine Anwendung gemäß der Verordnung (EWG) Nr. 2092/91 des Rates vom 24. Juni 1991 über den ökologischen Landbau und die entsprechende Kennzeichnung der landwirtschaftlichen Erzeugnisse und Lebensmittel; hergestellt unter Verwendung von Erde.

Qualitätsklasse A⁺

geeignet für eine Anwendung im ökologischen Landbau

Geeignet für die Anwendungsbereiche:

- **Ökologischer Landbau**
- **Landwirtschaft:** Zur Bodenverbesserung, zur Düngung sowie für landwirtschaftliche Rekultivierungs- und Erosionsschutzmaßnahmen, Ackerbau, Grünland, Schipisten, Feldgemüsebau, Weinbau, Hopfenbau, Obstbau, Gartenbau, Pflanzungen, Christbaumkulturen und Hobbygartenbau.
- **Landschaftsbau und Landschaftspflege:** Rekultivierung und Pflegedüngung allgemein, zur Pflegedüngung bei Sportstätten, Freizeitanlagen und Kinderspielflächen.
- **Rekultivierungsschicht auf Deponien:** Zur Pflege einer Deponie-Rekultivierungsschicht oder als Herstellung einer Kultivierungsschicht im Zuge einer Deponieoberflächenabdeckung; gemäß Deponieverordnung.
- **Biofilterbau:** Als Biofiltermaterial gemäß ÖNORM S 2020
- **Erdenherstellung:** Als Mischkomponente zur Herstellung von Erden
- **Sackware:** Für alle oben angegebenen Anwendungsbereiche freigegeben.

Empfohlene Aufbringungsmengen:

- **Hobbygarten:** bei regelmäßiger Anwendung nicht mehr als 10 l/m² und Jahr
- **Pflanzungen:** zur Befüllung von Pflanzlöchern maximal 40 Volums-% im Gemisch der Pflanzerde
- **Landwirtschaft:** keine besonderen Anforderungen
Hinweis: Mögliche Bewilligungspflicht nach dem Wasserrechtsgesetz beachten; 10t FM Kompost enthalten 55,2kg N; für landwirtschaftliche Rekultivierungs- und Erosionsschutzmaßnahmen mit wasserrechtlichen Bewilligung sind einmalig 160t TM pro ha zulässig; für Düngungsmaßnahmen maximal 8t TM pro ha und Jahr im fünfjährigen Durchschnitt. Bei Teilnahme an Förderungsprogrammen sind die Anwendungsbeschränkungen dieser Förderungsprogramme zu beachten.
- **Landschaftsbau und Landschaftspflege:** (bei Flächen, die nicht für die landwirtschaftliche Nutzung zur Verfügung stehen); keine besonderen Anforderungen
- **Rekultivierungsschicht auf Deponien:** keine besonderen Anforderungen

Anwendungsbeschränkungen: keine

Nährstoffe und Kennwerte

Organische Substanz: 20-30% i.d. TM	C/N-Verhältnis: 12-16/1
pH-Wert: 7-8	N-gesamt: 0,8-1,2% i.d. TM
Salzgehalt: 1,2-1,8 mS/cm	P-gesamt: 0,2-0,34% i.d. TM
Trockenmassegehalt: 50-75% i.d. FM	K-gesamt: 0,7-1,27% i.d. TM
Größtkorn: 40 mm	Carbonat: 8-12% id.TM
Feuchtdichte: 0,74-1,11 kg/l	

Beratung für Boden und Kompost
Bodenaufbauprojekte, Sanierungen und Schulung
Planung und Realisierung von Kompostieranlagen
Spezialist für biologische Boden- & Pflanzenernährung
Aufbau und Betreuung von Qualitätssicherungssystemen
neturnahe Landschaft- und Umweltgestaltung



Urs Hildebrandt | Pöhrst 5 | 4722 Feuerbach | Austria | Tel 0043 7276 3618 | Fax 0043 7276 3618-13 | Web www.landmanagement.net

Kompostbeurteilung-Nr. KB 3801/2008 P44108

2008 UH